

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. В.Г. ШУХОВА

**НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**  
**ВЕСТНИК**  
**БГТУ им. В.Г. ШУХОВА**

**№ 9, 2017 год**

## **Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова**

**Главный редактор:** д-р техн. наук, проф. Е.И. Евтушенко

**Зам. главного редактора:** канд. техн. наук, доц. Н.И. Алфимова

**Редакционная коллегия по основным направлениям работы журнала:**

академик РААСН, д-р техн. наук, проф. Баженов Ю.М.;

академик РААСН, д-р техн. наук, проф. Бондаренко В.М.;

д-р техн. наук, проф. Богданов В.С.; д-р техн. наук, проф. Борисов И.Н.;

д-р экон. наук, проф. Глаголев С.Н.; д-р техн. наук, проф. Гридчин А.М.;

д-р экон. наук, проф. Дорошенко Ю.А.;

член-корреспондент РААСН, д-р техн. наук, проф. Лесовик В.С.;

д-р техн. наук, проф. Мещерин В.С.; д-р техн. наук, проф. Павленко В.И.;

д-р техн. наук, проф. Патрик Э.И.; д-р техн. наук, проф. Пивинский Ю.Е.;

д-р техн. наук, проф. Рубанов В.Г.; Ph. D., доц. Соболев К.Г.;

д-р техн. наук, проф. Строкова В.В., н. с. Фишер Ханс-Бертрам;

д-р техн. наук, проф. Шаповалов Н.А.

Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты докторских диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<b>Пучка О.В., Вайсера С.С., Лесовик В.С., Сергеев С.В.</b>	
УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КАК ФАКТОР	
ФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОКОМПОЗИТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	6
<b>Стельмак С.А., Щербань Е.М., Лотошникова Е.О., Яновская А.В., Доценко Н.А.</b>	
ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ	
СВОЙСТВА НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА	15
<b>Низина Т.А., Артамонов Д.А., Низин Д.Р., Андронычев Д.О., Попова А.И.</b>	
ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДИТЕЛЕЙ НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ	
СВЯЗЫВАЮЩИХ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ НА ИХ ОСНОВЕ	19
<b>Задираха А.А.</b>	
ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ	
КОМПОЗИТНЫХ СОСТАВОВ ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ОТКОСОВ НАСЫПЕЙ	
И ВЫЕМОК В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	25
<b>Кочергин Ю.С., Золотарева В.В., Григоренко Т.И.</b>	
ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СВОЙСТВА	
ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	30
<b>Панченко Л.А., Шевченко А.В.</b>	
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗУРВУАР С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ	
ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ	38
<b>Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н.</b>	
ВАЖНЕЙШАЯ РОЛЬ РАСТВОРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ	
В СОПРОТИВЛЕНИИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ СИЛОВОМУ СЖАТИЮ	43
<b>Шешенин С.В., Закалюкина И.М.</b>	
ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ МАКСВЕЛЛА	47
<b>Старцева Л.В., Валиева Э.Т., Гарифуллин М.З., Набиев И.И., Шайхутдинов А.А.</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	
ПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ	50
<b>Семейкин А.Ю.</b>	
ОЦЕНКА ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В ОТДЕЛЬНЫХ	
МИКРОРАЙОНАХ Г. БЕЛГОРОДА	56
<b>Глатоленкова Е.В., Козыренко Н.Е.</b>	
ДВА ЦИЦИКАРА: РАЗВИТИЕ ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПОСЕЛЕНИЯ	
В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ КИТАЙСКО-ВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ	61
<b>Брагина Н.Ю.</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ	
ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА Г. ДУШАНБЕ	68
<b>Кущев Л.А., Никулин Н.Ю., Алифанова А.И., Яковлев Е.А., Щекин И.И.</b>	
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА	
В КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ ЖКХ	73
<b>Графкина М.В., Свиридова Е.Ю., Сафрина Н.А.</b>	
АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<b>Лозовой Н.М., Лозовая С.Ю., Мартынова Н.С.</b>	
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЛЬЕФА И ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ	
ИНФРАСТРУКТУРЫ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ	
БГТУ им. В.Г. ШУХОВА	88

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М., Погромский А.С.</b>	
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ	
ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ	95
<b>Клименко В.Г., Гасанов С.К., Кашин Г.А., Мамин С.Н.</b>	
ГИПСОМАГНЕТИТОВЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО	
ИЗЛУЧЕНИЯ	100

<b>Кудеярова Н.П., Бушуева Н.П., Старичкова Е.Д.</b>	
АКТИВНОСТЬ БЕЛИТОВЫХ ФАЗ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ В АВТОКЛАВНЫХ УСЛОВИЯХ	106
<b>Андронов С.Ю., Задираха А.А.</b>	
ОБРАБОТКА ФИБРОВОЛОКНА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФИБРОСОДЕРЖАЩИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	113

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Апачанов А.С., Евстратов В.А.</b>	
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ШНЕКОВОЙ ЛОПАСТИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВИНТОВОГО ПРЕССА	117
<b>Севостьянов В.С., Качаев А.Е., Бойчук И.П., Кузнецова И.А.</b>	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ИЗМЕЛЬЧАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ	122
<b>Федоренко М.А., Погонин А.А., Бондаренко Ю.А.</b>	
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ИЗНОСА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ	130
<b>Остановский А.А.</b>	
ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МЕЛЬНИЦЕ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИСТЕМЫ «МКАД»	137
<b>Таваева А.Ф., Петунин А.А.</b>	
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАШИН ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	147
<b>Должиков Д.С., Дуюн Т.А.</b>	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛОНЖЕРОНА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ	154
<b>Слонич К.А., Семенов А.С.</b>	
ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	160

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Каган П.Б., Гудков П.К.</b>	
ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И ТРАДИЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ САПР	164
<b>Еременко В.Т., Илюхин А.А., Попов В.В.</b>	
МЕТОДИКА МНОГОУРОВНЕННОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЕДИНОЙ СЕТИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНОЙ АСУТП ЖКХ	169
<b>Петраков А.А.</b>	
РАСЧЕТ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ РАЗНОМОДУЛЬНОГО НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО МАТЕРИАЛА ШАГОВЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ	177
<b>Горлов А.С., Порхало В.А., Горлов К.А.</b>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТИРАНИЯ ЧАСТИЦ	183
<b>Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г.</b>	
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ	188

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>Слабинская И.А., Ткаченко Ю.А.</b>	
ПРОЦЕДУРЫ ВНУТРЕННЕГО КОНТРОЛЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	193

**Гукова Е.А.**

СТРАТЕГИЯ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ НОВОГО ТОВАРА  
В МАРКЕТИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

197

**Карамышев А.Н.**

ОЦЕНКА ЗРЕЛОСТИ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

202

**Даниленко Е.П., Коробейник В.А.**

КОМПЛЕКСНЫЕ КАДАСТРОВЫЕ РАБОТЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЕЙ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

208

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.12737/article\_59a93b0800bbc7.91485565

Пучка О.В., канд. техн. наук, проф.,  
Вайсера С.С., магистрант,

Лесовик В.С., член-корр. РААСН д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Сергеев С.В., канд. техн. наук

ОАО «Дорожное эксплуатационное предприятие №96» обл. Белгородская, с Стрелецкое

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОКОМПОЗИТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

vaisera\_sergei@mail.ru

*Свойства стеклокомпозитов на основе пеностекла во многом зависят от его макро- и микроструктуры, изменять которую можно путем введения модифицирующих добавок в состав пенообразующей смеси, а также на стадии подготовки стеклогранулята. Актуальность исследования управления процессом формирования структуры материала с заданными свойствами обусловлена новыми возможностями получения многофункционального стеклокомпозита, сочетающего тепло- и звукоизоляционные свойства с высокими прочностными характеристиками, либо эффективное поглощение акустических волн на средних и высоких частотах.*

**Ключевые слова:** пеностекло, пористость, стеклокомпозит, прочность, звукопоглощение, комплексный газообразователь.

**Введение.** В настоящее время наблюдается интерес к материалам многофункционального назначения, которые за счет своей структуры используются как тепло и звукоизоляционные. Также материалы должны быть экологичными, пожаробезопасными и простыми при монтаже.

Одним из наиболее подходящих материалов, способный удовлетворить указанные требования, является пеностекло. Этот материал отличается низкой теплопроводностью, сравнительно большой прочностью (по отношению к его плотности) и неорганическим составом. Все вышеперечисленные характеристики обусловлены равномерным распределением закрытых мелких пор

в объеме материала. За счет этого теплоизоляционное пеностекло обладает высоким коэффициентом отражения звука  $\beta$ . Пеностекло материал двойного назначения: его используют как для теплоизоляции, так и для изоляции от воздушного шума при наружной отделке ограждающей конструкции [1–4]. Однако, для отделки внутренних помещений, как правило, высокая отражающая способность материала вредна, так как отраженные звуковые волны будут усиливать шум в помещении, создавая зоны стоячих волн. В данном случае необходимо, чтобы структура материала поглощала большую часть энергии, падающей на него звуковой волны.

Таблица 1

### Эксплуатационные характеристики пеностекла различных производителей и современные акустические материалы

Наименование продукции	Плотность, $\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Теплопроводность, Вт/м·°C
НеопормСтэс	110	0,8	0,055
Неотим Китай	120	0,7	0,048
Foamglas	160	1,6	0,042
НеопормСтэс	180	2,5	0,65
Гомель	200	1,9	0,06
Пеноситал	200	1	0,068
<i>Звукопоглощающее пеностекло и различные акустические материалы</i>			
Наименование продукции	Плотность, $\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент звукопоглощения ( $\alpha$ ) при 1000 Гц	
Звукопоглощающее пеностекло	250–350	0,3–0,5	
Акустические минераловатные плиты	75–150	0,7–0,9	
Акустический фибролит	300–400	0,45–0,50	
Гипсовые перфорированные листы	650–730	0,4–0,9	

По сравнению с минераловатными или гипсовыми материалами использование пеностекла с открытой пористостью не представляется целесообразным по причине довольно низких значений коэффициента звукопоглощения (табл. 1).

**Методология.** В БГТУ им. В.Г. Шухова создана теоретическая база проектирования и создания стеклокомпозитов (СК) нового поколения за счет использования результатов, полученных при исследовании объектов неорганического мира. Основой разработки новых высокоеффективных материалов являются теоретические положения геоники (геомиметики) как нового перспективного трансдисциплинарного направления. Это позволяет проектировать новые строительные материалы с заданной структурой и необходимыми техническими характеристиками [5–6].

Результаты, полученные при исследовании горных пород (пемзы и туфа) – природных аналогов пеностекла – позволили спроектировать поризованные конструкционно-теплоизоляционные композиты с высокой способностью поглощения звуковой волны.

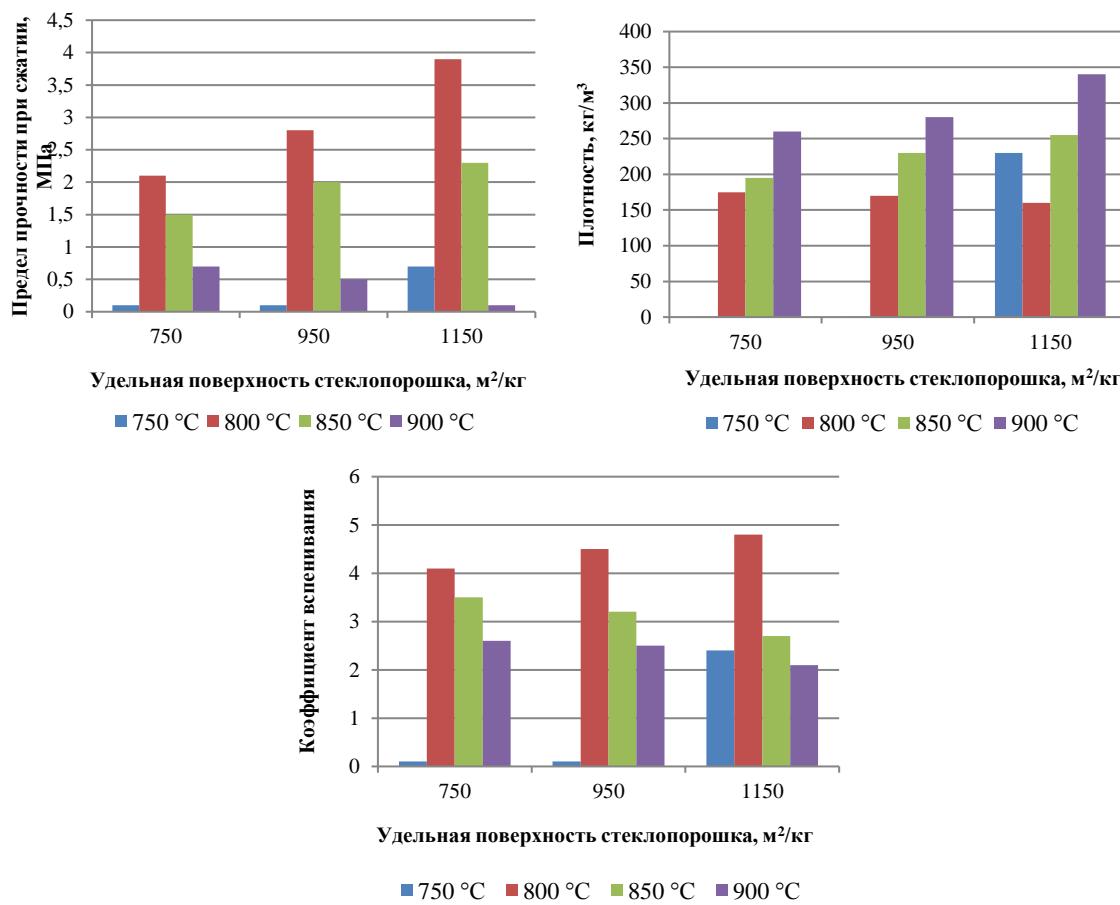


Рис. 1. Зависимости выходных параметров материалов от удельной поверхности стеклопорошка при различных температурах вспенивания

При различных температурах наблюдался нелинейный характер изменения эксплуатационных характеристик образцов (рис. 1). При темпе-

ратуре 750 °C получение материалов с удовлетворительными эксплуатационными характеристиками возможно только при условии максимальной удельной поверхности стеклопорошка

В качестве сырьевых компонентов для производства стеклокомпозитов тепло- и звукоизоляционного (СКЗИ) назначения был использован стеклопорошок, сваренный по ранее разработанному рецепту [6]. В роли газообразователя использовали технический углерод, марки П-24. При подборе составов СКЗИ учитывался имеющийся опыт ряда исследований [7–10].

**Основная часть.** Согласно проведенным исследованиям было определено оптимальное количество технического углерода в смеси, которое составляло – 0,7 мас. % сверх 100. Температурный интервал, в котором наиболее целесообразно использовать углеродсодержащий газообразователь составлял 750–900 °C, поэтому нами были проведены эксперименты при температуре вспенивания 750 °C, с шагом 50 °C. Интервал варьирования удельной поверхности стеклопорошка 750–1150 м<sup>2</sup>/кг.

Параметрами для подбора оптимального состава СКЗИ были следующие показатели: средняя плотность ( $\rho_{ср}$ , кг/м<sup>3</sup>), коэффициент вспенивания ( $K_{всп.}$ ), предел прочности при сжатии ( $R_{сж}$ , МПа) и объемное водопоглощение ( $W$ , %).

( $1150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ).

Следует отметить, что уже при  $800^\circ\text{C}$ , смесь вспенивается при различных значениях удельной поверхности стеклопорошка, что связано со снижением вязкости в температурном интервале вспенивания. При этом прочность при сжатии СКЗИ увеличивается до  $3,9 \text{ МПа}$ . Для установления причин роста прочности в дальнейшем были

проведены исследования микроструктуры образцов. Однако при увеличении температуры, эксплуатационные характеристики ухудшаются, что связано предположительно с изменениями в реологических свойствах пенообразующей смеси в процессе вспенивания.

С помощью рентгенофазового анализа были исследованы полученные СКЗИ (рис. 2 и табл.2).

Таблица 2

### Технологические данные вспенивания пеностекла

S <sub>уд.</sub> , м <sup>2</sup> /кг	T вспенивания, °C	R <sub>сж.</sub> , МПа	ρ <sub>ср.</sub> , кг/м <sup>3</sup>	K <sub>всп.</sub>	W, %
1150	800–820	3,9	160	4,8	<5
1150	850–870	2,3	255	2,7	8–10

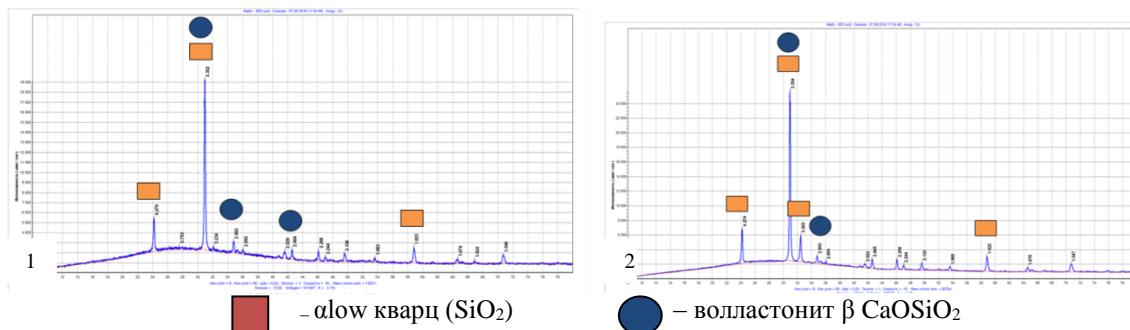


Рис.2. Рентгенофазовый анализ полученных СКЗИ  
1 – температура вспенивания  $800\text{--}820^\circ\text{C}$ , 2 – температура вспенивания  $850\text{--}870^\circ\text{C}$ ,

Образец, вспененный при температуре  $850\text{--}870^\circ\text{C}$ , отличается от образца, полученного при  $800\text{--}820^\circ\text{C}$ , повышенным содержанием кристаллической фазы, представленной оксидом кремния α-SiO<sub>2</sub> (d/n, A: 4,25; 3,35; 2,45; 1,8; 1,62) и полевыми шпатами в виде β волластонита CaO

SiO<sub>2</sub>(d/n, A: 3,31; 2,95; 2,46; 1,81). Интенсивность пиков кристаллов кварца (24000 против 19000 имп/сек на рис. 2).

Данные составы также были исследованы методом РЭМ (рис. 3–4).

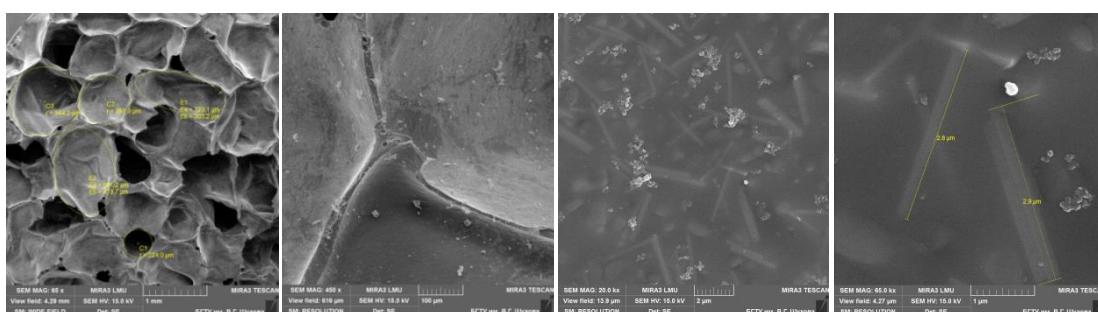


Рис. 3. Образец полученные при температуре вспенивания  $800\text{--}820^\circ\text{C}$ ,  
Количество кристаллической фазы 3,1 %

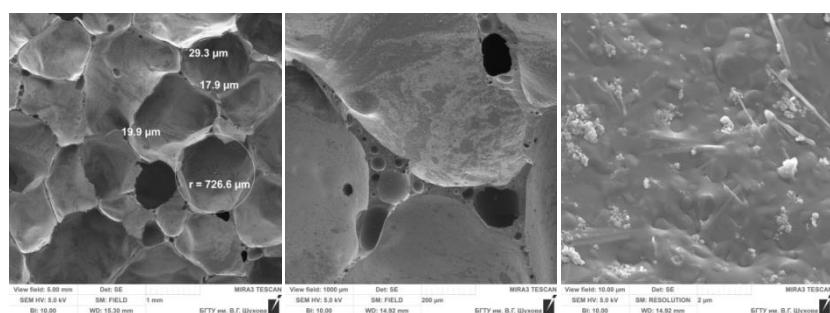


Рис. 4. Образец полученные при температуре вспенивания  $850\text{--}870^\circ\text{C}$ ,  
Количество кристаллической фазы 9,4 %

Образец полученный при 800–820 °С содержит кристаллы вытянутой формы, которые представляют собой армирующую сетку, что, предположительно, и является причиной увеличения прочности пеностекла (рис. 3, 4). При повышении температуры вспенивания до 850–870 °С процент кристаллической фазы увеличивается с 3,1 до 9,4 % в результате чего растет плотность распределения кристаллов, однако прочность образца снижается несмотря на увеличение плотности (рис. 4). Снижение прочности очевидно связано с разрушением межпоровых перегородок и объединением пор в более крупные неравномерные образования с большим количеством дефектов.

Результаты данного исследования позволили определить, значения технологических параметров, необходимых для получения стеклокомпозитов с заданным комплексом свойств.

*Экспериментальная работа по повышению звукопоглощения стеклокомпозита.* Для получения пеностекла с открытой (сообщающейся) пористостью, используют газообразователи из группы «карбонатных» газообразователей, что неотъемлемо связано с рядом недостатков. Образцы, получаемые «карбонатным» способом, имеют недостаточно высокие звукопоглощающие характеристики, повышенное водопоглощение и плотность изделий. Изменять характер пористой структуры пеностекла можно путем введения в пенообразующую смесь модифицирующих добавок различного рода. Так, в работах авторов [11] изучали влияние добавки в виде наноструктурного диоксида циркония на акустические свойства, размеры пор и макроструктуру готового пеностекла. Шутовым А.И. и др. [12] для увеличения звукопоглощения предложен способ применения газообразователя неоднородного гранулометрического состава, что в итоге способствовало созданию в массиве пеностекла дополнительной системы эллипсных пор.

Для решения данной задачи на первом этапе исследований было изучено влияние использования колеманита на физико-механические свойства стеклокомпозита (табл.3). В качестве компонентов использовали ранее сваренный и измельченный стеклопорошок с удельной поверхностью 1150 м<sup>2</sup>/кг и различное количество колеманита, выступающего в роли газообразователя. Вспенивание осуществлялось при температуре 750±10 °С.

Благодаря экспериментальным исследованиям установлено, что при введении колеманита 1-2 % в смесь образцы не вспениваются. При увеличении вводимого колеманита (3–3,5 %) полученные образцы имеют коэффициент вспенивания

равным 3,5 при средней плотности 400 кг/м<sup>3</sup>. Образец с равномерным распределением пор был получен при содержании колеманита в пенообразующей смеси в интервале 4–5 %. При таком содержании средняя плотность стеклокомпозита составила 310 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – до 25 %.

Таблица 3

### Условия эксперимента и эксплуатационные свойства полученных материалов

Газообразователь (колеманит, %)	K <sub>всп</sub>	ρ <sub>ср</sub> , кг/м <sup>3</sup>	W, %	Фотография
1	Образец не вспенился			
2	Образец не вспенился			
3	3,2	420	14	
3,5	3,5	360	18	
4	3,7	330	20	
4,5	3,9	310	23	
5	3,9	305	38	
6	3,9	280	60	
7	3,9	265	75	

При введении колеманита в смесь в количестве более 5 % в образцах стеклокомпозита наблюдалась неравномерная крупнопористая структура, что связано с разрывом межпоровых перегородок за счет излишнего увеличения давления газовой фазы и водяных паров при относительно высокой вязкости стекла.

Образцы, составы которых приведены в табл. 3, были исследованы методом РЭМ (рис. 5).

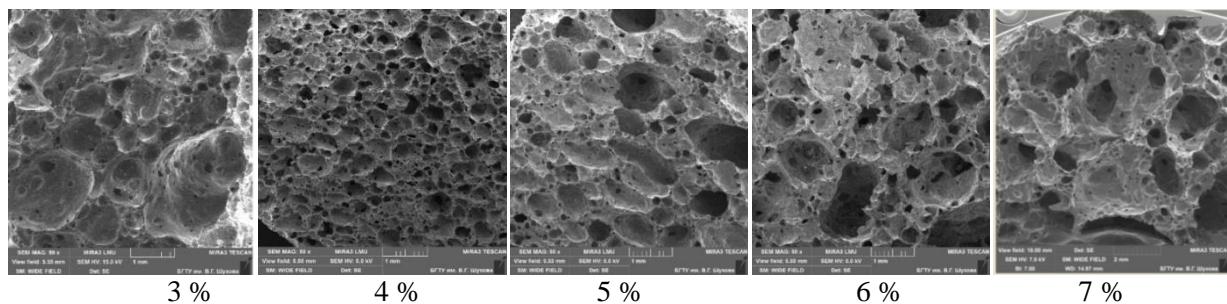


Рис. 5. Микрофотография образцов, полученных с использованием колеманита

Образец, полученный на основе 3 % газообразователя (колеманита), характеризуется плотной структурой и низким коэффициентом вспенивания, что объясняется недостаточным для полноценного процесса порообразования количеством газообразователя. Увеличение количества, вводимого газообразователя до 4–5 % позволяет получать образцы с равномерным распределением пор в объеме материала, плотность при этом уменьшилась, а водопоглощение увеличилось. При дальнейшем возрастании количества

газообразователя образуются крупные поры, за счет избыточного давления мелкие поры схлопываются неравномерно, образуя каналы в объеме материала, что способствует значительному увеличению водопоглощения образцов (рис. 5 и табл. 3).

Экспериментальным методом с помощью акустического интерферометра определили звукопоглощение образцов с различным процентным соотношением газообразователя (рис. 6).

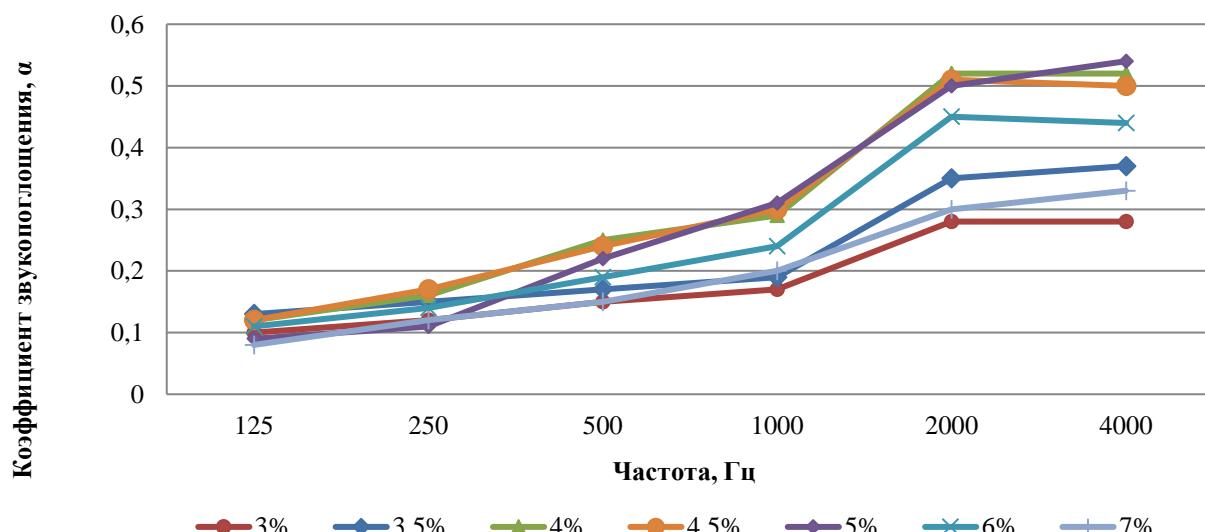


Рис.6. Звукопоглощение образцов, полученных с использованием колеманита

Наиболее выраженным коэффициентом звукопоглощения обладают образцы, полученные при введении колеманита в пенообразующую смесь в интервале от 4 до 5 % (рис. 6). В дальнейших экспериментах нами был использован образец, полученный при содержании колеманита 4,5 мас.%.

*Исследования на комплексном газообразователе.* Как уже отмечалось ранее для создания материала с полимодальной открытой пористостью, необходимо использовать несколько видов

газообразователей одновременно. Поэтому следующий этап исследования заключался в исследовании возможности использования, комбинированного (комплексного) газообразователя. К установленному ранее оптимальному количеству вводимого колеманита (4,5 мас. %) в смесь добавляли технический углерод марки П-24. Вспенивание осуществлялось при температуре  $800 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

В результате использования комплексного газообразователя (разное соотношение колеманит // технический углерод) можно сделать следующие выводы (табл.4). При введении 0,1 % технического углерода поры образца уменьшаются, по сравнению с образцом, полученным только на колеманите. При добавлении от 0,1 до 0,3 % водопоглощение образцов изменяется линейно, а свыше 0,3 % наблюдается скачкообразное его увеличение. Наилучшие значения были получены при соотношении, % – колеманит: 4,5 // 0,25 технический углерод. Данный стеклокомпозит обладает более равномерной структурой со средней плотностью 230 кг/м<sup>3</sup> при объемном водопоглощении до 30 %. Значительное увеличение водопоглощения при повышении в смеси технического углерода (с 0,3 до 0,4 %).

Было выявлено, что добавление технического углерода в пенообразующую смесь с колеманитом, способствовало созданию более равномерной структуры в объеме материала, при этом наблюдается наличие различных пор по размерам (макропоры), пронизанных порами меньшего размера (микропоры).

Экспериментальным методом с помощью акустического интерферометра определили звукопоглощение образцов, приведенных в табл.4. (рис. 7).

Наиболее выраженным коэффициентом звукопоглощения обладают звукопоглащающие стеклокомпозиты СКЗП (2,5) и (3), полученные при соотношении комплексного газообразователя, % – колеманит: 4,5 // 0,25 и 0,3 технический углерод.

Полученные звукопоглащающие стеклокомпозиты (СКЗП) были исследованы методом РЭМ (рис. 8).

**Таблица 4**  
**Условия эксперимента и основные эксплуатационные свойства СКЗП**

№ образца	K <sub>всп.</sub>	ρ <sub>ср.</sub> , кг/м <sup>3</sup>	W, %	Фотография
СКЗП 1	3,7	285	24	
СКЗП 2	4,0	255	27	
СКЗП 2,5	4,2	230	28-30	
СКЗП 3	4,7	205	35	
СКЗП 3,5	4,7	180	45	
СКЗП 4	4,9	160	75	

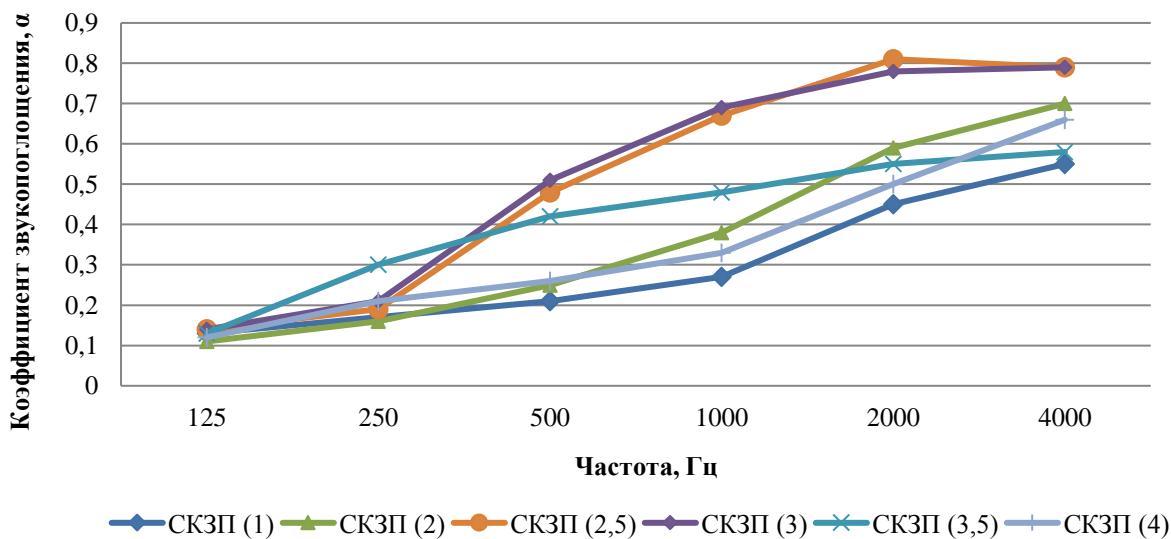


Рис. 7. Звукопоглощение образцов, полученных на основе комплексного газообразователя

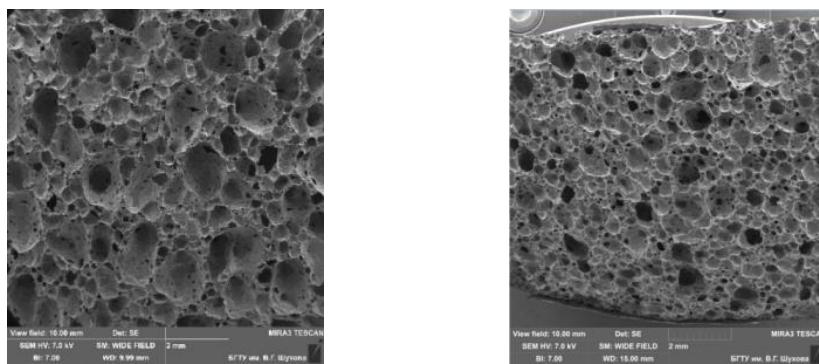


Рис. 8. Микрофотография СКЗП, полученных на комплексном газообразователе  
(колеманит // технический углерод, %: 4,5 // 0,25)  
(колеманит // технический углерод, %: 4,5 // 0,3)

Был проведен сравнительный анализ характеристик разработанного стеклокомпозита с акустическими материалами, представленными на российском рынке (рис. 9).

Анализ звукопоглощающих характеристик подтвердил конкурентоспособность разработан-

ного стеклокомпозита по части обеспечения акустического комфорта в помещении, а его неорганический состав, долговечность и стабильность свойств делает его наиболее предпочтительным при выборе акустических материалов.

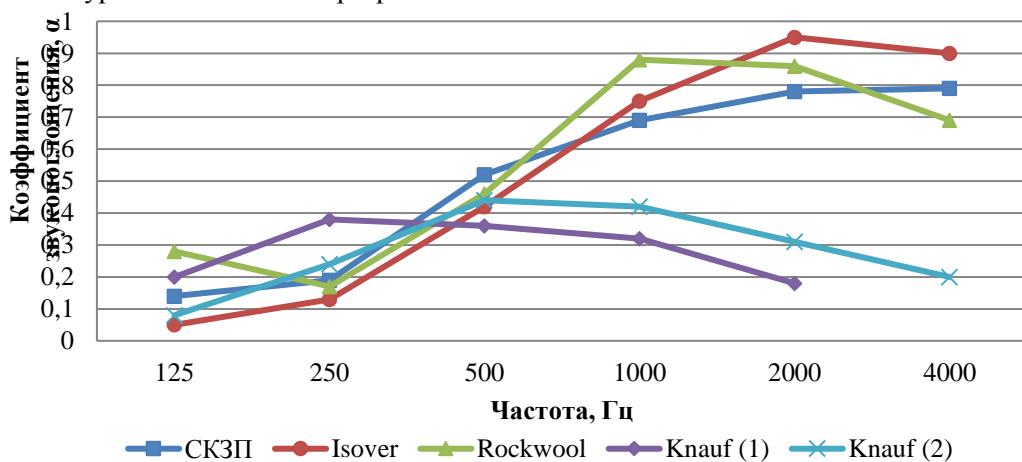


Рис. 9. Сравнительный анализ звукопоглощающих характеристик

Таблица 5

#### Итоговая таблица результатов исследования

Наименование продукции	Плотность, $\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Теплопроводность, Вт/м·°C
НеопормСтэс	110	0,8	0,055
Неотим Китай	120	0,7	0,048
<b>Разработанный звукоизоляционный стеклокомпозит (СКЗИ)</b>	<b>160</b>	<b>3,9</b>	<b>0,058</b>
Foamglas	160	1,6	0,042
Неотим Китай	160	2	0,062
НеопормСтэс	180	2,5	0,065
Гомель	200	1,9	0,06
Пеноситал	200	1	0,068
Пеноситал	300	1,5	-
<i>Звукопоглощающее пеностекло и различные акустические материалы</i>			
Наименование продукции	Плотность, $\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент звукопоглощения ( $\alpha$ ) при 1000 Гц	
Звукопоглощающее пеностекло	250–350	0,3–0,5	
Акустические минераловатные плиты	75–150	0,7–0,9	
Акустический фибролит	300–400	0,45–0,50	
Гипсовые перфорированные листы	650–730	0,4–0,9	
<b>Разработанный звукопоглощающий стеклокомпозит (СКЗП)</b>	<b>250–280</b>	<b>0,65–0,70</b>	

**Выводы.** Таким образом, с учетом теоретических положений нового трансдисциплинарного направления геоники (геомиметики) разработаны новые теплоизоляционно-конструкционные и эффективные в широком диапазоне звуковых частот звукопоглощающие стеклокомпозиты на основе пеностекла с измененной макро- и микроструктурой (см. табл. 5).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комкова А.В., Рачинская М.П. Пеностекло и его применение в России // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.s nauka.ru/issues/2012/05/12937> (дата обращения: 02.06.2017).
2. Осипов А.Н. Энергоэффективный, пожаробезопасный теплоизоляционный материал – пеностекло // Кровельные и изоляционные материалы. 2013. №2. С. 17–18.
3. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 76–79.
4. Сапачева Л.В., Горегляд С.Ю. Пеностекло для экологичного строительства в России // Строительные материалы. 2015. №1. С. 30–31.
5. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 287 с.
6. Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н., Вайсера С.С. Неорганические теплоизоляционные материалы. Пеностекло. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 263 с.
7. «Шихта для изготовления стеклогранулята для получения пеностекла» Авторы: Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Орхан Йыльмаз, Хлыстов С.П. Заявка № 2014153456/03(085464) Решение о выдаче патента на изобретение от 14.01.2016
8. Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Елистраткин М.Ю. Новое поколение строительных композитов на основе пеностекла // Журнал Строительство и реконструкция, «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс» (УНПК). Орел. 2015. С. 146–154.
9. Вайсера С.С., Пучка О.В., Лесовик В.С., Бессонов И.В., Сергеев С.В. Эффективные акустические стеклокомпозиты // Строительные материалы. 2016. № 6. С. 28–31.
10. Радоуцкий В.Ю., Ветрова Ю.В. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизолирующей способности теплоизоляционных плит на основе пеностекла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 45–49.
11. Семухин Б.С., Вотинов А.В., Казьмина О.В., Ковалев Г.И. Влияние малых добавок диоксида циркония на акустические свойства пеностекольных материалов // Вестник ТГАСУ. 2014. № 6 (47). С. 123–131.
12. Патент РФ 2266874 Шихта для изготовления пеностекла / Балыников В.И., Кириченко С.Э., Шутов А.И., Мосыпан В.И., Воля П.А. Заявл. 30.04.2002. Опубл. 10.11.2003 Бюл. №2.

Puchka O.V., Vajsera S.S., Lesovik V.S., Sergeev S.V.

## MANAGING THE PROCESS OF STRUCTURAL FORMATION AS THE FACTOR OF FORMATION OF GLASS COMPOSITE OF FUNCTIONAL DESTINATION

*Properties of glass composite on the basis of a foam glass largely depend on its macro- and microstructure, which can be changed by introducing modifying additives into the composition of the foaming mixture, and also at the stage of preparation of the glass granulate. The relevance of a research of process control of structure formation of material with the desired properties is caused by new opportunities multifunctional glass composite, combining heat and sound insulation properties with high strength characteristics, or effective absorption of acoustic waves at medium and high frequencies.*

**Keywords:** foam glass, porosity, glass composite, strength, sound absorption, integrated gas-forming agent.

**Пучка Олег Владимирович**, кандидат технических наук, профессор кафедры стандартизации и управления качеством.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: oleg8a@mail.ru

**Вайсера Сергей Сергеевич**, магистрант кафедры энергетики теплотехнологии.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: vaisera\_sergei@mail.ru

**Лесовик Валерий Станиславович**, член-корр. РААСН, доктор технических наук, зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Сергеев Сергей Викторович**, начальник лаборатории.  
ОАО «Дорожное эксплуатационное предприятие №96» Шебекинского района г. Белгорода,  
Адрес: Россия, 308511, Белгородская обл, Белгородский р-н, Стрелецкое с, Строительная, 17.

Стельмак С.А., канд. техн. наук, доц.,  
Щербань Е.М., канд. техн. наук, ст. преп.,  
Лотошиникова Е.О., канд. техн. наук, доц.,  
Яновская А.В., студент,  
Доценко Н.А., студент  
Донской государственный технический университет

## ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

au-geen@mail.ru

В данной статье рассматривается влияние комплексной добавки на физико-механические свойства газобетона. В качестве комплексной добавки в состав газобетонной смеси вводили побочный продукт при срезке верхнего слоя «горбушки» в количестве 20 %. Сравнительный анализ результатов физико-механических испытаний образцов газобетона показал, что введение в состав газобетонной смеси сульфата натрия в количестве 1,23 % от массы цемента с оптимальной дозировкой побочного продукта верхнего слоя «горбушки» (A1) позволило повысить прочность газобетона на 30 % относительно контрольного состава и на 15 % относительно состава ГБ4 без сульфата натрия. При этом значение коэффициента конструктивного качества у состава A1 на 17 % выше чем у ГБ2, что позволило принять его за базовый при производстве газобетонных изделий на действующем предприятии.

**Ключевые слова:** «горбушка», структурообразование газобетона, неавтоклавный газобетон, комплексная добавка, побочный продукт при срезке верхнего слоя «горбушки», коэффициент конструктивного качества, средняя плотность в сухом состоянии.

**Введение.** Получение бездефектных изделий из газобетона возможно лишь при правильном подборе соотношения сырьевых компонентов, гранулометрического состава смеси, технологии подготовки газобетонной смеси [1, 2]. Так, от количественного соотношения кремнеземистого компонента и вяжущего зависит средняя плотность и прочность газобетона – с увеличением содержания кремнеземистого компонента средняя плотность газобетона увеличивается, а прочность уменьшается [3]. С другой стороны, повышение расхода вяжущего в неавтоклавном ячеистом бетоне обуславливает значительный рост усадки бетона в процессе эксплуатации, которая может достигать 2-3 мм/м [4, 5, 1].

При твердении газобетона в режиме нормального твердения или пропаривания при атмосферном давлении и температуре 70–90 °С конечная прочность изделий формируется за счет высокого химического потенциала «цемент – вода». В этой связи специфика технологии неавтоклавного газобетона требует применения высокоактивных вяжущих веществ [6] с повышенным расходом портландцемента в сравнении с автоклавной технологией [4, 1, 7]. Это обусловлено невысокой степенью гидратации портландцемента при таких режимах твердения в составе газобетонной смеси [6].

Основной причиной существенного различия свойств автоклавного и неавтоклавного ячеистого бетона является разный вид формирующейся при твердении структуры твердой фазы. У

автоклавного газобетона более развита конденсационно-кристаллизационная структура, а у неавтоклавного – коагуляционная, переходящая со временем в коагуляционно-кристаллизационную структуру, которая сопровождается улучшением всех его свойств [8]. Для формирования цементного камня оптимальной структуры необходимо отметить преобладающее значение коагуляционных структур на начальных стадиях структурообразования. Это обстоятельство становится особенно важным для обоснования оптимальных параметров совместного воздействия физико-химических и механических факторов в процессе масопереноса фаз на начальной стадии структурообразования системы [9]. Возможность ускоренного формирования конденсационной структуры у неавтоклавного ячеистого бетона позволит отказаться от автоклавной обработки без снижения его качественных показателей [8].

В этом плане практический интерес представляют пути интенсификации процесса гидратации, улучшения качества структуры цементирующего вещества неавтоклавных газобетонов, при которых будет обеспечена достаточная прочность при сниженной средней плотности. Особенно важна роль химических и минеральных модификаторов для направленного регулирования структуры и свойств неавтоклавных поробетонов. По мнению профессора А.В. Ушерова-Маршака [10] объединение в составе комплексных или смешанных добавок компонентов водопонижающего, пластифицирующего, ускоряю-

щего, воздухововлекающего, воздухоподавляющего и другого типов позволяет направленно совершенствовать технологию бетона. Особое значение при этом приобретает повышение степени гидратации цемента и продуктов гидратации при помощи введения добавок-ускорителей твердения [1].

По результатам исследований авторов [11] выявлено, что при использовании полевошпатово-кварцевого песка в составе газобетона формируются плотные и прочные межпоровые перегородки и равномерная мелкопористая структура материала. Полученные неавтоклавные ячеистые бетоны имеют повышенную прочность, при средней плотности 500...550 кг/м<sup>3</sup> составляющую 2,65...2,75 МПа, что на 15...20 % выше показателей, установленных стандартом. Минералы полевых шпатов песка в составах исходной шихты проявляют алюминатную активность к растворам гипса и извести. Присутствие их в смеси приводит к образованию гидросульфоалюминатных соединений, обеспечивающих повышенную растворимость исходных компонентов и продуктов гидратации портландцемента. Волокна асбеста, введенные в составы бетонных масс, участвуют в армировании газобетона, способствуют формированию границ раздела межпоровых перегородок и порового пространства, приближенных по форме к сфере. Асбест, обладая высокой адсорбционной способностью к про-

дуктам гидратации портландцемента, активизирует химические процессы взаимодействия между компонентами бетонных масс.

Неавтоклавный ячеистый бетон изготавливают в основном при использовании портландцемента, и именно процессы схватывания и твердения цемента в присутствии компонентов ячеистой массы определяют минеральный состав новообразований и свойства изделий [12].

Ячеистый бетон можно рассматривать как строительный композит: материал с требуемыми свойствами можно получить путем изменения структуры матрицы (для ячеистых бетонов это межпоровые перегородки) композита путем введения волокнистых добавок различной природы в формовочные смеси, что приводит к эффективному улучшению свойств готовых изделий за счет их армирования [13, 14, 15].

Целью работы является исследовать влияние комплексной добавки на физико-механические свойства неавтоклавного газобетона.

**Основная часть.** Исходя из полученных результатов, опубликованных в работе [16] на следующем этапе исследований было важно оценить эффективность введения в состав газобетонной смеси комплексной добавки состоящей из сульфата натрия (ускорителя твердения) и побочного продукта верхнего слоя «горбушки» на физико-механические свойства неавтоклавного газобетона. Наименование составов газобетонных смесей и процентное содержание добавок представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Составы газобетонных смесей с добавками

№	Наименование состава	Содержание добавки, %	
		«горбушка»	сульфат натрия
1	ГБ1 (контрольный)	-	
2	ГБ4	20	-
3	А1	20	1,23
4	А2	20	2,4
5	А3	20	3,7

Из полученной газобетонной смеси объемом 5 л формовали образцы кубы с размером ребра 10 см и затем по режиму τ (2+6+3) при температуре 60 °C выдерживали в камере для тепловой обработки. Одновременно часть газобетонной смеси загружали в прибор ПГВ-2 для определения кинетики газовыделения и коэффициента диффузии, опубликованные в работе [16]. Результаты физико-механических испытаний образцов газобетона с различным содержанием комплексной добавки приведены на рис. 1.

**Выводы.** Сравнительный анализ результатов показал, что введение в состав газобетонной

смеси сульфата натрия в количестве 1,23 % от массы цемента с оптимальной дозировкой побочного продукта верхнего слоя «горбушки» (А1) позволило повысить прочность газобетона на 30 % относительно контрольного состава и на 15 % относительно состава ГБ4 без сульфата натрия. Коэффициент конструктивного качества у состава А1 на 17% выше чем у ГБ2, что позволило принять его за базовый при производстве газобетонных изделий на действующем предприятии.

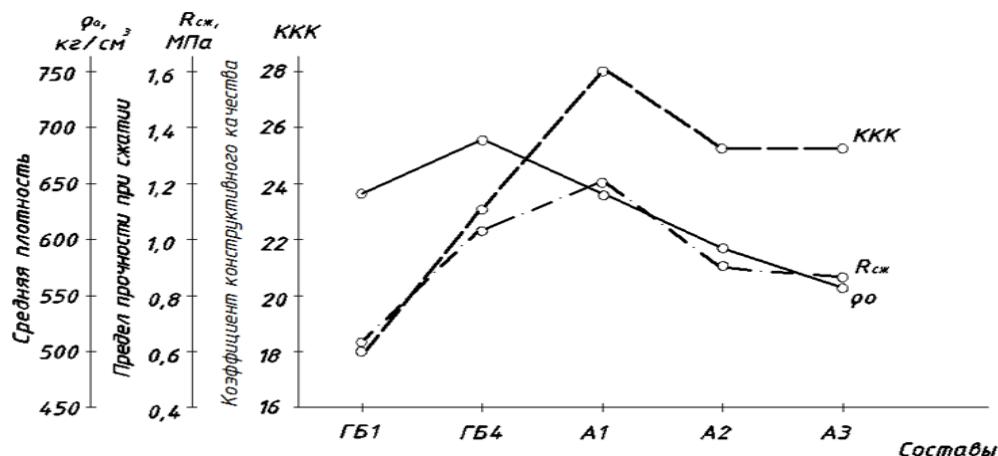


Рис. 1. Результаты физико-механических испытаний образцов газобетона с различным содержанием добавок

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лотов В.А., Митина Н.А. Влияние добавок на формирование межпоровой перегородки в газобетоне неавтоклавного твердения // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 2–6.
- Мартыненко В.А. Влияние характеристик межпоровой перегородки на физико-технические свойства ячеистого бетона // Строительные материалы и изделия. 2003. № 4(18). С. 35–38.
- Баранов А.Т., Макаричев В.В. Вопросы технологии ячеистых бетонов и конструкций из них. М.: Стройиздат, 1972. 84 с.
- Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Макаричев В.В. Ячеистые бетоны (технология, свойства и конструкции). М.: Стройиздат, 1972. 137 с.
- Крищенников А.Н. Автоклавный термоизоляционный газобетон. М.: Госэнергоиздат, 1959. С. 74–87.
- Сахаров Г.П., Скориков Е.П. Неавтоклавный энергоэффективный поробетон естественного твердения // Известия вузов. Строительство. 2005. № 7. С. 48–54.
- Лотов В.А., Митина Н.А. Особенности технологических процессов производства газобетона // Строительные материалы. 2000. №4. С. 21–22.
- Сахаров Г.П. Ячеистый бетон: новый этап развития // Технологии бетонов. 2006. №6. С. 12–13.
- Урьев Н.Б., Дубинин И.С. Коллоидные цементные растворы. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд., 1980. 192 с.
- Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 8–12.
- Долотова Р.Г., Верещагин В.И., Смирнская В.Н. Процессы фазообразования и формирования пористой структуры газобетона на основе портландцемента с использованием полевошпатовоизвесткового песка и волокон асбеста // Известия Томского политехнического университета. 2011. №3. С. 47–51.
- Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.
- Моргун Л.В. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 33–35.
- Сицина М.С., Лаукайтис А.А. Исследование влияния армирования на свойства пенобетона // Строительные материалы. 2003. № 2. С. 8–9.
- Моргун Л.В. Теоретическое обоснование и экспериментальная разработка технологии высокопрочных фибробетонов // Строительные материалы. 2005. № 6. С. 59–63.
- Явруян Х.С., Холодняк М.Г., Шуйский А.И., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Влияние некоторых рецептурно-технологических факторов на свойства неавтоклавного газобетона // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3431
- Cabrillac R., Fiorio B., Beaucour A., Dumontet H., Ortola S. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity // Construction and Building Materials. 2006. №5. P. 286–295.
- Nelson R.L., Ronald E., Barnett P.E. Autoclaved aerated concrete // Council for Masonry Research. 1997. Vol. 9. № 1.
- Ronald E., Barnett P.E. Autoclaved aerated concrete: a lime-based technology // Proc. of International Building Lime Symposium. 2005. Orlando (Florida). P. 1–8.

**Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Lotoshnikova E.O., Yanovskaya A.V., Dotsenko N.A.  
INFLUENCE OF COMPLEX ADDITIVE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE**

*This article considers the effect of a complex additive on the physical and mechanical properties of aerated concrete. As a complex additive, a by-product was introduced into the composition of the aerated concrete mix while cutting the top layer of the "crust" in an amount of 20 %. A comparative analysis of the results of physical and mechanical tests of aerated concrete samples showed that the introduction of a sodium carbonate mixture in an amount of 1.23 % of cement mass with an optimal dosage of the by-product of the upper layer of the "crust" (A1) made it possible to increase the strength of aerated concrete by 30 % relative to a control composition and 15 % relative to the composition of AC4 without sodium sulfate. At the same time, the value of the constructive quality factor for A1 is 17 % higher than for AC2, which allowed it to be taken as the base factor in the production of aerated concrete products at the operating enterprise.*

**Keywords:** "crust," the formation of aerated concrete, non-autoclaved aerated concrete, a complex additive, a by-product in cutting the upper layer of the "crust", the constructive quality factor, the average density in the dry state.

---

**Стельмакх Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики.

Донской государственный технический университет.

Адрес: Россия, 344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162.

E-mail: sergej.stelmax@mail.ru

**Щербань Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики.

Донской государственный технический университет.

Адрес: Россия, 344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162.

E-mail: au-geen@mail.ru

**Лотошникова Елизавета Ованесовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики.

Донской государственный технический университет.

Адрес: Россия, 344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162.

E-mail: lotoshnikovaeo@mail.ru

**Яновская Алина Вадимовна**, студент кафедры технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики.

Донской государственный технический университет.

Адрес: Россия, 344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162.

E-mail: kgweny@gmail.com

**Доценко Наталья Александровна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики.

Донской государственный технический университет.

Адрес: Россия, 344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162.

E-mail: natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru

**Низина Т.А., д-р техн. наук, проф.,  
Артамонов Д.А., аспирант,  
Низин Д.Р., аспирант,  
Андронычев Д.О., аспирант,  
Попова А.И., магистрант**

**Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва**

## **ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДИТЕЛЕЙ НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ НА ИХ ОСНОВЕ\***

**nizinata@yandex.ru**

*В настоящее время полимерные покрытия на основе эпоксидных связующих находят все более широкое применение для защиты строительных изделий и конструкций от действия агрессивных факторов. При этом снижение вязкости эпоксидных составов и экзотермичности процесса их отверждения без существенной потери механических характеристик являются актуальными задачами, решение которых позволяет улучшить технологичность наносимых покрытий. В ходе исследования установлено, что наименьшая экзотермичность процесса отверждения для составов на основе эпоксидных смол ЭД-20, Этал-370 и Этал-247 наблюдается при использовании отвердителей Этал-45М и Этал-1440Н. При замене данных отвердителей на Этал-1460 и ПЭПА происходит повышение разогрева смесей в 5,6–7,1 раз, а также существенное снижение жизнеспособности смесей (до 15–31 минут). Проведена оценка прочностных и деформативных характеристик эпоксидных полимеров в зависимости от вида смолы и отверждающей системы.*

**Ключевые слова:** полимерные композиты, эпоксидные связующие, отвердители, экзотермичность, жизнеспособность, механическая прочность.

**Введение.** В настоящее время нанесение изоляционных покрытий на основе полимерных материалов представляет собой широко распространенный способ поверхностной защиты различных изделий и конструкций от воздействия разнообразных сред, а также для повышения их эксплуатационного ресурса при ремонтно-восстановительных работах или реконструкции [1–5]. Использование эпоксидных смол в качестве основных компонентов рассматриваемых покрытий объясняется комплексом физико-механических характеристик, а том числе высокой адгезией к большинству известных материалов, низкими усадочными деформациями и способностью отверждаться в широком диапазоне температур [6–9].

Эпоксидные группы обладают высокой химической активностью, что позволяет использовать в качестве отвердителей эпоксидных смол достаточно широкий спектр органических и неорганических соединений. Наибольшее распространение получили алифатические ди- и полiamины, в том числе диэтилентриамин (ДЭТА), триэтилентетрамин (ТЭТА), тетраэтиленпентамин (ТЭПА), полиэтиленполиамин (ПЭПА) отвердитель № 1 (50%-ный раствор гексаметилендиамина в этиловом спирте) и т.д. [10, 11]. Одним из достоинств, обуславливающих широкое применение отвердителей аминного типа, является то, что реакция эпоксидной смолы с ними

протекает достаточно быстро уже при комнатной температуре.

Характер протекания процесса отверждения эпоксидных композитов зависит от ряда факторов: реакционной способности, количественного соотношения и теплопроводности смешиваемых компонентов, начальной температуры и др. [12–14]. Известно [15–17], что реакция взаимодействия между эпоксидной смолой и отвердителем может сопровождаться разогревом смеси выше 200 °C, что, как правило, сопровождается снижением качества полимера, развитием высоких внутренних напряжений, образованием дефектов в структуре полимерной матрицы. Поэтому снижение температуры экзотермического процесса без существенной потери свойств формируемых полимеров и покрытий на их основе, несомненно, можно отнести к актуальному направлению совершенствования полимерных составов.

**Основная часть.** В исследовании при изготовлении полимерных составов использовалась эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), являющаяся одной из наиболее распространенной в строительной отрасли. Однако она обладает достаточно высокой вязкостью, что приводит к необходимости применения технологических решений, позволяющих повысить подвижность связующих на ее основе.

Известно [10], что идеальным разбавителем для вязких систем является отвердитель,

представляющий собой высокоподвижную жидкость. Многие алифатические ди- и полиамины обладают достаточно низкой вязкостью, однако их рекомендуемого содержания (стехиометрическое, определяемое по отношению к эпоксидным группам) достаточно часто недостаточно для достижения требуемой степени разбавления системы. В подобных случаях достижение требуемой подвижности возможно за счет введения в состав эпоксидных связующих растворителей и разбавителей, а также использования более низковязких смол.

В данной работе снижение вязкости полимерных связующих достигалось за счет использования модифицированных эпоксидных смол Этал-247 и Этал-370 производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ», обладающих более низкой вязкостью по сравнению с ЭД-20.

Смола Этал-247 представляет собой низковязкую модифицированную эпоксидную смолу (вязкость в 20–22 раза ниже, чем у ЭД-20). Массовая доля эпоксидных групп – не менее 21,4–22,8 %. Используется в качестве смоляной части связующих для производства стеклопластиковых труб и других изделий, получаемых пропиткой или намоткой и применяемых в контакте с горячей водой, щелочами любых концентраций, горячими растворами солей, кислот (кроме окислителей), а также в качестве смоляной части составов для склеивания полярных материалов, изготовления антикоррозионных покрытий, заливки, пропитки и капсулирования электротехнических изделий.

Смола Этал-370 представляет собой низковязкую модифицированную эпоксидную диановую смолу, содержащую активный разбавитель. Массовая доля эпоксидных групп – не менее 21,5 %; обладает вязкостью в 4,5–5 раз ниже, чем эпоксидная смола ЭД-20. Рекомендована производителем для изготовления покрытий, стеклопластиковых и углепластиковых изделий, герметизации и изоляции в электротехнике.

В качестве отвердителей использовались современные марки Этал-1440Н, Этал-1460 и Этал-45М производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ». Данные отвердители относятся к аминному типу, нетоксичны и предназначены для холодного отверждения.

Отвердитель Этал-1440Н推薦ован для отверждения эпоксидных смол и компаундов при температуре не ниже +5 °C, имеющих повышенные требования по теплостойкости. Не содержит летучие вещества и метафенилендиамин, рекомендуется для изготовления компаундов, устойчивых к перепадам температур от -40 до +150 °C.

Отвердитель Этал-1460 предназначен для отверждения эпоксидных смол при температуре

от 0 до +40 °C при любой влажности и под водой. По данным производителя, данный отвердитель обеспечивает высокую адгезию и рекомендуется для изготовления антикоррозионных покрытий, стойких к воздействию воды, кислот и щелочей.

Отвердитель Этал-45М, представляющий собой аддукт олигоэфиркарбоната со смесью алифатических и ароматических аминов в присутствии салициловой кислоты,推薦ован для отверждения эпоксидных смол при температуре от -7 до +45 °C в условиях любой влажности.

Жизнеспособность полимерной смеси, пиковая температура процесса отверждения и время ее достижения являются важными технологическими характеристиками, влияющими на эффективность наносимых покрытий. Исследование экзотермичности процесса отверждения полимеров осуществлялось с помощью мультиметра марки Mastech M838. Значения температуры фиксировались с шагом 1 мин. Кинетические кривые изменения температуры эпоксидных составов в процессе отверждения в зависимости от вида отвердителя (Этал-1440Н, Этал-1460 и Этал-45М) представлены, соответственно, на рис. 1–3.

Из анализа представленных данных видно (рис. 1), что для составов на основе смол ЭД-20 и Этал-247, отверждаемых Этал-1440Н, наблюдается практически линейный рост температуры смеси в интервале от 30 до 170 минут после отверждения. Прирост температуры для состава Этал-370+Этал-1440Н на временном интервале до 110 минут также подчиняется линейной зависимости с последующим нарастанием скорости разогрева смеси. Максимальный прирост температуры для составов, отверждаемых Этал-1440Н, составляет от 20 до 32 °C, повышаясь в ряду смол Этал-247, ЭД-20, Этал-370. Максимальная температура для всех исследуемых составов данной группы (рис. 1) достигается в интервале 165–175 минут после начала процесса отверждения.

Установлено (рис. 2), что марка используемой эпоксидной смолы практически не оказывает влияния на процесс набора температуры смесей на основе отвердителя Этал-45М на начальном этапе. Кривые изменения температуры на временном интервале от 0 до 70 минут подобны; прирост показателя составляет всего 20 °C. Дальнейший процесс отверждения характеризуется незначительным изменением температуры для состава Этал-247+Этал-45М, а также ее дополнительным приростом на 11 и 17 °C для, соответственно, полимеров на основе смол ЭД-20 и Этал-370. Максимальный разогрев данных смесей варьируется в интервале от 95 до 125 минут исследуемого временного интервала.

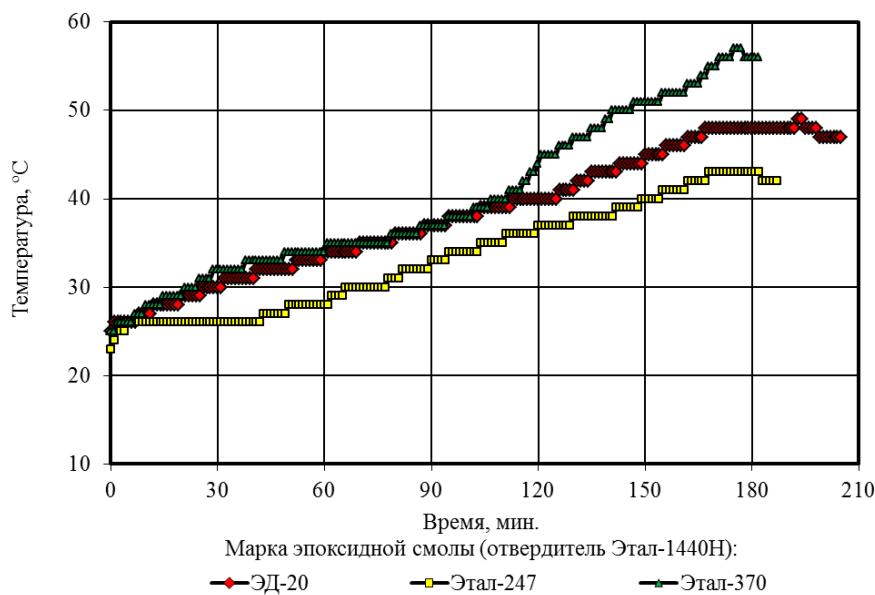


Рис. 1. Кинетические кривые изменения температуры составов эпоксидных связующих в процессе отверждения (отвердитель Эталь-1440Н)

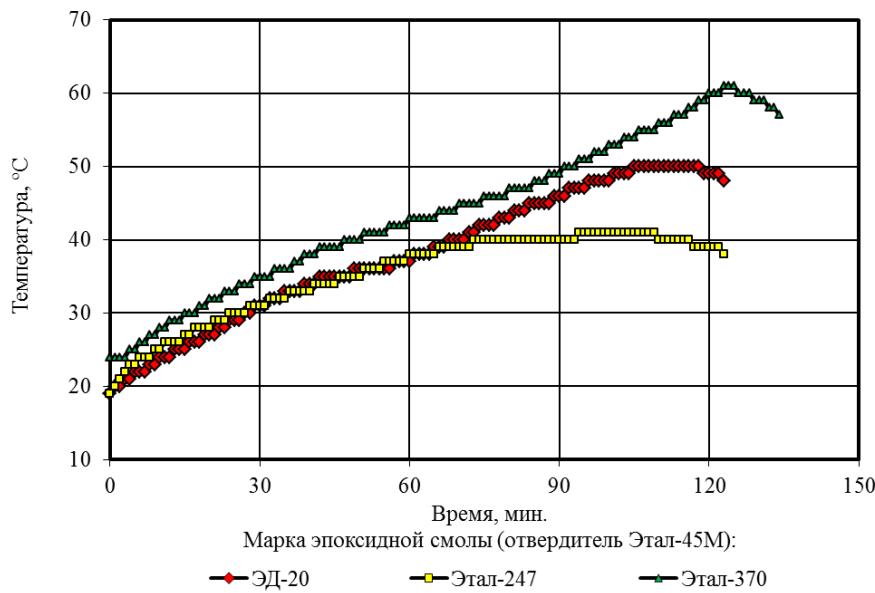


Рис. 2. Кинетические кривые изменения температуры составов эпоксидных связующих в процессе отверждения (отвердитель Эталь-45М)

Кривые изменения температуры составов, отверждаемых Эталь-1460, характеризуются (рис. 3) плавным разогревом смесей в течение первых 15 минут при использовании смолы ЭД-20 и 20–22 минут – смол Эталь-247 и Эталь-370 с последующей резкой активизацией экзотермической реакции, приводящей к дополнительному разогреву смеси от 120 до 140 °С. Подобный лавинообразный разогрев не позволяет отверждать эпоксидные смолы отвердителем Эталь-1440Н в больших объемах (как правило, не более 1 кг), что существенно ухудшает технологичность его использования. Время достижения максимальной температуры смесей при использовании данного отвердителя составляет от 20 до 32 минут.

По результатам оценки жизнеспособности, определяемой как период времени, в течение которого смола из текучего, жидкого состояния переходит в желатинообразное состояние, установлено (рис. 4), что наибольшие показатели, составляющие не менее 110 минут, зафиксированы для составов, отверждаемых Эталь-1440Н, а также связующего Эталь-247+Эталь-45М. Смеси на основе отвердителя Эталь-1460 близки по своей жизнеспособности к составам, отверждаемым ПЭПА; данный показатель для указанных полимеров варьируется в интервале от 15 до 31 минуты.

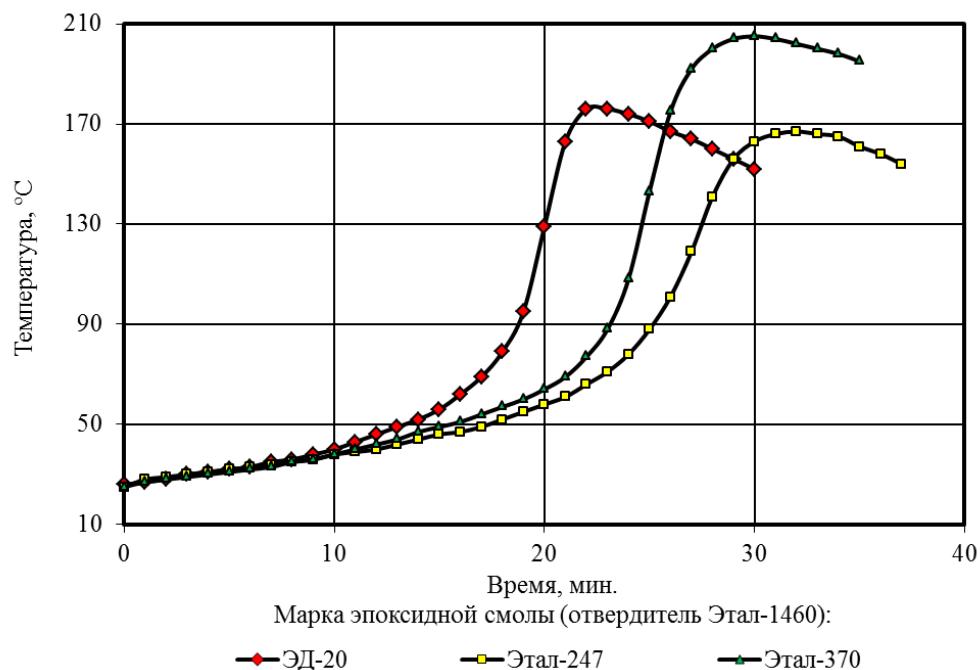


Рис. 3. Кинетические кривые изменения температуры составов эпоксидных связующих в процессе отверждения (отвердитель Этал-1460)

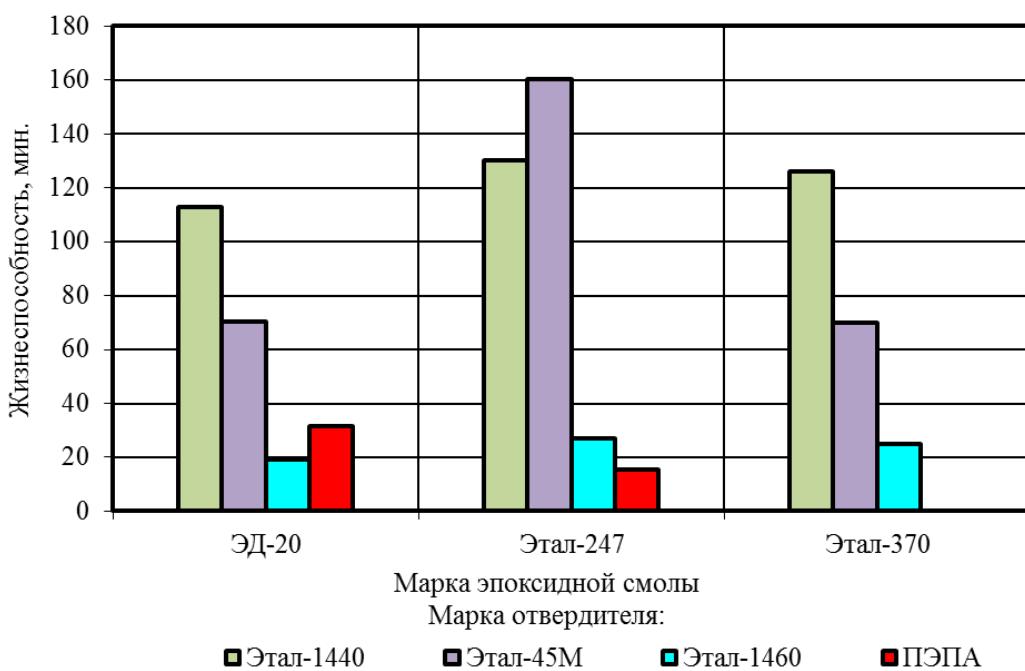


Рис. 4. Изменение жизнеспособности эпоксидных связующих в зависимости от вида смолы и отвердителя

Значения упруго-прочностных показателей при растяжении эпоксидных полимеров приведены в таблице 1. Установлено, что наиболее высокие значения прочности при растяжении для эпоксидного полимера на основе смолы ЭД-20 получены при использовании отвердителя Эталь-45М. Для составов на основе смол ЭД-20 или Эталь-370, отверждаемых Эталь-1440Н, зафиксированы прочностные характеристики в интервале 52–55 МПа, сопоставимые с показателями, получаемыми для полимеров, отверждаемых ПЭПА.

При этом относительное удлинение по сравнению с контрольным составом (ЭД-20+ПЭПА) при использовании отвердителя Эталь-1440Н для указанных выше составов повышается на 55–76 %. Наибольшим относительным удлинением при максимальной нагрузке, составляющим 11,05 %, обладает состав Эталь-370+Этал-1440Н. Замена отвердителя Эталь-1440Н на Эталь-45М или Эталь-1460 приводит к снижению деформативности полимеров на основе смолы Эталь-370 в 1,6–1,7 раза.

Таблица 1

**Предел прочности эпоксидных полимеров в зависимости от вида смолы и отвердителя (МПа)**

Марка эпоксидной смолы	Марка отвердителя			
	Этал-1440Н	Этал-45М	Этал-1460	ПЭПА
Предел прочности при растяжении, МПа				
ЭД-20	52,86	59,28	47,16	52,34
Этал-247	40,81	36,28	44,26	53,16
Этал-370	54,70	37,34	33,70	-
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %				
ЭД-20	9,77	8,62	8,18	6,29
Этал-247	8,60	7,61	8,37	7,64
Этал-370	11,05	6,68	6,37	-

**Выводы.** Проведенный анализ показал, что наибольшее влияние на процесс отверждения оказывает вид отвердителя, в разы меняющий скорость и экзотермичность реакции. Установлено, что наиболее плавно процесс отверждения протекает при использовании отвердителей Этал-45М и Этал-1440Н. Разогрев смесей для данных отвердителей достигает 20–37 °С, что в 5,6–7,1 раз ниже аналогичных значений, достигаемых при отверждении эпоксидных смол Этал-1460.

Жизнеспособность составов, отверждаемых Этал-1440Н, составляет от 1,9 до 2,2 часа; смесей на основе Этал-45М – от 1,2 до 2,7 часа, что подтверждает перспективность применения данных видов отвердителей. Низкая жизнеспособность составов, отверждаемых Этал-1460 и ПЭПА, объясняется высокой скоростью взаимодействия эпоксидных групп с аминогруппами данных отвердителей, протекающей по механизму поликонденсации. По результатам проведенных исследований установлено, что наиболее перспективными с точки зрения повышения технологических показателей эпоксидных полимеров, используемых в качестве защитных покрытий бетонных элементов строительных конструкций, являются смеси на основе отвердителей Этал-45М и Этал-1440Н.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-33-01008.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии. 2010. 822 с.
2. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. 258 с.
3. Селяев В.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А., Цыганов В.В., Низина Т.А. Полимерные
- покрытия для бетонных и железобетонных конструкций. Саранск: Изд-во СВМО, 2010. 224 с.
4. Mohamed A. Samaha, Mohamed Gad-el-Hak. Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications // Polymers. 2014. №6 (5). Access mode: <http://www.mdpi.com/2073-4360/6/5/1266/htm>
5. Kang Seok Lee, Bang Yeon Lee, Soo Yeon Seo. A Seismic Strengthening Technique for Reinforced Concrete Columns Using Sprayed FRP // Polymers. 2016. №8(4). Access mode: <http://www.mdpi.com/2073-4360/8/4/107/htm>
6. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 232 с.
7. Хозин В. Г. Усиление эпоксидных полимеров. Казань: Дом печати, 2004. 446 с.
8. Селяев В.П., Иващенко Ю.Г., Низина Т.А. Полимербетоны: монография. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. 284 с.
9. Лапицкая Т.В., Лапицкий В.А. Эпоксидные материалы // Композитный мир. 2006. №7. С. 16–17
10. Бобылев В.А. Отвердители эпоксидных смол // Композитный мир. 2006. №4. С. 20–24.
11. Мошинский Л. Эпоксидные смолы и отвердители. Тель-Авив, Аркадия пресс Лтд, 1995. 370 с.
12. Говарикер В.Р., Висванатхан Н.В., Шридхар Дж. Полимеры: научное издание. М.: Наука, 1990. 396 с.
13. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии. Под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
14. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии. М.: Изд-во Интеллект, 2009. 352 с.
15. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. Пер. с англ. Москва, Энергия, 1973. 416 с.
16. Селяев В.П., Низин Д.Р., Низина Т.А., Фомин Н.Е., Юдин В.А., Чернов А.Н. Влияние

вида отвердителя на вязкость, жизнеспособность и экзотермичность составов эпоксидных связующих // Известия ВУЗов. Строительство, 2016. № 6. С. 47–57.

17. Низина Т.А., Морозов М.А., Низин Д.Р., Чернов А.Н. Экзотермичность наполненных эпоксидных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2016. №3. С. 68–76.

---

Nizina T.A., Artamonov D.A., Nizin D.R., Andronichev D.O., Popova A.Y.

**INFLUENCE OF HARDENERS ON THE PROCESSABILITY OF EPOXY BINDERS  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMERS BASED ON THEIR BASIS**

*At the present time polymer coatings based on epoxy binders are increasingly used to protect construction products and structures from the effects of aggressive factors. At the same time, the decrease in the viscosity of epoxy compositions and the exothermicity of the process of their hardening without significant loss of mechanical characteristics are urgent problems, the solution of which allows improving the processability of applied coatings. The study found that the lowest exothermicity of the hardening for compositions based on epoxy resins ED-20, Etal-370 and Etal-247 is observed when using hardeners Etal-45M and Etal-1440H. When these hardeners are replaced with Etal-1460 and PEPA, the mixture warms up 5.6–7.1 times, and the viability of the mixtures decreases significantly (up to 15–31 minutes). The strength and deformation characteristics of epoxy polymers are evaluated depending on the type of resin and hardener.*

**Keywords:** polymer composites, epoxy binders, hardeners, exothermicity, viability, mechanical strength.

---

**Низина Татьяна Анатольевна**, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций.  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.  
Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, д. 24.  
E-mail: nizinata@yandex.ru

**Артамонов Денис Александрович**, аспирант кафедры строительных конструкций.  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.  
Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, д. 24.  
E-mail: denartam@gmail.com

**Низин Дмитрий Рудольфович**, аспирант кафедры строительных конструкций.  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.  
Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, д. 24.  
E-mail: nizindi@yandex.ru

**Андронычев Даниил Олегович**, аспирант кафедры строительных конструкций.  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.  
Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, д. 24.  
E-mail: andronuchevd@mail.ru

**Попова Анастасия Ивановна**, магистрант кафедры строительных конструкций.  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.  
Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, д. 24.  
E-mail: popova\_nastya2013@mail.ru

## ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ СОСТАВОВ ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ОТКОСОВ НАСЫПЕЙ И ВЫЕМОК В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

[alex.zadiraka@mail.ru](mailto:alex.zadiraka@mail.ru)

*Рассматривается задача повышения транспортно-эксплуатационных показателей оснований транспортных сооружений. Увеличение срока службы конструкций транспортных сооружений. Подробно рассмотрены и изучены способы укрепления откосов насыпей и выемок в дорожном строительстве. Изучены преимущества полиуретанового композитного состава для устройства оснований и покрытий транспортных сооружений. Рассмотрено влияние полиуретанового состава на показатели транспортных сооружений. Улучшения, происходящие с откосами насыпей и выемок автомобильных дорог, какие проблемы это предотвращает. После тщательного изучения данного процесса, обнаружили, что значительно повышаются эксплуатационные свойства конструкций автомобильной дороги. Данный состав можно эффективно применять для создания монолитной конструкции из щебеночных и гравийных материалов.*

**Ключевые слова:** транспортные сооружения, полиуретановый состав, укрепление и повышение свойств.

**Введение.** Главная задача для дорожной отрасли – это улучшение эксплуатационных показателей конструкций автомобильных дорог. К ним можно отнести прочность конструкции. Данная характеристика зависит от сроков эксплуатации и погодно-климатических условий.

Для повышения транспортно-эксплуатационных показателей ТС используют различные технологии пропитки оснований и покрытий связующим составом (вяжущим). Данный способ укрепления конструкции опирается на изучение физико-химических и механических свойств полиуретановых композиций. С этой целью важна такая характеристика, как сочетание высокой эластичности с широким диапазоном твердости, которые определяют великолепные свойства эксплуатации конструкций ТС.

В результате длительного воздействия ливневых и талых вод происходит разрушение конструкции откосов насыпи транспортных сооружений (например, автомобильных и железных дорог), вследствие чего образуются подмывы,

размывы и оползание откосов насыпи. Важным и необходимым мероприятием для обеспечения устойчивости земляного полотна, подводных насыпей к мостовым сооружениям и насыпей регуляционных сооружений, является укрепление откосов, которое защищает их от размыва атмосферными осадками, воздействия ветровых и фильтрующих волн [6, 7].

Ниже приведены традиционные способы укрепления откосов насыпей транспортных сооружений.

1. Укрепление откосов **засевом трав**. В результате засева многолетних трав образуется дерновой покров на откосе, а также закрепляется грунт корневой системой трав (рис. 1). Задача посева – это предотвращение откосов земляного полотна от негативного и разрушающего воздействия талых вод, температурных воздействий и ветра [8]. Если грунтовый откос не имеет благоприятной среды для данного способа укрепления, то откосы покрываются растительным грунтом слоем 10–15 см.



Рис. 1. Укрепление насыпи засевом трав

Недостаток. Засев трав имеет невысокую стоимость, но этот способ не обладает достаточной эффективностью. В первую очередь, из-за того, что для образования дерна требуется 1–2 года, а иногда и больше, а за данный период в результате обильного снеготаяния и интенсивных ливней происходят смыки грунта с укрепляемой поверхности [4].

2. Укрепление откосов **одерновкой**. При этом способе дернины укладывают горизонтальными рядами, начиная снизу от подошвы откоса к бровкам насыпей сразу по всей его длине с перевязкой швов. Закрепляют дерн деревянными

спицами (кольями) длиной 25–30 см, шириной 2–2,5 см. Спицы забивают на расстоянии 5–6 см от края дернины, по углам ее и вдоль краев на расстоянии 5–6 см от края дернины и не больше 40 см друг от друга (рис. 2). Лучшее время для производства работ – ранняя весна (после оттаяния почвенного слоя) и осень, а также дождливые периоды лета.

Недостатки. Возможны повреждения при транспортировке. Дороговизна. Вероятность неприживаемости.



Рис. 2. Укрепление откосов одерновкой

3. Укрепление откосов **каменной наброской**. Каменная наброска устраивается на откосах насыпи и регуляционных сооружений в первую очередь для их защиты от размыва и подмыва водой и разрушающего воздействия волн. Данный способ довольно прост и долговечен. Используются различные каменные наброски: камень рванный или колотый, плитчатый, изверженных метаморфических и осадочных пород, не имеющих признаков выветривания (рис. 3). Марка камня по морозостойкости и прочности определяется из СНиПа при учете условий работы климатических данных района. Крупность зависит от толщины наброски, объемной массы камня, высоты и длины волн, крутизны откоса [2, 5].

Основные достоинства крепления земляных откосов каменной наброской следующие:

- возможность механизации работ в любых метеорологических условиях и без применения фондируемых дефицитных материалов;

- возможность производить каменную наброску непосредственно в воду даже при нарастании уровня паводка или при волновых воздействиях;

- долговечность и устойчивость используемых материалов (в условиях резкого изменения температуры) против истирания наносами и размыва при больших скоростях воды;

- гибкость кладки и малая чувствительность к просадкам, так как при подмыве основания каменная наброска самопроизвольно обрушивается (опускается), прекращая дальнейший размыв;

- простота ремонта и возможность восстановления поврежденных участков крепления в период проходящего паводка или волновых воздействий.



Рис. 3. Укрепление каменной наброской

**Недостатки.** Укрепление каменной наброской хоть и имеет небольшую цену, но после зимнего периода или с течением времени щебенки или гравий может осипаться по уклону. Также щебенки пропускают влагу в достаточной степени.

**4. Укрепление бетонными и железобетонными плитами.** В случае возможного интенсивного размыва водой от постоянного или периодического подтопления подходов к мостам и регуляционных сооружений, рекомендуется откосы крепить заранее изготовленными бетонными или железобетонными плитами, а в определенных условиях плитами из монолитного железобетона [6, 7].

Бетонные плиты применяют при высоте волн до 1,2 м и слабом ледоходе. Их изготавливают из гидротехнического бетона М-200, который по водонепроницаемости и морозостойкости с учетом климатических условий строительства должен удовлетворять требованиям ГОСТ 4795–

68. Кроме того, бетон должен быть стойким против агрессивного действия воды, в которой находится плита [1, 3].

Перед укладкой бетонных плит устраивают у подошвы откоса упорную призму (берму) из камня или бетонный упор, а при укреплении подтопленного откоса отсыпают на период строительства берму из камня до отметки на 0,25 м над уровнем воды (рис. 4).

Железобетонные плиты сборного укрепления на мостовых переходах применяют для защиты откосов постоянно или периодически подтопляемых насыпей, конусов и регуляционных сооружений, подверженных действию ветровых волн высотой до 1,7 м. Плиты изготавливают из гидротехнического бетона М-200 с двумя сварными сетками, располагая рабочую арматуру перпендикулярно урезу воды. В плитах толщиной 15 см арматуру принимают из горячекатаной стали класса А-І, а в плитах толщиной 20 см – класса А-І и А-ІІ. Для подъема плит предусматривают четыре монтажных петли.



Рис. 4. Укрепление насыпи бетонными плитами

**Недостаток.** Очень дорогая установка, необходимо большое количество тяжелой техники. Проблемы с транспортировкой.

5. Укрепление грунта георешеткой с заполнителем (щебнем или гравием). Георешетка



**Недостаток.** Довольно высокая стоимость материалов, по сравнению с укреплением засевом трав или каменной наброской, также более сложный технологический процесс.

6. Укрепление грунта георешеткой с заполнителем (щебнем или гравием), обработанным вяжущим материалом.

Возможны два сочетания укреплений:

1) комбинированный метод (георешетка+щебень+вязующий материал на основе полиуретана). При комбинированном методе укладывается георешетка на поверхность откоса, поверх нее равномерно распределяется щебень (гравий). После равномерного распределения поверх щебня проливается вяжущее, например, материалом на основе полиуретана;

2) простое сочетание щебня с вяжущим материалом на основе полиуретана при простом сочетании на уже равномерно распределенный по поверхности откоса насыпи щебень (гравий) проливают вяжущий материал на основе полиуретана [9, 10].

После розлива на щебень вяжущего материала (на основе полиуретана) и его застывания, образуется монолитная конструкция, которая уменьшает попадание влаги в дорожную конструкцию, в результате чего увеличивается устойчивость откосов.

Материал, вяжущий на основе полиуретана – это синтетический жидкий материал, полученный путем смешивания смолы и отвердителя. Затем образуется полиуретановый

укладывается на поверхность откоса насыпи и засыпается щебнем. Данный способ регламентирован ОДМ и т.п. (рис. 5)

материал – синтетический твердый материал, полученный путем отверждения раствора смолы и отвердителя (двухкомпонентной полиуретановой системы), которая обладает уникальными свойствами.

Данный материал имеет следующие преимущества:

- высокая прочность скрепления щебеночного слоя;
- повышенная износостойкость обработанной поверхности;
- простота нанесения;
- презентабельный внешний вид верхнего слоя обработанного щебеночного покрытия;
- хорошая текучесть;
- стабильность при частых замерзаниях и оттаиваниях;
- стойкость к агрессивным средам;
- отсутствие токсичности;
- класс горючести B1;
- пожаробезопасен.

Способы применения полиуретана подробно изложены в стандарте организации АО «ОргсинтезРесурс» СТО «Материал вяжущий на основе полиуретана для автомобильных дорог. Технические условия».

**Вывод.** Данный способ с применением полиуретановой реакционной смеси укрепления и ремонта откосов насыпей и выемок позволяет предотвратить дефектообразование и повысить однородность вяжущего материала в местах со-

единения зерновых элементов транспортного сооружения за счет уменьшения размеров пор (пустот).

Это объясняется тем, что при проливе вяжущего сверху под действием собственной силы тяжести в слое зернового элемента образуется каркас в виде оболочек вяжущего на зерновых элементах и вертикальных нитей из вяжущего в случайно распределенных пустотах между контактирующими друг с другом оболочками.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СоюздорНИИ. Руководство по строительству оснований и покрытий автомобильных дорог из щебеночных и гравийных материалов, Москва 1999. 234 с.

2. Патент № 2479523 Российской Федерации, С04B26/16 E01C7/30. Способ получения содержащих минералы дорожных покрытий для настилов / Момайер НИЛЬС (DE), Реезе Оливер (DE), Айзенхардт Андреа (DE), Леберлингер Маркус (DE), Момайер Хайнрих (DE); заявитель и патентообладатель БАСФ СЕ (DE). заявл. 12.09.2008; опубл. 20.04.2013.

3. Методические рекомендации по строительству щебеночных оснований повышенной жесткости. СоюздорНИИ. М., 1978. 127с.

4. ВСН 46-83 Инструкция по проектированию одежд нежесткого типа. 101. С.

5. Пособие по строительству покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов из грунтов, укрепленных вяжущими материалами, К СНиП 3.06..06-88.

6. Леонтьев В.Ю., Кокодеева Н.Е., Чижиков И.А., Кочетков А.В., Задирака А.А. Методы ремонта щебеночных конструкций, армированных объемными георешетками на конусах мостовых сооружений и откосах автомобильных дорог // Дороги. Инновации в строительстве. 2015. № 43. С. 74–78.

7. Кокодеева Н.Е., Талалай В.В., Кочетков А.В., Аржанухина С.П., Янковский Л.В. Методологические основы оценки технических рисков // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28(47). С. 126–134.

8. Патент № 2492290 Российской Федерации, Е01C3/04. Способ строительства автомобильных дорог и конструкция автомобильной дороги / Арсеньев Дмитрий Анатольевич, Основин Евгений Владимирович; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Центральная транспортная компания". заявл. 29.12.2011; опубл. 10.09.2013.

9. ВСН 04-71 Указания по расчету устойчивости земляных откосов. 97с.

10. АО «ОргсинтезРесурс». «Материал вяжущий на основе полиуретана для автомобильных дорог. Технические условия» // Стандарт организации АО «ОргсинтезРесурс» СТО 88902325-01-2014.23с.

**Zadiraka A.A.**

## ADVANTAGES OF USING POLYURETHANE COMPOSITE COMPOSITIONS WITH REINFORCEMENT OF SLOPES OF EMBANKMENTS AND DEPRESSIONS IN ROAD CONSTRUCTION

*The problem of increasing the transport and operational parameters of the bases of transport structures is considered. Improving the service life of transport structures. The ways of strengthening the slopes of embankments and depressions in road construction are examined in detail and studied. The advantages of polyurethane composite composition for the construction of bases and coatings of transport structures were studied. The influence of polyurethane composition on the parameters of transport structures is considered. Improvements taking place with the slopes of embankments and roadways, which problems prevent it. After a thorough study of this process, they found that the operational properties of the road structure were significantly increased. This composition can be effectively used to create a monolithic construction of gravel and gravel materials*

**Keywords:** transport facilities, the polyurethane composition, the strengthening and improvement of properties.

**Задирака Алексей Анатольевич**, аспирант.

Саратовский Государственный Технический университете им. Гагарина Ю.А.

Адрес: Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

E-mail: alex.zadiraka@mail.ru

**Кочергин Ю.С., д-р техн. наук, проф.,  
1<sup>Золотарева В.В., канд. техн. наук, доц.</sup>  
<sup>1Донецкий национальный университет экономики и торговли  
имени Михаила Туган-Барановского  
Григоренко Т.И., канд. техн. наук</sup>**

## **ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**viktoria802@gmail.com**

*Представлены результаты исследований влияния нанопорошка оксида алюминия на комплекс физико-механических, триботехнических и адгезионных свойств эпоксидных полимеров. Установлено, что введение нанопорошка способствует существенному увеличению прочности при растяжении и сжатии, модуля упругости и деформации при разрыве эпоксидных полимеров.*

**Ключевые слова:** нанопорошок, оксид алюминия, эпоксидный полимер, физико-механические, триботехнические, адгезионные свойства.

**Введение.** В последнее время одним из интереснейших и перспективных направлений в науке о полимерах и материаловедении является разработка принципов получения полимерных нанокомпозитов [1–7]. Поскольку материалы на основе эпоксидных смол (ЭС) характеризуются высокими физико-механическими, диэлектрическими и химическими свойствами и находят широкое применение в различных отраслях промышленности, они могут служить прекрасной матрицей для получения нанокомпозитов [8–23]. Так согласно [14], введение органоглины в ЭС приводит к повышению теплофизических свойств. При этом 5 %-ная потеря массы наполненного полимера наступает при температуре на 80–100 °C выше, чем у исходной ЭС. С увеличением содержания наполнителя повышается температура активной деструкции композиционного материала. При содержании органоглины 2–3 масс. ч. возрастает прочность при растяжении, а дальнейшее увеличение концентрации наполнителя приводит к её понижению. Модуль упругости повышается вплоть до наполнения 10 масс. ч. [14, 16], а ударная вязкость наполненного органоглиной полимера увеличивается в 2–3 раза и достигает своего максимума при содержании наполнителя 1–2 масс.ч. [18]. Введение в качестве наполнителя SiO<sub>2</sub> и гибридных материалов, содержащих кварц, приводит [10] к повышению теплофизических и физико-механических свойств. При этом снижается термическое расширение композиции, а именно коэффициент термического расширения наполненного полимера на 30–40 % меньше, чем у исходного полимера. Модуль упругости композиционного материала повышается на 20 % по сравнению с исходной ЭС [9, 15]. Введение гибридного Si-содержащего материала приводит к повышению износостойкости и существенному

снижению коэффициента трения с 0,7 до 0,3 [15]. При использовании в качестве наполнителей оксидов и сульфидов металлов установлено [11, 12], что при введении MoS<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> износ композиции уменьшается в 8–10 раз, а коэффициент трения при этом изменяется незначительно.

Введение нанотрубчатого графита приводит к повышению теплостойкости и температуры начала интенсивной термодеструкции эпоксидного полимера (ЭП) [21].

Авторами [24] показано, что существует сложная зависимость температуры стеклования ( $T_c$ ) от концентрации многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ). Для базового ЭП значение  $T_c$  составляет 65°C. При малой концентрации МУНТ (0,05 – 0,1 масс.ч.)  $T_c$  повышается на 10 – 15 °C, а ширина температурного интервала перехода увеличивается. При увеличении содержания МУНТ выше 0,3 масс. ч.  $T_c$  резко снижается, достигая минимума при  $C = 1$  масс.ч.. После  $C > 1,2$  масс. ч.  $T_c$  снова растет, достигая значения 120 °C при  $C = 3$  масс.ч. По мнению авторов [23] возможными причинами такого поведения являются:

- переотверждение матрицы из-за взаимодействия гидроксильных групп на поверхности нанотрубок с ЭС;
- подвижность НТ, сравнимая с подвижностью полимера;
- разрыхление межфазных слоев, уменьшение плотности упаковки макромолекул;
- большая площадь межфазной поверхности.

Как было установлено в работе [25], снижение температуры стеклования происходит вблизи порога электрической переколяции в эпоксидных нанокомпозитах. Данный эффект авторы

связали с пластифицирующим действием углеродных нанотрубок. Падение  $T_c$  в области переключения перехода интерпретируется как увеличение подвижности сегментов цепей эпоксидной смолы.

В работе [26] показано, что углеродные нанотрубки (УНТ) в малых количествах (от 0,001 до 0,02 %) значительно повышают прочностные характеристики эпоксидного композиционного материала (прочность при изгибе и модуль упругости возрастают на 27–38 %, прочность при сдвиге на 16 %), что открывает перспективы их применения в авиационной и космической промышленности.

Авторами [27] установлено, что наполнение ЭП углеродными нанотрубками повышает их морозостойкость (вплоть до -196 °C) и работоспособность в условиях термоциклирования.

Предложена [28–31] методика оценки фрактальной размерности поверхности нанокластеров в структуре сетчатых ЭП, трактуемых как естественные нанокомпозиты. Автор [28] исходил из предположений других исследователей [29, 30], которые сформировали положение, что полимерные системы в силу особенностей своего строения всегда являютсяnanoструктурными. При этом существуют различные трактовки такой структуры. Согласно [29], структура полимера представляет собой рыхлоупакованную матрицу, в которую погружены области локального порядка (кластеры). Эти кластеры можно рассматривать как нанонаполнитель, представляющий собой набор нескольких плотноупакованных коллинеарных сегментов разных макромолекул с размерами до 1 нм [29, 30]. Причем в отличие от наночастиц неорганических наполнителей, нанокластеры являются поверхностными фракталами.

Наряду с армирующим действием УНТ способны влиять на изменение физико-механических характеристик композитов за счет участия в процессе отверждения эпоксидных олигомеров и формирования структуры полимерной матрицы [32].

В последнее время большое внимание уделяются исследованию нанокомпозитов и их применению на железнодорожном транспорте [33–36]. Разработаны принципы создания новых антифрикционных многослойных покрытий, в которых основную нагрузку берет на себя металл силового каркаса, а высокие антифрикционные свойства обеспечивает nanoструктурное покрытие, которое может состоять из одного или нескольких слоев, несущих различную смысловую нагрузку – одни слои обладают антифрикционной стойкостью, а другие – адгезионной. Данные системы могут быть применены на предприятиях

железнодорожного транспорта как принципиально новый смазочный материал в системе колесо-рельс для нанесения покрытия на боковую грань рельса в кривых малого радиуса. Качественно новые эксплуатационные и потребительские свойства таких изделий позволяют достичь увеличения безаварийного срока службы деталей и устройств, снижения расходов на замену вышедшего из строя оборудования и уменьшения сроков простоя оборудования.

Авторами [37] предложены эпоксидные композиции для ремонта газо-нефтетрубопроводов подводных переходов с улучшенными адгезионными характеристиками и прочностью на сжатие. Эффект достигается за счет введения в ЭС наноразмерных частиц фуллерена и органобентонита на основе монтмориллонитовых глин.

В работе [38] дан краткий обзор новейших достижений в области нанотехнологий строительных материалов. Рассматриваются наноструктурные бетоны, в том числе с применением нанокомпозитной арматуры, модифицированные наночастицами сталь, полимерные покрытия и краски, адгезивы, герметики и строительные материалы (в том числе на основе ЭС) специального назначения (полимерные композиты, связующее, стекло), обладающие высокими эксплуатационными свойствами.

Интересным направлением получения нанокомпозитов является золь-гель технология для формирования частиц наполнителя на основе разных аллоксисилановых соединений [39–41]. Установлено, что при содержании полисилоксановых частиц (ПСЧ) 0,5 – 1,5 мас.% для композитов на основе триэпоксида и 1,5 – 3,0 мас.% для композитов на основе дизпоксида наблюдается увеличение прочности при одноосном растяжении модуля упругости, а также адгезионной прочности kleевых соединений при равномерном отрыве. При этом более высокие физико-механические свойства имеют системы, полученные при формировании золей первичных ПСЧ в отсутствие эпоксидного олигомера. Получены композиты с высокими деформационно-прочностными и адгезионными свойствами, термостабильностью, водо-кислото- и щелочестойкостью, которые могут быть использованы в качестве антифрикционных полимерных композитов для стальных и титановых пар трения.

В свете изложенного цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния нанопорошка оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) на физико-механические и адгезионные свойства эпоксидных полимеров.

**Методология.** В качестве объекта исследования была выбрана промышленная диановая

смолы ЭД-20. Отвердителем служил полиокси-пропилентриамин марки Т-403 производства компании Huntsman Chemicals. В качестве нанопорошка использовали оксид алюминия, полученный плазмохимическим методом. Представляет собой  $\gamma$ -фазу с размером частиц 10–300 нм. Отверждение композиций проводили по режимам I (22 °C/240 ч) и II (22 °C/24 ч + 120 °C/3 ч).

Адгезионную прочность kleевых соединений образцов (Ст. 3) при сдвиге ( $\tau_b$ ) и отрыве ( $\sigma_{opt}$ ) определяли по ГОСТ 14759–69 и 14760–69 соответственно. Предел текучести ( $\sigma_{sj}^T$ ) и разрушающее напряжение ( $\sigma_{sj}^P$ ) при сжатии измеряли по ГОСТ 4651-82.

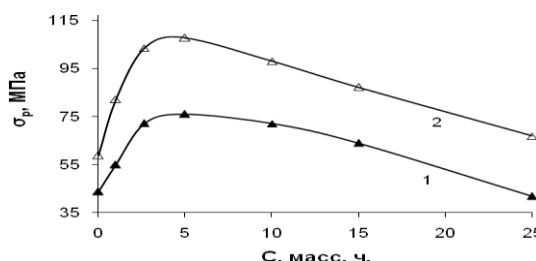
Показатель истирания (I) определяли по ГОСТ 11012–69. Сущность метода заключается в определении уменьшения объема образца в кубических миллиметрах в результате истирания (износа) на 1 м пути истирания шлифовальной шкуркой. Испытания проводили на машине типа APGI (производство ФРГ). Нагрузка на образец составляла 1 кг, длина пути истирания образца – 10 м (25 оборотов цилиндра машины).

Предельные механические свойства при одностороннем растяжении измеряли на динамометре Поляни [43]. Модуль упругости (E) рассчитывали по наклону начального участка кривой напряжение – деформация ( $\sigma - \epsilon$ ). Мерой работы разрушения ( $A_p$ ) служила площадь под кривой  $\sigma - \epsilon$ . Температуру стеклования ( $T_g$ ) определяли при постоянной растягивающей нагрузке 1 МПа на приборе, описанном в [44]. Объекты исследования деформационно-прочностных свойств представляли собой пленки толщиной ~100 мкм, полученные при отверждении композиций между двумя полированными поверхностями металлических плит, покрытым тонким слоем антиадгезива.

Микротвердость измеряли в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

**Основная часть.** Как следует из рис. 1–3, зависимости деформационно-прочностных свойств от концентрации (С) нанопорошка

a)



б)

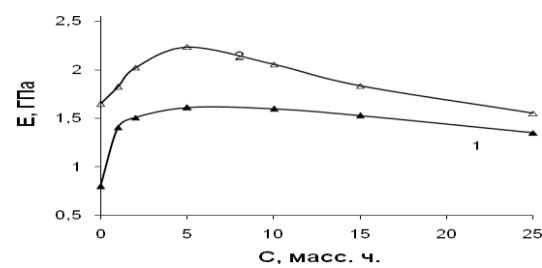


Рис. 1. Зависимость  $\sigma_p$  (а) и E (б) от концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

имеют экстремальный характер. Максимумы прочности и жесткости (рис. 1) проявляются при содержании наполнителя ~5 масс. ч. При этом значения  $\sigma_p$  в точке максимума превосходят величину прочности базового (не содержащего наполнитель) образца в ~1,8 раза.

Что касается модуля упругости, то для образцов, отверженных по режиму I, при введении  $\text{Al}_2\text{O}_3$  он увеличивается более, чем в 2 раза, а при отверждении по режиму II примерно в 1,35 раза.

Деформация при разрыве  $\epsilon_p$  (рис. 2) для образцов, отверженных по режиму I, после образования слабо выраженного максимума при содержании наполнителя 1–2 масс. ч. наблюдается монотонное снижение  $\epsilon_p$ . Для образцов, подвергнутых термообработке (режим II), максимум вырождается, а уменьшение  $\epsilon_p$  происходит с разными скоростями: при  $0 < C < 5$  масс. ч. и при  $C > 15$  масс. ч. снижение очень малое, а в интервале  $5 < C < 15$  масс. ч. величина деформации при разрыве убывает достаточно быстро. Такое влияние нанопорошка на деформационную способность может быть, в частности, объяснено следующим образом. Как известно [45], наночастицы проявляют тенденцию к образованию агрегатов с размерами до 300 нм и даже агломератов с размерами до 3000 нм. Согласно [46] структура агрегата с сильно связанными наночастицами при деформации допускает их поворот и скольжение, на что расходуется энергия развивающейся трещины, обусловливая тем самым повышение пластичности материала. Большое значение при этом имеют количество и распределение агрегатов на пути продвигающейся трещины. Трещина быстро продвигается, когда агрегатов мало. Если же агрегатов больше определенного числа, то они начинают работать как множество препятствий для продвижения трещины, т. е. реализуется определенный упрочняющий эффект. Исходя из этого механизма и учитывая характер наблюдавшихся на рис. 2 зависимостей  $\epsilon_p - C$ , можно предположить, что наночастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  связаны в агрегатах намного прочнее в образцах, отверженных по режиму II.

Параметр  $A_p$  образует максимум при содержании нанопорошка 3 и 6 масс.ч. соответственно для образцов, отверженных по режимам I и II (рис. 3).

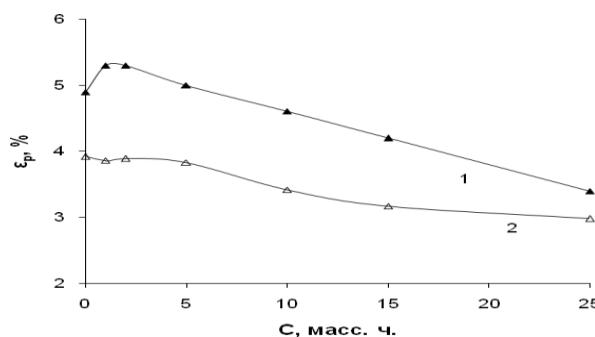


Рис. 2. Зависимость  $\varepsilon_p$  от концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

Как видно из рис. 4, влияние нанопорошка на износ композиций весьма незначительно. Мало сказывается влияние нанопорошка также на прочности ЭП при сжатии (рис. 5) и на адгезионной прочности (рис. 6).

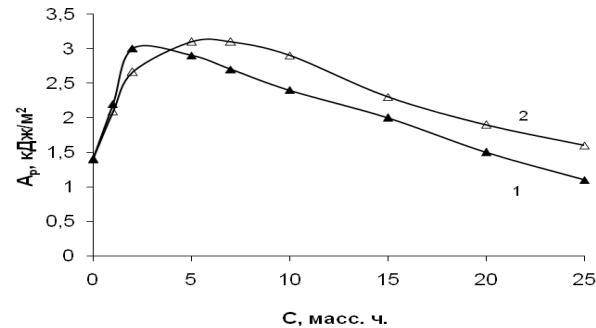


Рис. 3. Зависимость  $A_p$  от концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

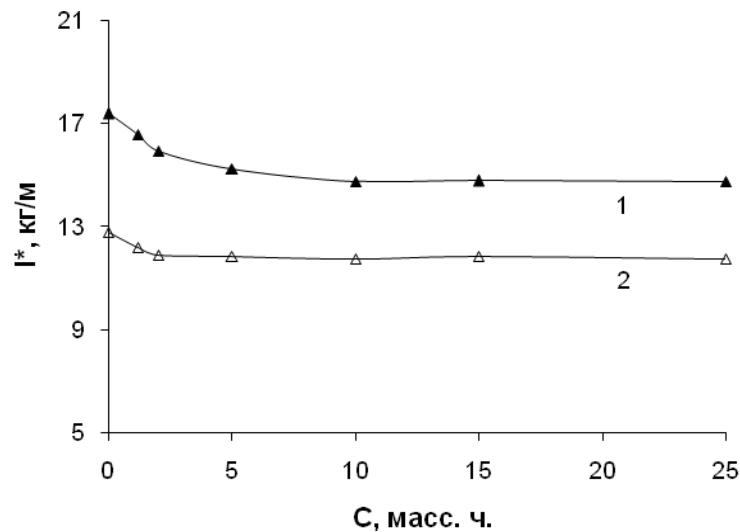


Рис. 4. Зависимость  $I^*$  от концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2).  $I^* = I \cdot \rho$ , где  $\rho$  – плотность ЭП

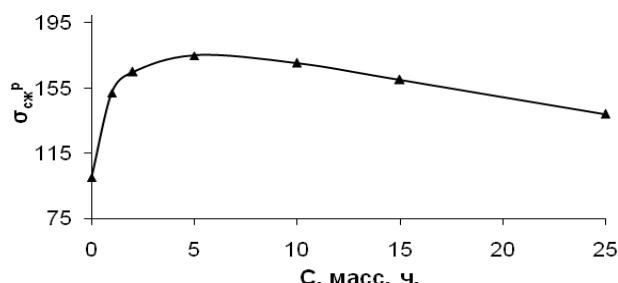
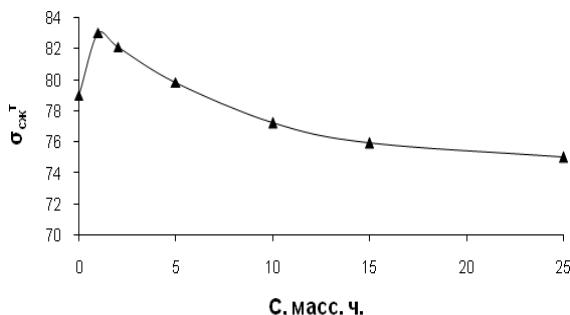
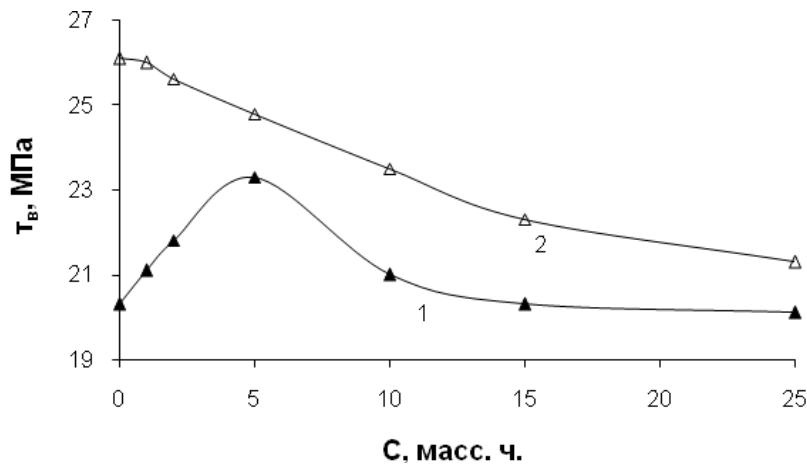
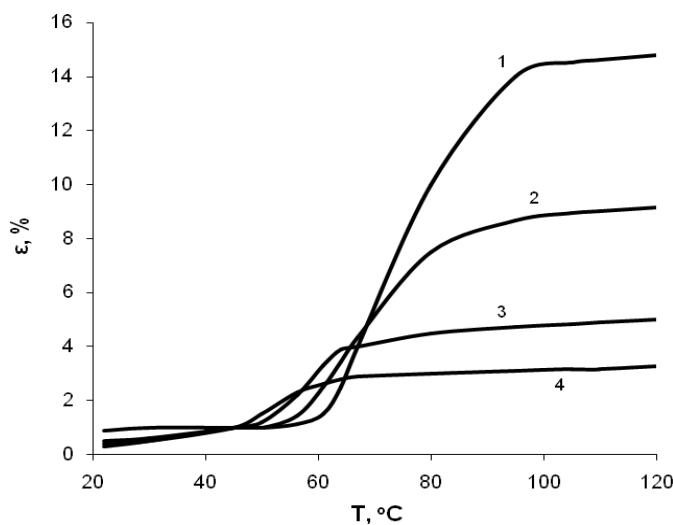


Рис. 5. Зависимость  $\sigma_{\text{сжт}}$  и  $\sigma_{\text{сжп}}$  от концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образцы отверждены по режиму II

Рис. 6. Зависимость  $\tau_v$  от концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)Рис. 7. Термомеханические кривые базового эпоксидного полимера (1) и наполненного 2 (2), 5 (3) и 15 (4) масс. ч.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образцы отверждены по режиму I

Рассмотрим далее зависимость теплофизических свойств от количества нанопорошка. Как следует из рис. 7, с увеличением концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  наблюдается уменьшение температуры стеклования (на  $\sim 10$  °C при  $C = 15$  масс.ч.) и снижение деформации в высокоэластичном состоянии (почти в 5 раз). Последнее обстоятельство свидетельствует о значительном увеличении эффективной прочности пространственной сетки, образованной химическими и физическими связями. Авторы [47, 48], наблюдавшие подобное снижение  $T_c$  при исследовании ЭП, наполненных нанопорошком SiC (на 8 °C при массовой доле 20 %), предложили следующее объяснение этого явления.

В присутствии поверхностей раздела полимерная матрица – наночастица изменяется кинетика процесса расстеклования (т. е. перехода из

стеклообразного в высокоэластичное состояние). Увеличивается его скорость или число и/или число фронтов превращений общей трансформации в композиции, содержащей нанонаполнитель.

Может быть предложено еще одно объяснение эффекта уменьшения температуры стеклования при введении нанопорошка. Известно [49], что для композиционных материалов на основе ЭП может наблюдаться эффект пластификации, обусловленный избирательной адсорбцией компонентов неотверженной системы наполнителем. В результате вблизи наполнителя возможно образование в структуре композита участков с недостатком (если адсорбируется преимущественно отвердитель) или избытком (если адсорбируется смола) отвердителя. Эти участки будут обладать меньшей величиной  $T_c$  и тем самым

оказывать пластифицирующее действие на всю полимерную матрицу.

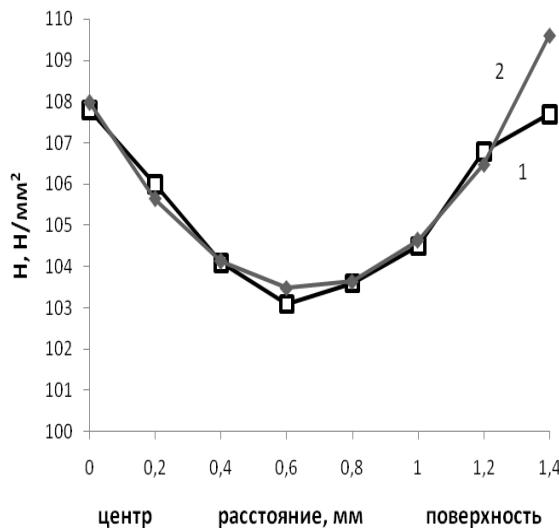


Рис. 8. Зависимость  $H$  от расстояния слоев образца до центра поперечного сечения нанокомпозитов, содержащих 5 масс.ч.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
1 – экспериментальная кривая; 2 – аналитическая зависимость

Как видно из рис. 8 показатель микротвердости  $H$  зависит от геометрических размеров образца. В поперечном сечении образца величина  $H$  с удалением от центра вначале несколько уменьшается, достигая минимума при расстоянии около 0,6 мм, а затем по мере удаления от центра и приближения к поверхности образца микротвердость возрастает.

Экспериментальная кривая, представленная на рис. 8, достаточно хорошо описываются аналитической зависимостью

$$H = 107,9762 - 13,75 \cdot x + 10,4167 \cdot x^2 \quad (\text{кривая 2}),$$

где  $x$  – расстояние слоя образца до его центра.

**Выводы.** Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о весьма сложном характере влияния нанопорошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на комплекс механических, триботехнических и теплофизических свойств эпоксидных полимеров. Установлено, что наполнение нанопорошками способствует существенному увеличению прочности при растяжении (в 1,8–2,0 раза), сжатии (в 1,2–1,5 раза), модуля упругости (в 1,4–1,7 раза) и деформации при разрыве (на 30 %) эпоксидных полимеров при незначительном изменении адгезионной прочности и стойкости к износу.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ozerin A.N., Svergun D.I., Volkov V.V. [et al] The spatial structure of dendritic macromolecules // J. Appl. Cryst. 2005. Vol. 38. Pp. 996–1003.
- Ivanchev S.S., Ozerin A.N. Nanostructures in polymer systems // Polym. Sci. Ser B. 2006. Vol. 48. № 7–8. Pp. 213–225.
- Kurkin T.S., Ozerin A.N., Kechejian A.S. [et al] The Structure and Properties of Polymer Composite Fibers Based on Poly (vinyl alcohol) and Nanodiamond of Detonation Synthesis // Nanotechnologies in Russia. 2010. Vol. 5. № 5–6. Pp. 340–351
- Чвалун С.Н. Полимерные нанокомпозиты // Конструкторское бюро. 2011. № 3. С. 57–68.
- Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Перспективные разработки ВИАМ в области наноматериалов и нанотехнологий // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 6. С. 9–15.
- Paul D.K., Robeson L.M. Polymer nanotechnology: Nanocomposites // Polymer. 2008. Vol. 49. Pp. 3187–3204.
- Krishnamoorti R., Vaia R.A. Polymer nanocomposites // J. Polymer Sci: Part B: Polymer Phys. 2007. Vol. 45. № 24. Pp. 3252 – 3256.
- Кузяев И.М., Сытар В.И., Кабат О.С. Основные направления развития науки и техники в области полимерных нанокомпозитов и нанотехнологий на современном этапе // Вопросы химии и химической технологии. 2006. № 4. С. 126–130.
- Bondioli F., Cannillo V., Fabbri E., Messori M. Epoxy-Silica Nanocomposites: Preparation, Experimental Characterization, and Modeling // Journal of Applied Polymer Science. 2005. Vol. 97. № 6. Pp. 2382–2386.
- Ochi M., Matsumura T. Thermomechanical Properties and Structure of Epoxy / Silica Nano-Hybrid Materials Constructed from a Linear Silicone Oligomer, // Journal of Polymer Science: Part B: Polymer physica. 2005. Vol. 43. № 13. Pp. 1631–1639.
- Schon J. Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite // Wear. 2004. Vol. 257. Pp. 395–407.
- Chang L., Zhang Z., Breidt C., Friedrich K. Tribological properties of nanocomposites. I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO<sub>2</sub>, particles // Wear. 2005. Vol. 258. Pp. 141–148.
- Xiubing Li, Gao Yimin, Xing J. [et al] Wear reduction mechanism of graphite and MoS<sub>2</sub> in epoxy composites // Wear. 2004. Vol. 57. P. 279–283.
- Kotsilkova R. Processing-Structure-Properties Relationships of Mechanically and Thermally Enhanced Smectite Epoxy Nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2005. Vol. 97. № 6. Pp. 2499–2510.
- Shi G., Zhand M.G., Ronga M.Z. [et al] Friction and wear of low nanometer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filled epoxy composites // Wear. 2003. Vol. 254. Pp. 784–796.
- Liu T., Tjiu W.C., Tong Y. [et al] Morphology and Fracture Behavior of Intercalated Epoxy /

- Clay Nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2004. Vol. 94. № 3. Pp. 1236–1244.
- 17.Brown G.M., Ellyin F. Assessing the Predictive Capability of Two-Phase Models for the Mechanical Behavior of Alumina Epoxy Nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2005. Vol. 98. № 2. Pp. 869–879.
- 18.Basara C., Yilmazer U., Bayram G. Synthesis and Characterization of Epoxy Based Nanocomposites // Journal of Polymer Science: Part B: Polymer physica. 2005. Vol. 98. № 3. Pp. 1081–1086.
- 19.Fidelusa J. D., Wiesela E., Gojny F.H., и др Thermo-mechanical properties of randomly oriented carbon / Epoxy Nanocomposites// Composites: Part A –2005. Vol. 36. Pp. 1555–1561.
- 20.Chisholm N., Mahfus H., Rangari V.R., [et al] Fabrication and mechanical characterization of carbon / SiC-epoxy nanocomposites // Composites Structures. 2005. Vol. 67. № 2-4. Pp. 115–124.
- 21.Thielemans W., McAninch I.V., Barron V. [et al] Impure Carbon Nanotubes as Reinforcements fo Acrylated Epoxidized Soy Oil Compositrs // Journal of Applied Polymer Science. 2005. Vol. 98. № 3. Pp. 1325–1338.
- 22.Ratna D., Manoj N., Varley R. [et al] Clay-reinforced epoxy nanocomposites // Polym. Ind. 2003. Vol. 52. Pp. 1403–1407.
- 23.Korumann X., Lindberg H., Berglunda L.A. Synthesis of epoxy nanocomposites: influence of the nature of the clay on structure // Polymer. 2001. Vol. 42. Pp. 1303–1310.
- 24.Драгун В.Л., Евсеева Л.Е. Межфазное взаимодействие в эпоксидных нанокомпозитах и его влияние на температуру стеклования // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Двадцать девятой Международной конференции и семинара. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2009. С. 119–121.
- 25.Barral S., Demont P., Perez E. [et al] Glass Transition Temperature Depression at the Percolation Threshold in Carbon Nano-tube-Epoxy Resin and Polypyrrole-Epoxy Resin Composites // Macromolecules. 2003. Vol. 36. № 12. Pp. 9678–9685.
- 26.Кайсина Т.И., Шебанов С.М., Никитин В.В. [и др.] Прочностные характеристики нанокомпозиционных материалов // Композиционные материалы в промышленности: Материалы Двадцать восьмой Международной конференции. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2008. С. 442–444.
- 27.Драгун В.Л., Евсеева Л.Е. Теплопроводность эпоксидных нанокомпозитов под воздействием знакопеременных тепловых нагрузок // Композиционные материалы в промышленности: Композиционные материалы в промышленности: Материалы Тридцатой Юбилейной Международной конференции, 7–11 июня 2010 г. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2010. С. 323–326.
- 28.Магомедов Г.М., Амиршахова З.М., Козлов Г.В. Оценка фрактальной размерности поверхности нанокластеров в эпоксиполимерах // Композиционные материалы в промышленности: Материалы Тридцатой юбилейной Международной конференции, 7 – 11 июня 2010 г. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2010. С. 308–312.
- 29.Иванчев С.С., Озерин А.Н. Наноструктуры в полимерных системах // Высокомолекулярные соединения. Сер.Б. 2006. Т. 48. № 8. С. 1531–1544.
- 30.Mikitaev A.K., Kozlov G.V., Zaikov G.E. Polymer Nanocomposites: Variety of Structural Forms Applications. New York: Nova Science Publishers Inc., 2008. 319 p.
- 31.Козлов Г.В., Новиков В.У. Кластерная модель аморфного состояния полимеров // Успехи физических наук. 2001. Т 171. № 7. С. 717–764.
- 32.Богатов А.В., Кондрашов С.В., Мансурова И.А. [и др.] О механизме усиления эпоксидных смол углеродными нанотрубками // Все материалы энциклопедический справочник. 2012. № 4. С. 7–11.
- 33.Kolesnikov V.I., Myasnikova N., Saverkova M. [et al] Polymeric composites and lubricants for the wearresistant friction units of railway mechanics // Transport problems. 2009. Vol. 4. Issue 3. Part 1. Pp. 65–70.
- 34.Колесников В.И. Повышение износостойкости металлополимерной трибосистемы с использованием нанотехнологий // Транспорт России: становление, развитие, перспективы: Материалы научно-практической конференции, 18 ноября 2009 г. М.: МИИЕ. 2009. № 5. С. VII-5-VII-11.
- 35.Колесников В.И., Сычев А.П., Бардушкин В.В. [и др.] Эффективные упругие характеристики антифрикционных композитов на эпоксидной основе // Вестник Южного научного центра. 2010. №1. С. 5–10.
- 36.Колесников В.И. Повышение износостойкости металлополимерных систем с использованием нанотехнологий // Современные проблемы механики сплошной среды: тезисы докл. XIV международной конференции 19–2 июня 2010 г. Ростов-на-Дону. 2010. С. 49–50.
- 37.Натрусов В.И., Шацкая Т.Е., Беляева Е.А. [и др.] Модификация эпоксидных матриц холодного отверждения наноматериалами углеродного и силикатного типов // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Двадцать

- восьмой Международной конференции и выставки, 26-30 мая 2008г. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2008. С. 3–5.
38. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. 2012. №3. С. 6–21.
39. Жильцова С.В., Михальчук В.М., Белошенко В.А., Кирилаш А.В. Влияние молярного соотношения тетраэпоксисилана и глицидокси-пропилтриэпоксисилана на свойства эпоксидно-силоксановых композитов ангидридного отверждения // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. № 4. С. 676 – 682.
40. Жильцова С.В., Бабкина Н.В., Михальчук В.М. Динамические механические и адгезионные свойства эпоксидно-силоксановых нанокомпозитов, полученных золь-гель методом // Полимерный журнал. 2010. Т. 33. № 1. С. 11–16.
41. Жильцова С.В., Михальчук В.М., Бабкина Н.В. [и др.] Вязкоупругие и деформационно-прочностные свойства эпоксидно-силоксановых композитов на основе эпоксидной смолы EPONEX 1510 // Клей. Герметики. Технологии. 2011. № 5. С. 12–18.
42. Наполнители для полимерных материалов: Справочное пособие: Пер. с англ./ Под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1981. 736 с.
43. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1983. 248 с.
44. Кочергин Ю.С., Аскадский А.А., Салазкин С.Н. и др. Исследование ползучести линейных и сетчатых полимеров на основе полиарилатов и эпоксидных полимеров // Высокомолек. соед. А, 1978. Т.20. № 4. С.880–887.
45. Белошенко В.А., Варюхин В.Н. Эффект памяти формы в полимерах и его применение. Киев: Наук. думка, 2005. 192 с.
46. Yang X.-L., Jorolan E., Shaw L., Gell M. Deformation of nanostructured ceramic coatings// Materials Science. 2003. Vol. 39. № 2. Pp. 305–306.
47. Basara C., Yilmazer U., Bayram C. Synthesis and Characterization of Epoxy Based Nano-composites // J. Polym. Sci: Part B: Polymer Physics. 2005. Vol. 43. Pp. 1081–1086.
48. Gall R., Dunn M.L., Liu Y. Internal stress storage in shape memory polymers nanocomposites // Appl. Phys. Lett. 2004. V.85. № 2. Pp. 290–292.
49. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. Казань: ПИК «Дом печати». 2004. 446 с.

**Kochergin Yu.S., Zolotareva V.V., Grigorenko T.I.**

### **INFLUENCE OF THE NANO-POWDER OF ALUMINUM OXIDE ON THE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS**

*Presents research results of the influence of nanopowder aluminum oxide on complex mechanical, tribological and thermal properties of epoxy polymers. It is established that the introduction of nanopowder contributes to a significant increase in tensile strength and compressive strength, elastic modulus and strain at break of epoxy polymers.*

**Keywords:** nanopowder, aluminum oxide, epoxy polymer, physico-mechanical, tribological, adhesive properties.

**Кочергин Юрий Сергеевич**, доктор технических наук профессор,  
Адрес: 86114, г. Макеевка, Донецкой обл., д. 80, кв. 189  
E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua

**Золотарева Виктория Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров  
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского  
Адрес: 83117, г. Донецк, ул. Щорса, 31  
E-mail: viktoria802@gmail.com

**Григоренко Татьяна Ильинична**, кандидат технических наук.  
Адрес: 83059, г. Донецк, пр. Ильича, 97  
E-mail: grigorenco2013@mail.ru

## ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВУАР С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

[panchenko.bstu@mail.ru](mailto:panchenko.bstu@mail.ru)

В статье рассмотрено проектирование железобетонного резервуара с дополнительным дисперсным армированием стекловолокнами по предельному состоянию второй группы. В случае круговой цилиндрической оболочки при осесимметричном нагружении в расчете учитывается четыре внутренних усилия (два изгибающих момента, поперечная и кольцевая силы). При условии симметрии из шести уравнений равновесия в расчете остается два. Использован шаговый метод в конечно-элементной интерпретации. В качестве примера рассмотрен железобетонный цилиндрический резервуар с переменным дисперсным армированием, к которому приложена гидростатическая нагрузка от жидкости. Для описания дисперсного армирования в отношении модуля продольной упругости использована единичная функция Хевисайда. По найденным значениям усилий определяется дисперсное и дискретное армирование.

**Ключевые слова:** железобетонный резервуар, дисперсное армирование, стекловолокно, шаговый метод, метод конечных элементов, упругое основание.

**Введение.** Цилиндрические резервуары на протяжении ряда лет являются объектом глубокого научного исследования [1–7]. При использовании железобетона актуальной проблемой является ограничение трещинообразования. Помимо уменьшения жесткости конструкции, возникает опасность коррозии арматуры. При наличии же сквозных трещин происходит утечка содержимого из резервуара.

В тонкостенных конструкциях эффективным вариантом является сочетание стальной арматуры с короткими волокнами или сеткой из стекловолокна. Арматура воспринимает большую часть как растягивающих, так и изгибающих усилий, а массив стекловолокна (или сетки)

$$I = \frac{1}{2} \vec{q}^T K_1 \vec{q} + \frac{1}{2} \vec{q}^T K_2 \vec{q} - \vec{q}^T \vec{F} + \frac{1}{2} \vec{w}^T K_3 \vec{w},$$

где  $\vec{F}$  – вектор узловой силы;  $\vec{q}$  и  $\vec{w}$  – векторы узловых перемещений конструкции резервуара и основания соответственно;  $K_1$  и  $K_2$  – матрицы жесткости оболочки и днища соответственно;  $K_3$  – матрица жесткости основания.

В случае круговой цилиндрической оболочки при осесимметричном нагружении возникают четыре внутренних усилия: изгибающий момент  $M_1$  (ему соответствует нормальное напряжение  $\sigma_x$ ), поперечная сила (ей соответствует касательное напряжение  $\tau$ ), кольцевое усилие и изгибающий момент  $M_2$  в перпендикулярной плоскости (им соответствует нормальное напряжение  $\sigma_y$ ). В связи с этим элемент оболочки может быть получен простой комбинацией

у поверхности создает дополнительное противостояние изгибным напряжениям и препятствует раскрытию трещин.

**Основная часть.** Рассмотрим проектирование железобетонного резервуара с дополнительным дисперсным армированием стекловолокнами по предельному состоянию второй группы. Круглое днище резервуара опирается на упругий грунтовый массив.

Потенциальная энергия системы в этом случае складывается из потенциальной энергии собственно конструкции и потенциальной энергии упругого основания.

Функционал Лагранжа в случае винклеровского основания в конечно-элементном представлении имеет вид:

элементов для плоского напряженного состояния и изгиба пластины.

С точки зрения упрощения решения используем для расчета оболочки нулевой кривизны плоские элементы. Учет геометрических особенностей оболочки обеспечивается рассмотрением вписанного многогранника.

При назначении расчетной схемы оболочки необходимо, чтобы плоские конечные элементы вписывались в геометрию оболочки. Для развертывающихся на плоскость поверхностей, какой является поверхность цилиндра, можно использовать прямоугольные конечные элементы.

Матрица жесткости прямоугольного плоского элемента оболочки получается простым совмещением матриц жесткости прямоугольных элементов плоского напряженного состояния (с

множителем  $\frac{Eh}{(1-\nu^2)}$ , где  $h$  – толщина оболочки,  $E$  и  $\nu$  – модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона соответственно) и пластиинки (с множителем  $\frac{Eh^3}{12ab(1-\nu^2)}$ , где  $a$  и  $b$  – размеры конечного элемента) [8].

В теории и на практике встречаются процессы и состояния, при описании которых используют величины, имеющие разрывы. Для их

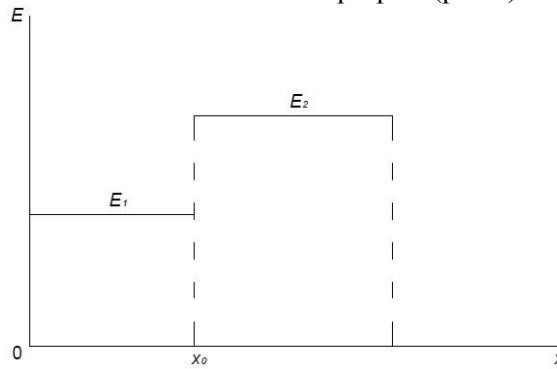


Рис. 1. Ступенчато-переменная функция модуля упругости

При использовании функции Хевисайда функция  $E(x)$  получает следующий вид:

$$E(x) = E_1[1 - \Omega_0(x - x_0)] + E_2\Omega_0(x - x_0) = E_1 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{E_2}{E_1} \right) \Omega_0(x - x_0) \right]. \quad (2)$$

Когда имеем несколько разрывов, зависимость (2) принимает следующий вид:

$$E(x) = E_1 \left[ 1 - \sum_{i=2}^s \left( 1 - \frac{E_i}{E_{i-1}} \right) \Omega_0(x - x_i) \right], \quad (3)$$

где  $E_i$  – модуль на  $i$ -м участке, то есть на участке  $[x_{i-1}, x_i]$ , при этом  $x_0 = 0$ . Статическую симметрию резервуара обеспечивает, например, гидростатическая нагрузка:

$$p = \gamma(H - x), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – объемный вес жидкости,  $H$  – высота резервуара,  $x$  – соответствующая ей координата, отсчитываемая от днища.

При условии симметрии из шести уравнений равновесия три удовлетворяются тождественно. Одно из оставшихся уравнений показывает, что продольные силы вдоль оси  $x$  постоянны. Ввиду их малости по сравнению с другими внутренними усилиями ими обычно пренебрегают.

Оставшиеся два уравнения синтезируются в виде:

$$\frac{d^2M}{dx^2} - \frac{N}{R} = -p, \quad (5)$$

или

$$D \frac{d^4w}{dx^4} - Eh \frac{w}{R^2} = p, \quad (6)$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость оболочки.

описания можно применить единичную функцию Хевисайда:

$$\Omega_0(x - x_0) = \begin{cases} 1, & x < x_0; \\ 0, & x > x_0, \end{cases} \quad (1)$$

которую называют импульсивной функцией нулевого порядка.

Остановимся на случае, когда модуль продольной упругости конструкции оболочки терпит разрыв (рис.1).

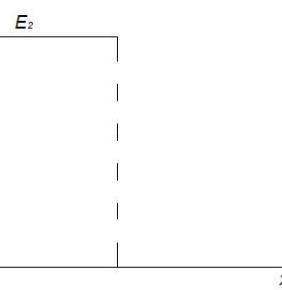


Рис. 1. Ступенчато-переменная функция модуля упругости

Уравнение (6) по форме совпадает с уравнением балки на упругом основании и имеет аналитическое решение [9].

Изгибающий момент  $M_2$  вычисляем по формуле [10]:

$$M_2 = \nu M_1. \quad (7)$$

Расчет резервуара с симметричной нагрузкой усложняется при оптимизации его конструктивного решения за счет переменного дискретного и дисперсного армирования. Как было сказано, последнее вводится для усиления противостояния трещинообразованию, интенсивность которого нарастает в направлении днища.

С точки зрения технологии производства работ целесообразно интенсивность дисперсного армирования наращивать в этом направлении от одного участка оболочки к другому. При этом наблюдается ступенчато-переменное изменение механических характеристик фибробетона. Задача становится нелинейной.

Используем шаговый метод в конечно-элементной интерпретации [11]. Шаг наполнения жидкостью составляет  $n$  метров по высоте оболочки. На первом шаге принимаем минимальные

проценты дискретного и дисперсного армирования, причем последнее осуществляется лишь в нижней трети резервуара. Определяем упомянутые внутренние усилия  $M_1$ ,  $Q$ ,  $N$ ,  $M_2$  и напряжения:  $\sigma_x$ ,  $\tau$  и  $\sigma_y$ . Находим также главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

$$\begin{aligned}\sigma_x &\leq R_s; \quad \sigma_y \leq R_s; \\ \sigma_y &\leq R_{fbt}; \quad |\sigma_y| \leq R_{fb}.\end{aligned}\quad (8)$$

В случае неудовлетворения неравенств, то есть образования трещин, необходимо увеличивать процент дискретного и (или) дисперсного армирования.

На втором шаге в нагрузку включается следующий слой жидкости. Армирование подлежит пересмотру с учетом соотношений левых и правых частей неравенств (8). При значительном превосходстве правых частей оно может быть оставлено неизменным.

Число шагов  $m = \frac{H}{n}$ . На последнем шаге производится корректировка армирования в меньшую сторону, если правые части неравенств значительно превосходят левые части.

Для резервуаров с идентичными размерами, отличающихся по дискретному и дисперсному

Принимая во внимание расчетные сопротивления стержневой или проволочной арматуры сжатию ( $R_{sc}$ ) и растяжению ( $R_s$ ) [12], а также такого же рода сопротивления фибробетона  $R_{fb}$  и  $R_{fbt}$  [13, 14], проверяем условие прочности для арматуры и крайних волокон фибробетона:

$$\begin{aligned}\sigma_x &\leq R_{fbt}; \quad |\sigma_x| \leq R_{fb}, \\ \sigma_1 &\leq R_{fbt}; \quad |\sigma_2| \leq R_{fb}.\end{aligned}\quad (8)$$

армированию, в качестве оптимальной выбирается система с минимумом потенциальной энергии [15].

В качестве примера рассмотрим железобетонный цилиндрический резервуар (рис. 2) из бетона класса В20 с переменным дисперсным армированием, к которому приложена гидростатическая нагрузка  $p$  от жидкости с объемным весом  $\gamma = 10 \text{ кН}/\text{м}^3$ . Стенки резервуара толщиной 10 см имеют трехступенчатую структуру из фибробетона с нарастающим к основанию модулем деформации. Коэффициент Пуассона отличается при этом незначительно и принят единым и равным 0,2. Под днищем предполагается скалистое основание.

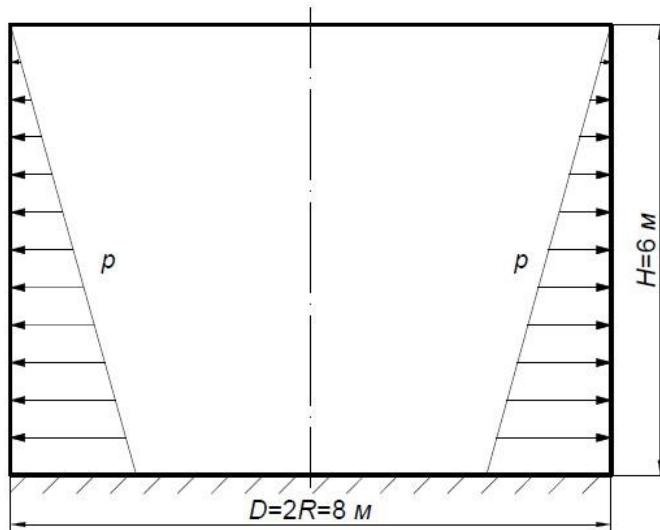


Рис. 2. Цилиндрический резервуар, подверженный гидростатическому давлению

Для расчета шаговым методом использован вычислительный комплекс ЛИРА [11]. Гидростатическая нагрузка разделена на 10 шагов. В табл.1 представлены внутренние усилия на последнем шаге. Использован конечный элемент с размерами  $20 \times 70 \times 10$  см.

Как следует из таблицы, для восприятия растягивающих усилий необходима установка стальной арматуры (класса А400) в продольном направлении в зоне, примыкающей к наружной поверхности ( $0 < x < 1$  м), в зоне, примыкающей к

внутренней поверхности ( $1 \text{ м} < x < 2 \text{ м}$ ) и в кольцевом направлении с процентом армирования 0,1 %.

Кроме того, осуществляется дисперсное армирование стекловолокном  $d=15$  мкм: при  $0 < x \leq 2$  м  $l = 50$  мм, процент армирования 4,5 % ( $l$  – длина волокна,  $d$  – диаметр волокна); при  $2 < x \leq 4$  м  $l = 35$  мм, процент армирования 3 %; при  $4 < x \leq 6$  м  $l = 20$  мм, процент армирования 3 %.

Таблица 1

## Внутренние усилия в стенке цилиндрического резервуара

$x, \text{ см}$	$M_1, \text{ кН}\cdot\text{см}/\text{см}$	$Q, \text{ кН}/\text{см}$	$N, \text{ кН}/\text{см}$	$M_1, \text{ кН}\cdot\text{см}/\text{см}$
0	-6,47	0,278	0	1,03
100	1,12	-0,03	2,12	0,179
200	0,03	-0,002	1,65	0,005
300	-0,01	0	1,20	0,0016
400	0,002	0	0,08	0
500	0	0	0,04	0
600	0	0	0	0

Расчет круглых плит на упругом основании, моделирующих днища цилиндрических резервуаров, подробно рассмотрен в книге [3].

**Выводы.** Представленный автоматизированный алгоритм расчета железобетонного цилиндрического резервуара с дополнительным дисперсным армированием дает возможность оптимизировать проценты дискретного и дисперсного армирования шаговым методом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лурье А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек. М.-Л.: Гостехиздат. 1947. 252 с.

2. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз. 1962. 432 с.

3. Овчинин А.М. Расчет железобетонных круглых резервуаров. М.: Стройиздат, 1950. 240с.

4. Mishra P.K., Dey S.S. Discrete energy method for the analysis of cylindrical shells // Comput. and Struct. 1987. 27. № 6. Р. 753–762.

5. Axelrad E.L., Emmerling F.A. On variational principles and consistency of elasticity relations of thin shells // Int. J. Non-Linear Mech. 1990. Vol. 25. № 1. Р. 27–44.

6. Gao Yang, Cheung Y.K. On the extremum complementary energy principles for nonlinear elastic shells // Int. J. Solids and Struct. 1990. Vol. 26. № 5-6. Р. 683–693.

7. Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Белоусов А.П., Пушкин С.А. Обследование

железобетонного резервуара для хранения чистой воды // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 47–51.

8. Городецкий А.С., Заворицкий В.И., Лантух-Лященко А.И., Рассказов А.О. Метод конечных элементов при проектировании транспортных сооружений. М.: Изд-во «Транспорт», 1981. 143с.

9. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. М.: Высшая школа, 1972. 296с.

10. Рекач В.Г. Статический расчет тонкостенных пространственных конструкций. М.: Стройиздат, 1975. 256с.

11. Городецкий А.С. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций: Справочно-теоретическое пособие. М.: 2003. 464с.

12. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М.: ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП, 2004. 58 с.

13. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций (ВСН 56-97). М.: НТУ НИЦ «Строительство», 1997. 91 с.

14. Панченко Л.А. Строительные конструкции с волокнистыми композитами. Белгород: БГТУ. 2013. 184 с.

15. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 90 с.

Panchenko L.A., Shevchenko A.V.

## REINFORCED CONCRETE CYLINDRICAL RESERVOIR WITH ADDITIONAL DISPERSED REINFORCEMENT

The article describes the design of a reinforced concrete reservoir with additional dispersed reinforcement fibers at the limit state of the second group. In the case of a circular cylindrical shell under axisymmetric loading in calculating the four internal forces (two bending moment, transverse and circumferential forces). Assuming symmetry of the six equilibrium equations in the calculation is two. Used step method to finite-element interpretation. As example, consider a reinforced concrete cylindrical reservoir with a variable dispersed reinforcement, which is applied to the hydrostatic load of the liquid. To describe the dispersed reinforcement in relation to the modulus of elasticity used in the single function of Heaviside. On the found values of the determined efforts of dispersed and discrete reinforcement.

**Keywords:** reinforced concrete reservoir, dispersed reinforcement, fiberglass, step method, finite element method, elastic foundation.

**Панченко Лариса Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и со- противления материалов.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: panchenko.bstu@mail.ru

**Шевченко Андрей Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хо- зяйства.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: andsheff@rambler.ru

Донченко О.М., канд. техн. наук, проф.,  
Дегтев И.А., канд. техн. наук, проф.,  
Тарасенко В.Н., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВАЖНЕЙШАЯ РОЛЬ РАСТВОРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В СОПРОТИВЛЕНИИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ СИЛОВОМУ СЖАТИЮ

vell.30@mail.ru

Приведено объяснение сложного деформативно-прочностного состояния раствора горизонтальных швов в каменной кладке при силовом сжатии. Показаны основные причины их резкой структурной неоднородности, вызывающей изгиб и снижение прочности камня на сжатие. Приведена аналитическая зависимость структурной неоднородности растворной постели от прочности раствора на сжатие и растяжение.

**Ключевые слова:** структурная неоднородность, эффективность работы камня в кладке, изгиб камня, напряженно-деформированное состояние.

**Введение.** Уже давно ученых, исследователей, строителей и проектировщиков интересует проблема неудовлетворительного использования высокой прочности на сжатие традиционного керамического и силикатного кирпича в каменной кладке, работающей в условиях силового сжатия. Общеизвестно, что даже в кладке, скимаемой на опорных гранях однородно-равномерным сжатием, прочность кирпича, определенная при центральном сжатии стандартного образца, используется всего лишь в пределах 25–35 % и только в исключительных случаях может достигать 55–60 %.

**Основная часть.** Объяснить это отрицательное явление только неудовлетворительным качеством кладки и непрофессиональностью каменщиков невозможно. Действительно, от профессионализма каменщика и тщательности его отношения к работе зависит многое, но только этим подобное явление объяснить не удается. Давно установлено, что прочность кладки при работе каменщика средней квалификации приводит к использованию прочности кирпича в кладке до 30–35 %, при высокой квалификации исполнителя – уже к 35–40 %, а при устройстве растворной постели под «рамку» – к использованию прочности кирпича на 40–45 %. Самая высокая относительная прочность кирпича (в пределах 55–60 %) достигается при виброрировании кладки, которую можно эффективно осуществить только в заводских условиях.

Еще менее существенное влияние на прочность кладки и, естественно, на эффективность использования прочности кирпича оказывает система перевязки швов. Экспериментально доказано, что снижение прочности кладки при центральном сжатии при 6-рядной (американской) и

4-рядной (проф. Л.И. Онищик) системах по сравнению с цепной находится в пределах, соответственно, 2–3 и 3–4 %. В таких же пределах находится и снижение прочности кладки при неудовлетворительном заполнении вертикальных швов раствором.

Следовательно, в недостаточно эффективном использовании кирпича даже при идеальном центральном сжатии кладки виноват строительный раствор горизонтальной постели. Получается, что растворная постель снижает прочность кладки. Пробовали испытывать на центральное сжатие кладку, сложенную насухо без раствора из высококачественного по размерам и параллельности граней кирпича. И, действительно, в этих опытах эффективность кирпича достигла 75–80 %. Но высокие продуваемость, промерзание и водопроницаемость такой кладки раз и навсегда установили необходимость устройства кладки на растворных швах для строительства гражданских зданий.

Путей решения и благополучного выхода из создавшегося положения два: либо прекратить поиски создания и производства кирпича высокой прочности, либо начать интенсивные исследования возможности улучшения воздействия горизонтальной растворной постели на трещиностойкость и сопротивление кирпича сжатию. Отечественные исследователи [1, 4, 5] в связи с необходимостью строительства огромных объемов жилья в большей мере пошли по пути первого направления и не стремились получать кирпич высокой прочности на сжатие. Поэтому в нормах России до сих пор фигурирует, как максимум, кирпич марки М 300, в то время, как за рубежом, в Западной Европе и США для строительства производят высокопрочный кирпич ма-

рок М 600–700 и даже 800. Там повышение прочности кладки ищут не в улучшении свойств растворной постели, а в абсолютном увеличении прочности раствора, и переходят от традиционных (цементных) растворов на полимерцементные марок М 300–400, что естественно обходится весьма затратно.

Поэтому в течение длительного времени в России и странах СНГ не прекращаются исследования [2–4, 6–8] напряженно-деформированного состояния (НДС) растворной постели на всех стадиях работы кладки – от ее создания и до исчерпания сопротивления при силовом сжатии. В результате этих исследований установлены следующие общие и уже не дискуссионные внешние и внутренние отличительные особенности структуры раствора горизонтальной постели:

- резкая структурная неоднородность по всей плоскости кирпича;
- отсутствие на некоторых значительных участках кирпича тесного соприкосновения с раствором и соответственно нужного контакта;
- сцепления и адгезии;
- наличие на некоторых значительных участках кирпича в контактной поверхности раствора явно наблюдаемых протяженных пустот.

Действительно, проведенные исследования свидетельствуют, что по длине растворной постели даже в пределах одного кирпича плотность раствора изменяется в очень широких пределах – от обычных в 1,5 до 2,0 – 2,25 раз. Естественно, что также должна изменяться и величина начального модуля деформаций  $E$  этих участков раствора, а, следовательно, и жесткость, деформация и отпор растворного основания под отдельными участками площади кирпича, что должно вызывать возможность его изгиба в кладке, нагруженной силовым сжатием.

О таком возможном и, скорее всего, обязательном изгибе кирпича свидетельствуют значительные участки отсутствия его контакта с раствором и протяженные пустоты последнего по площади. По данным различных исследователей опирание кирпича на растворную постель обычно не превышает и 30–35 % его площади.

Проведенные в последние 35 лет объемные исследования сопротивления кладки из керамического и силикатного кирпича прочностью М100–250 на различных видах раствора на центральное и внецентрное сжатие под руководством авторов [2–4, 6, 7] убедительно свидетельствуют о реальном изгибе кирпича перед появлением в нем мелких трещин, развивающихся в дальнейшем в магистральные и разделяющие кладку на отдельные вертикальные ветви вплоть до исчерпания ее сопротивления.

Что же приводит обычно достаточно качественный и хороший традиционный строительный раствор в такое неудовлетворительное неоднородно-структурное состояние? По мнению большинства исследователей – это постоянная значительная структурная деформативно-прочностная неоднородность раствора горизонтальной постели. И если для растворов не высокой прочности, типа известковых или смешанных со значительным количеством глины и извести, она не столь существенна, то для смешанных растворов с малым количеством глины и извести, но с большим количеством цемента, она становится преобладающей. И, естественно, максимальная неоднородность присуща всем чисто цементным растворам.

Обычно в научно-технической литературе утверждается, что подобная значительная структурная деформативно-прочностная неоднородность горизонтальной растворной постели в каменной кладке вызывается:

- существенной неоднородностью неудовлетворительного перемешивания строительного раствора;
- негоризонтальностью укладки смежных по высоте рядов кирпича и различием в связи с этим высоты горизонтальных швов по длине кирпича;
- недостаточной параллельностью граней кирпича;
- наличием под и над кирпичом вертикальных растворных швов;
- различной степенью прижатия и уплотнения раствора вследствие укладки кирпича методами «вприжим» и «вприсык»;
- различной и высокой степенью отсоса влаги из раствора сухим кирпичом.

По нашему мнению, некоторые из вышеперечисленных факторов являются сопутствующими, а главная причина заключается в значительной инфильтрации воды из не набравшего прочность раннего раствора сухим кирпичом. Обычно хорошие каменщики – профессионалы перед укладкой кирпича на стену держали кирпич в ведре с водой, что делало кладку качественной или перед укладкой смачивали грани кирпича влажной тканью, уверяя, что только обесцвечивают его, но на самом деле, тем самым уменьшили инфильтрацию влаги из раствора. И во многом были правы!

Общеизвестно, что твердение и изменение прочности строительных растворов во времени происходит в результате сложных физико-химических процессов взаимодействия вяжущих веществ с водой. В процессе твердения цемента и его составляющих происходит гидролиз (разло-

жение водой) и гидратация клинкерных минералов, составляющих цемент. Наиболее полное объяснение процессов твердения цемента и раствора было дано акад. А.А. Байковым, развитым в трудах акад. П.А. Работнова.

По теории А.А. Байкова процесс твердения цемента проходит в три периода: подготовительный (растворения), схватывания (коллоидации) и твердения (кристаллизации).

В первый период вода вступает в химическую реакцию с поверхностными веществами раствора и этот период продолжается, пока вода не превратится в насыщенный раствор. Во втором периоде твердые продукты этой реакции выделяются в виде мельчайших частиц, образуя коллоидный гель, представляющий студнеобразную массу из связанной воды и мельчайших кристаллов, обладающий склеивающей способностью. Третий период характерен интенсивным процессом кристаллизации и переходом части геля в кристаллический сросток, в основном и определяющий механическую прочность и деформативность твердеющего раствора.

Но прочность и деформативность раствора в кладке зависят не только от свойств вяжущего, его состава, температуры твердения и т.п., но, в первую очередь, и от абсорбционных свойств камня, определяющих ту или иную величину и скорость изменения водного баланса в растворе. В раннем возрасте раствора камень существенно отсасывает из него воду и совершенно искажает привычную картину химического процесса вышеприведенных периодов.

Абсорбционные свойства камня тоже зависят от его плотности, пористости и структуры; и даже для камня одного и того же вида весьма различны на отдельных его участках. Естественно, что такое различие абсорбционных свойств на отдельных участках камня приводит к различной прочности и деформативности твердеющего под ним раствора. В тоже время, количество воды, отсасываемой из раствора камнем, зависит от водоудерживающей способности раствора. Наиболее легко, как известно, отдают воду цементные растворы и растворы с малым содержанием извести или глины без водоудерживающих добавок. Быстро теряя воду и подвижность, цементные растворы не могут равномерно распределять её по объему постели шва, вследствие чего в ней создаются разные по плотности, прочности, жесткости и деформативности отдельные локальные участки.

Выше приведенные явления характерны для работы традиционных кладок с кирпичом и искусственными камнями на строительных растворах и убедительно свидетельствуют об изгибе

камня в центрально сжатой кладке и хорошо подтверждаются результатами многочисленных исследований, в том числе и проведенных авторами [2 – 6]. Изгиб кирпича вызывает его растяжение, прочность на которое у него на порядок меньше прочности на сжатие. Вот именно растяжение и снижает эффективность использования кирпича в кладке, работающей на сжатие.

Но этим растягивающие напряжения в кирпиче не ограничиваются. Общеизвестно, что за счет большой деформативности строительные растворы в центрально сжатой кладке растягивают кирпич в поперечных направлениях. И эти напряжения в действительности оказываются достаточно большими. Их следует устанавливать не при помощи обычного приема в виде соотношения начальных модулей деформации кирпича и раствора  $n=E_k/E'_p$ , а из действительного положения при исчерпании прочности кладки – из соотношения в виде:  $n=E_k/E'_p$ , где начальный модуль деформации кирпича сохраняет свое постоянное значение  $E_k=const$ , так как напряжения в этот момент не превышают и 70 % его прочности на сжатие и он практически деформируется линейно, а раствора  $E'_p$ , деформирующегося явно нелинейно – уменьшается в 5–10 раз с увеличением его коэффициента поперечных деформаций (Пуассона) в 2–3 раза, вплоть до 0,5 по сравнению с начальным значением в 0,15 – 0,20.

**Заключение.** Таким образом, находящийся в сложном пространственном напряженно-деформированном состоянии кирпич одновременно испытывает внецентрное сжатие, изгиб и растяжение. Именно наличие значительных растягивающих напряжений и приводит к существенному недоиспользованию в кладке высоких прочностных свойств кирпича. А раствор в горизонтальной постели, наоборот, работает в сложных условиях трехстороннего сжатия, что существенно повышает его прочность и снижает деформативность по сравнению с испытаниями в стандартных образцах.

И если физика этих явлений очевидна и хорошо понятна, то установление действительных значений НДС камня и раствора на всех стадиях работы кладки аналитическими зависимостями детерминированных законов практически невозможно, так как абсолютное большинство причин изгиба и растяжения камня в кладке имеет случайный (стохастический) характер, и они могут быть определены только вероятностными методами.

**Выводы.** Однако, уже сейчас на основании проведенных нами многочисленных экспериментов можно качественно установить, что большей неоднородностью обладают цементные растворы

высокой прочности. Что же касается ее количественной оценки, то она может быть отражена предложенной авторами эмпирической зависимостью:

$$\gamma = 1 + \pi^4 \sqrt{\frac{R_c \cdot R_p}{E_p}},$$

где  $R_c$  и  $R_p$  – прочности кирпича на сжатие и растяжение соответственно, установленные в стандартных образцах.

По этой зависимости неравномерность модуля деформаций раствора  $\gamma$  марки М 10 равняется 1,5, а марки М 200 – достигает 2,15, что хорошо подтверждается в экспериментах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотин В.В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. 351 с.
2. Донченко О.М., Дегтев И.А. Эффективные строительно-технологические решения и материалы для массового гражданского строительства // В сб.: Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности. Сб. докладов и материалов Международной научно-практической конференции. Институт непрерывного образования, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства. 2011. С. 32–36.
3. Донченко О.М., Пащенко Ж.Н. Современное состояние теории сопротивления и методов расчета кладки из искусственных камней // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 19–21.
4. Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н. Прочность и деформативность каменной кладки при силовом сжатии. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 138 с.
5. Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. М.: ОНТИ, 1937. 291 с.
6. Поляков С.В. Длительное сжатие кирпичной кладки. М.: Госстройиздат, 1959. 183 с.
7. Донченко О.М., Дегтев И.А. Деформации каменной кладки при центральном кратковременном сжатии // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 44–46.
8. Донченко О.М., Дегтев И.А., Ежченко Д.А., Кривчиков А.Н., Сердюкова А.А., Алешин Ю.И. Исследование прочности нормального сцепления по неперевязанному сечению кладки из бетонных и керамзитобетонных камней СКЦ // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 77–80.
9. Дегтев И.А., Донченко О.М., Тарасенко В.Н. Разработка целесообразных технологических приемов изготовления каменных конструкций // В сб.: Наукоемкие технологии и инновации. Сб. докл. Международной научно-практической конференции. 2016. С. 2–25.

**Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N.**

## THE CRUCIAL ROLE OF THE MORTAR COMPONENT IN THE RESISTANCE OF THE MASONRY COMPRESSION FORCE

*Given the results of the hard deformation-stress condition of the mortar of the horizontal joints in the masonry in the force compression. Shows the main causes of their dramatic structural heterogeneity, causing bending and reduce the strength of rock in compression. The analytical dependence of the structural heterogeneity of the mortar bed from the strength of the solution for compression and tension.*

**Keywords:** structural heterogeneity, the efficiency of the stone in the masonry, stone bending, stress-strain state.

**Донченко Олег Михайлович**, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дегтев Илья Алексеевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры архитектурных конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: konstrarh@mail.ru

**Тарасенко Виктория Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: vell.30@mail.ru

Шешенин С.В., д-р физ.-мат. наук, проф.  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Закалиюкина И.М., ассистент

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ МАКСВЕЛЛА\*

**sheshenin@mech.math.msu.su**

*Резиновые и резинокордные элементы конструкций выделяют тепло, проявляя тем самым вязкоупругие свойства. Точность вычисления тепловыделения зависит от погрешности аппроксимации функции релаксации. Поскольку тепло выделяется при периодическом процессе изменения напряженно-деформированного состояния, то функцию релаксации желательно определять в эксперименте, воспроизводящем циклическое деформирование. Хорошо известна методика, позволяющая определять основные параметры функции релаксации, заданной в виде линейной комбинации экспонент, с помощью гармонического деформирования. Статический опыт на релаксацию позволяет определить дополнительно длительный модуль. В работе сравниваются обе методики на основе проведенных экспериментов.*

**Ключевые слова:** резинокорд, линейная вязкоупругость, модель Максвелла, качение, пневматическая шина, тепловыделение.

**Введение.** В данной работе сравниваются эти два способа определения параметров линейной модели вязкоупругости на основе экспериментов, проведенных с пластинами из резины, работающей в состоянии растяжения. Приводится сравнение определяемых по этим методикам значений времен релаксации, существенно влияющих на выделяемое тепло.

Прежде всего, следует выбрать аппроксимацию функции релаксации. Как отмечено в [4, 5], было предложено множество вариантов функций аппроксимаций и проводились их сравнения. Ниже показывается, что для вычисления выделяемой энергии эффективным является приближение функции релаксации суммой всего нескольких экспонент. Эта модель может учитывать физическую нелинейность [3, 6, 7].

**Механическая модель.** Будем считать, что деформированное состояние шины является суммой состояния, возникающего за счет внутреннего давления, и осцилляционных добавок за

$$\sigma^\Delta(t) = \int_0^t \mathbf{R}(t-\tau, \mathbf{E}^{\text{infl}}) : d\boldsymbol{\varepsilon}^\Delta(\tau), \quad \boldsymbol{\sigma}^\Delta = (\mathbf{F}^{\text{infl}}) \cdot J \mathbf{S}^\Delta \cdot (\mathbf{F}^{\text{infl}})^T, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^\Delta = 1/2 (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad \mathbf{u} = \mathbf{R} - \mathbf{R}^{\text{infl}} \quad (2)$$

$\mathbf{F}^{\text{infl}}$  – градиент деформации в состоянии, возникающем за счет внутреннего давления,  $J$  – якобиан преобразования. В соотношении (2) фактически речь идет об определяющем соотношении между касательным напряжением и сдвиговой деформацией  $\sigma_{\alpha\beta}^\Delta(t) = \int_0^t R(t-\tau, \mathbf{E}^{\text{infl}}) : d\varepsilon_{\alpha\beta}^\Delta(\tau)$ .

Шаровые части напряжений и деформаций либо связаны линейно, либо материал считается несжимаемым [4].

счет качения. В первом приближении тензор деформаций  $\mathbf{E}$  (Лагранжа–Грина) представляется суммой  $\mathbf{E} = \mathbf{E}^{\text{infl}} + \mathbf{E}^\Delta$ , где  $\mathbf{E}^\Delta$  – добавка, описывающая осцилляции деформаций. Тензор напряжений  $\mathbf{S}$  (Пиолы–Кирхгофа) представляется в виде  $\mathbf{S}(\mathbf{E}^{\text{infl}} + \mathbf{E}^\Delta) \approx \mathbf{S}(\mathbf{E}^{\text{infl}}) + \mathbf{S}^\Delta$ , где  $\mathbf{S}(\mathbf{E}^{\text{infl}})$  есть напряжение от внутреннего давления, а  $\mathbf{S}^\Delta$  – отклонение за счет осцилляций.

Осцилляционная добавка является дифференциалом оператора  $\mathbf{S}(\mathbf{E})$  и, следовательно, линейно зависит от  $\mathbf{E}^\Delta$ . Поэтому  $\mathbf{S}^\Delta$  представляется согласно линейной теории вязкоупругости

$$\mathbf{S}^\Delta(t) = \int_0^t \mathbf{R}(t-\tau, \mathbf{E}^{\text{infl}}) : d\mathbf{E}^\Delta(\tau) \quad (1)$$

Здесь подчеркнуто, что  $\mathbf{R}$ , вообще говоря, зависит от стационарного деформированного состояния  $\mathbf{E}^{\text{infl}}$ . Определяющее соотношение (1) записано в начальной области. В актуальной области оно определяет связь

$$\mathbf{D}^\Delta(t) = \int_0^t \mathbf{R}(t-\tau, \mathbf{E}^{\text{infl}}) : d\mathbf{E}^\Delta(\tau), \quad \mathbf{E}^\Delta = 1/2 (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad \mathbf{u} = \mathbf{R} - \mathbf{R}^{\text{infl}} \quad (2)$$

Для экспериментального определения функции релаксации проводились опыты с пластинами из брекерной резины размером  $200\text{мм} \times 80\text{мм} \times 2\text{мм}$ , которая используется для изготовления слоев брекера шин легковых автомобилей. Реализовалось одномерное напряженное состояние, поэтому далее будем иметь дело с определяющим соотношением

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau, \varepsilon^0) d\varepsilon(\tau) \quad (3)$$

Учёт зависимости  $R$  от начальной деформации  $\varepsilon^0$  будет обсуждаться в последующих статьях, поэтому пока будем записывать функцию релаксации просто  $R(t)$ .

Подчеркнем, что представление комбинацией экспонент обладает преимуществами. Во-первых, необходимая для вычисления выделяемой энергии точность приближения к экспериментальной кривой достигается уже при небольшом числе членов суммы экспонент. Поэтому, во-вторых, определяющее соотношение записывается в дифференциальной форме и решение краевой задачи линейной вязкоупругости вычислительно не многим сложнее решения задачи упругости [3].

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Будем оценивать точность аппроксимации  $R(t)$  в норме, которая суть работа деформации за цикл, соответствующей осцилляционной добавке

$$A(T) = \int_t^{t+T} \sigma(\tau) d\varepsilon(\tau), \quad (4)$$

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ , где  $T$  – период колебаний при качении шины, а  $\omega$  – частота. Итак, пусть

$$R(t) = c_0 + \sum_{n=1}^N c_n \exp\left(-\frac{t}{t_n}\right),$$

#### Погрешность вычисления работы

скорость (км/ч)	0.1	0.5	1	2	5	10	30	100
$\Delta A / A (\%)$	300	27	11	4.3	2	1.5	1.4	1.4

Из таблицы видно, что для практически важных скоростей движения легкового автомобиля добавление третьего члена несущественно изменяет вычисленное значение выделяемой энергии. Однако если у добавочного члена время релаксации меньше по сравнению с первыми двумя, то возникает существенная ошибка. Следовательно, вопрос о том, насколько точно статический опыт на релаксацию позволяет находить наименьшие времена релаксации, требует изучения.

**Осцилляционный опыт.** При деформировании в виде (6) максимальный вклад в выделяемую энергию дает член (5), для которого  $t_n \omega \approx 1$ . Это видно из выражения (7) для работы за период колебаний, соответствующей  $n$ -му члену (5)

$$\sigma(t) = \sum_{n=1}^N \sigma_n \sin(\omega t + \delta_n), \quad \sigma_n = \varepsilon_A c_n \frac{t_n \omega}{\sqrt{(t_n \omega)^2 + 1}}, \quad \cos \delta_n = \frac{t_n \omega}{\sqrt{(t_n \omega)^2 + 1}} \quad (8)$$

а производимая за цикл работа равна

$$c_0 = R(\infty), \quad c_n = (R(0) - R(\infty)) w_n, \quad \sum_{n=1}^N w_n = 1 \quad (5)$$

**Статический опыт.** В типичном статическом опыте на релаксацию деформация задается [4] в виде функции Хевисайда  $h(t)$ . Из приведенных в таблице 1 расчетов можно заключить, что для вычисления выделяемой энергии достаточно аппроксимации экспериментальной кривой релаксации небольшим числом членов представления (5). Работа  $A$  вычислялась для процесса деформирования вида

$$\varepsilon(t) = [\varepsilon_0 + \varepsilon_A \sin(\omega t)] h(t) \quad (6)$$

с частотой колебаний, соответствующей движению легкового автомобиля с различными скоростями движения автомобиля. Использовалась аппроксимация с двумя и тремя членами суммы (5). Именно, к двум членам суммы (5) был добавлен третий член со временем релаксации в 10 раз больше второго времени релаксации  $t_2$ . Первые два времени релаксации также отличались примерно на порядок. Весовой коэффициент поправочного третьего члена равен сумме весовых коэффициентов первых двух членов представления (5). В первой строке Таблицы 1 записаны скорости движения автомобиля, во второй – относительные разницы в энергии, выделяемой за цикл колебаний.

Таблица 1

$$A_n = \pi c_n \varepsilon_A^2 \frac{t_n \omega}{\left[(t_n \omega)^2 + 1\right]} \quad (7)$$

Поэтому для качения с частотой  $\omega$  желательно иметь в аппроксимации (5) член с  $t_n \approx 1/\omega$ . Поэтому для большой частоты требуется экспериментально находить малые времена релаксации. Для этого лучше приспособлена осцилляционная методика.

Осцилляционная методика определения параметров  $c_n, t_n$  состоит в следующем [2]. Осуществляется деформирование согласно (6). Осциллирующая составляющая напряжения равна

$$A(\omega) = \pi \varepsilon_A^2 \sum_{n=1}^N c_n \frac{t_n \omega}{\left[(t_n \omega)^2 + 1\right]} \quad (9)$$

Вычисляя по экспериментальным данным работу  $A(\omega)$  для разных частот  $\omega$ , можно получить значения параметров  $c_n$ ,  $t_n$ , приближая экспериментальную зависимость работы от частоты выражением (9).

Рассмотрим эксперимент, проведенный в НИИ Механики МГУ для частот  $\omega$  от 0.3 до 15 рад/сек. Результаты измерения времен релаксации показаны в таблице 2. В столбцах с третьего по пятый приведены времена релаксации, полученные: для верхней части указанного выше диапазона частот (третий столбец), для нижней части (четвертый столбец) и, наконец, для всего диапазона (последний столбец). Видно, что диапазон с низкими частотами приводит к обнаружению времен релаксации, близких к тем, что удается определить из статического опыта на релаксацию. Для получения меньших времен требуется использование более высоких частот.

Таблица 2

## Времена релаксации

времена релакса- ции	статический опыт	осцилляционные опыты		
		N=2	N=2	N=3
t1	—	0.038	—	0.050
t2	0.368	0.333	0.354	0.481
t3	3.533	—	3.6	4.030

**Выводы.** Таким образом, осцилляционная методика позволила определить наименьшее время релаксации, на порядок меньшее, чем минимальное значение, найденное в статическом опыте. Это позволяет использовать найденную аппроксимацию для больших частот колебаний. С другой стороны, статический опыт позволяет измерить длительный модуль и кривую релаксации на длительном временном отрезке. Совокупность опытов двух типов позволяет определить

Sheshenin S.V., Zakalyukina I.M

## STUDY PERFORMANCE SILICA BRICK, MANUFACTURED WITH ALUMINOSILICATE TECHNOGENIC RAW

*Rubber and rubber-cord structural elements produce heat, thus exhibiting viscoelastic properties. The accuracy in calculating the heat release depends on the error in the approximation of the relaxation function. Since heat is released during the periodic process of changing the stress/strain state, it is desirable to determine the relaxation function in an experiment reproducing cyclic deformation. A technique is well known that makes it possible to determine the basic parameters of the relaxation function, given in the form of a linear combination of exponentials, by means of harmonic deformation. A static relaxation test allows determining an additional long-term modulus. In the paper, both methods are compared on the basis of the experiments performed.*

**Keywords:** Rubber cord, linear viscoelasticity, Maxwell model, rolling, pneumatic tires, heat emission.

Шешенин Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор механико-математического факультета.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Адрес: Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, ГСП-1.

E-mail: sheshenin@mech.math.msu.su

Закалюкина Ирина Михайловна, ассистент.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Адрес: Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

все параметры, необходимые для решения задачи тепловыделения при стационарном и нестационарном качении пневматической шины.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-01-05887-а).

*Авторы выражают благодарность со-  
трудникам НИИ Механики МГУ П.В. Чистя-  
кову и Ю.П. Зезину за помощь в проведении экс-  
периментов.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. Мир. 1974. 339 с.
2. Baumgaertel M., Winter H.H. Determination of discrete relaxation and retardation time spectra from dynamic mechanical data // RheologicaActa. 28. 1989. Pp. 511–519.
3. Nasdala L., Kaliske M., Becker A., Rothert H. An efficient viscoelastic formulation for steady-state rolling structures // Computational Mechanics. 22. 1998. Pp. 395–403.
4. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М.: Наука, 1970. 281 с.
5. Адамов А.А., Матвеенко В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. УрО РАН. 2003. 412 с.
6. Ломакин Е.В., Белякова Т.А., Зезин Ю.П. Нелинейное вязкоупругое поведение наполненных эластомерных материалов // Известия Саратовского университета. 2008. Т.8. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып.3.
7. Белкин А.Е., Семенов В.К. Теоретический и экспериментальный анализ контакта массивной шины с беговым барабаном // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 3. С. 71–82.

*Старцева Л.В., канд. техн. наук, проф.,  
Валиева Э.Т., магистрант,  
Гарифуллин М.З., магистрант,  
Набиев И.И., магистрант,  
Шайхутдинов А.А., магистрант*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

*mgarifullin@list.ru*

Оболочковые конструкции из железобетона являются одними из самых изящных и, в то же время, экономичных архитектурных решений, но обладают огромным недостатком, а именно, сложностью расчётов при их проектировании. Сегодня, благодаря внедрению современных компьютерных технологий в процессы проектирования строительных конструкций, увеличилась скорость расчётов и их точность. Метод конечных элементов в совокупности с современными компьютерными технологиями создаёт возможности для моделирования и расчёта конструкций любой сложности. Для проверки корректности данного метода проведено сравнение результатов расчёта модели, полученной рассмотренным способом и аналогичной, возведённой средствами SCAD. В данной работе исследуется напряженно-деформированное состояние в зависимости от наличия различных факторов. Таковыми являются соотношение стрелы подъёма к пролету и толщины оболочки к ее радиусу. Ставится задача подбора пологой оболочки наиболее рациональной по геометрическим характеристикам. Кроме того, исследуется изменение прочностных и деформативных характеристик в зависимости от условий закрепления оболочки по торцам(шарнирное/жесткое). Исследование проводится при действиях постоянных и временных нагрузок и приводятся наиболее оптимальные варианты конструкции пологих оболочек.

**Ключевые слова:** Пологая оболочка, напряженно-деформированное состояние, поперечные силы, безмоментные и моментальные усилия, условия закрепления, ПК СКАД.

1) Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки с квадратным планом описывается следующей системой дифференциальных уравнений, имеющих вид: [3]

$$\frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 F - \nabla_k^2 W = 0 \quad (1)$$

$$D \nabla^2 \nabla^2 W + \nabla_k^2 F = q \quad (2)$$

где неизвестными являются функции напряжений  $F(x,y)$  и прогиба  $W(x,y)$ .

Решим задачу, принимая искомые функции в виде двойных тригонометрических рядов [1–2]

$$F = A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ W = B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3)$$

Для отыскания постоянных  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  воспользуемся методом Бубнова-Галеркина в

$$A_{mn} = \frac{R_{mn} \delta'_{mn}}{\delta_{mn} r_{mn} + \delta'_{mn} r'_{mn}}, \quad B_{mn} = \frac{R_{mn} \delta_{mn}}{\delta_{mn} r_{mn} + \delta'_{mn} r'_{mn}},$$

где

$$\delta_{mn} = \iint_{00}^{ab} \frac{1}{Eh} \left( \frac{\partial^4 F_{mn}}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F_{mn}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F_{mn}}{\partial y^4} \right) F_{mn} dx dy \quad (8)$$

$$\delta'_{mn} = \iint_{00}^{ab} \left( K_1 \frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial y^2} + K_2 \frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial x^2} \right) F_{mn} dx dy \quad (9)$$

форме, предложенной Власовым В.З., основанного на условии взаимной ортогональности двух функций

$$\iint_{00}^{ab} L_1 \times F_{mn} dx dy = 0 \quad (4)$$

$$\iint_{00}^{ab} L_2 \times W_{mn} dx dy = 0 \quad (5)$$

где  $L_1$  – первое уравнение, а  $L_2$  – второе уравнение системы (1, 2). Решение системы (4, 5) приводит к следующей системе пар уравнений, которые аналогичны каноническим уравнениям смешанного метода строительной механики

$$A_{mn} \delta_{mn} - B_{mn} \delta'_{mn} = 0 \quad (6)$$

$$A_{mn} r'_{mn} + B_{mn} r_{mn} = R_{mn} \quad (7)$$

Решая эту систему коэффициенты примут вид

$$r'_{mn} = \iint_{00}^{ab} (K_1 \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial y^2} + K_2 \frac{\partial^2 F_{mn}}{\partial x^2}) W_{mn} dx dy \quad (10)$$

$$R_{mn} = q \iint_{00}^{ab} \iint_{00}^{ab} W_{mn} dx dy / \iint_{00}^{ab} W_{mn}^2 dx dy \quad (11)$$

Зная  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  находим прогиб, усилия в за- данной системе.

Рассмотрим НДС оболочки с размерами

$$F = A_{11} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b};$$

Из выражений (6, 7) получим

$$B_{11} = \frac{16q}{\pi^2 \left( \frac{Eh}{R^2} + \frac{\pi^4 Eh^3}{3a^4} \right)};$$

$$A_{11} = \frac{Eha^2}{2\pi^2 R} B_{11};$$

Соответственно усилия при  $v = 0$  будут

$$M_1 = \frac{Eh^3 \pi^2}{12a^2} B_{11}$$

$$Q_1 = \frac{Eh^3 \pi^3}{4a^3} B_{11}$$

$$N_1 = -\frac{\pi^2}{a^2} A_{11}$$

Используя принятые численные данные получим

$$A_{11} = 673,2 q$$

$$B_{11} = 55510,3 q/E,$$

Соответственно:

$$W\left(\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right) = 55510,3 q/E,$$

$$M_1\left(\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right) = 0,317 q,$$

$$N_1\left(\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right) = -46,1 q.$$

$$a = b = 12 \text{ м}; f_0 = 0,6 \text{ м}; h = 0,1 \text{ м}; R = 60,15 \text{ м}.$$

Для решения данной задачи воспользуемся одним членом ряда в выражениях (3)

$$W = B_{11} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}; \quad \text{при } v = 0$$

На точность решения влияет взятое количество членов ряда. Увеличение числа членов в выражении  $F$  и  $W$  повышает сложность решения данной задачи, поэтому мы рассмотрели более простые решения при  $m = n = 1$ , чтобы иметь представление о работе пологой оболочки под нагрузкой  $q$ .

Далее при исследовании НДС оболочки в зависимости от различных факторов воспользуемся программным комплексом SCAD Office. [4]

Была составлена модель оболочки в виде коначных элементов [7]. Задача решалась с учетом изменения внешней нагрузки, условий закрепления (шарнирное и жесткое защемление), соотношения геометрических характеристик (стрелы подъема  $f$ , толщины оболочки  $\delta$ , радиуса и размеров оболочки  $a, b$ ).

В итоге полученные эпюры прогибов по центральным осям  $x, y$  и усилий  $N_1, N_2$ , а так же моментных усилий. Результаты исследований представлены на соответствующих рисунках 5-25.

Напряжения  $N_x, N_y, M_x, M_y, Q_x, Q_y$  ввиду симметрии оболочки получаются однозначными [8], характер усилий представлен на рисунках 1-20 в зависимости от соотношений  $\frac{f}{L}$  и изменения радиуса оболочки  $R$ . Все расчеты по ПК SCAD [6] производим для определенного соотношения  $\frac{f}{L}$  и  $R$ .

Прогибы  $w$  относительно оси Oz, мм

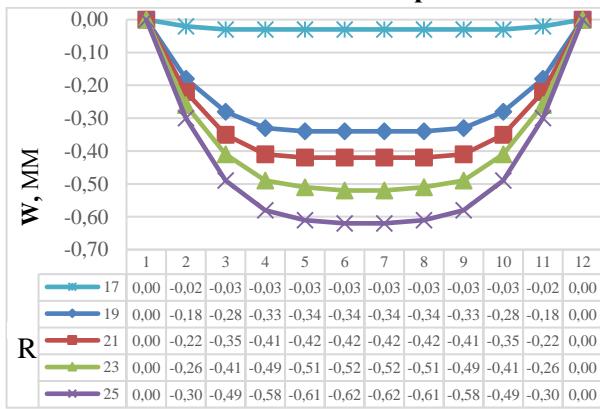


Рис. 1. Шарнирное закрепление в зависимости от  $R$

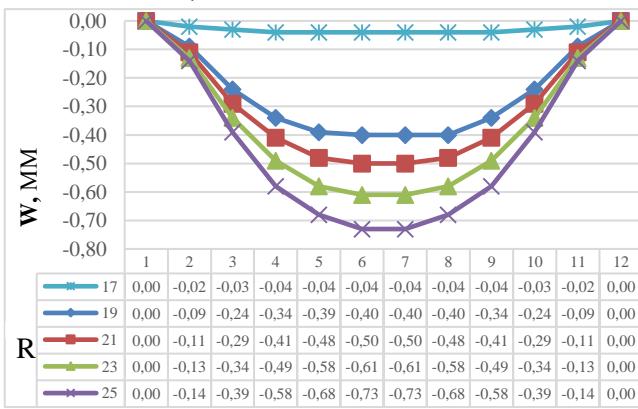
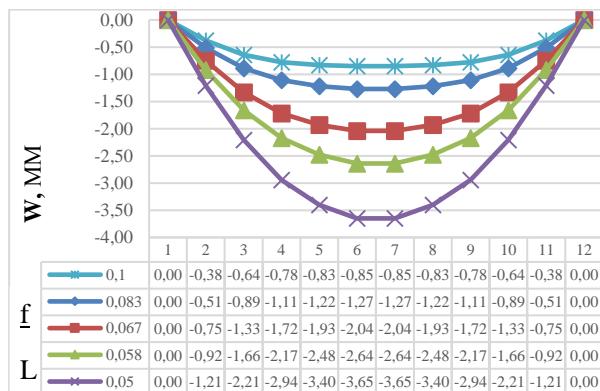
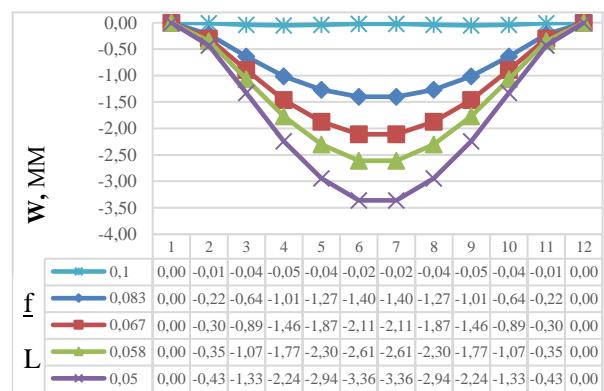


Рис. 2. Жесткое защемление в зависимости от  $R$

Рис. 3. Шарнирное закрепление в зависимости от  $\frac{f}{L}$ Рис. 4. Жесткое закрепление в зависимости от  $\frac{f}{L}$ 

### Прогибы w относительно оси Oz, мм

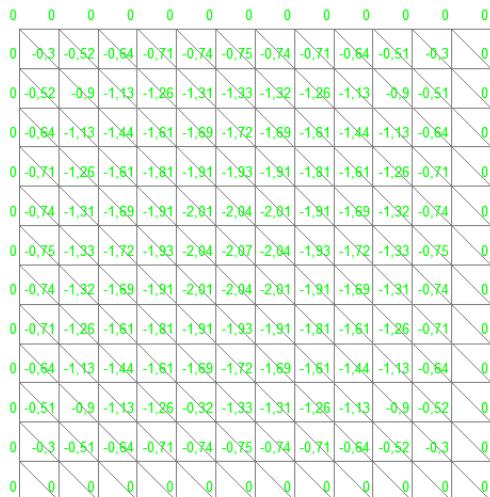
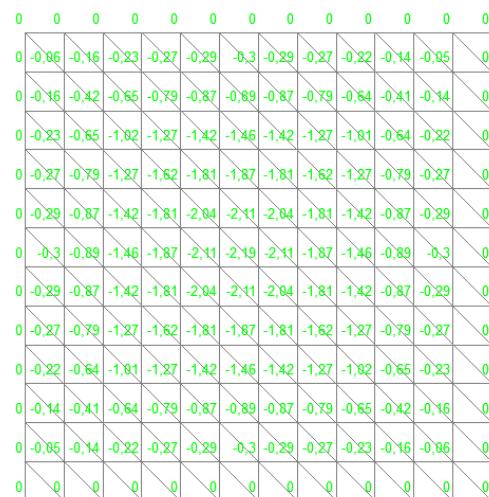
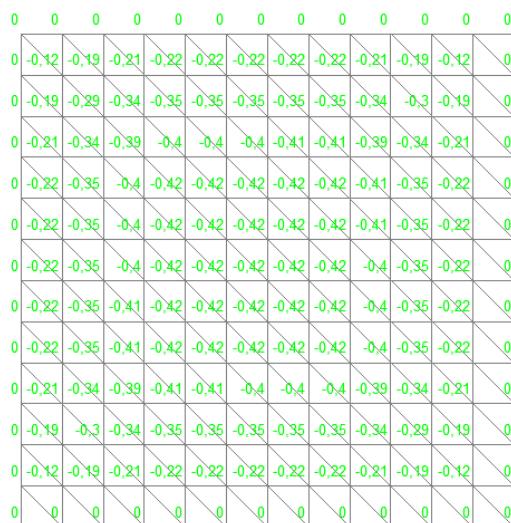
Рис. 5. Шарнирное закрепление при  $\frac{f}{L} = \frac{1}{15}$ Рис. 6. Жесткое закрепление при  $\frac{f}{L} = \frac{1}{15}$ 

Рис. 7. Шарнирное закрепление при R=21 м

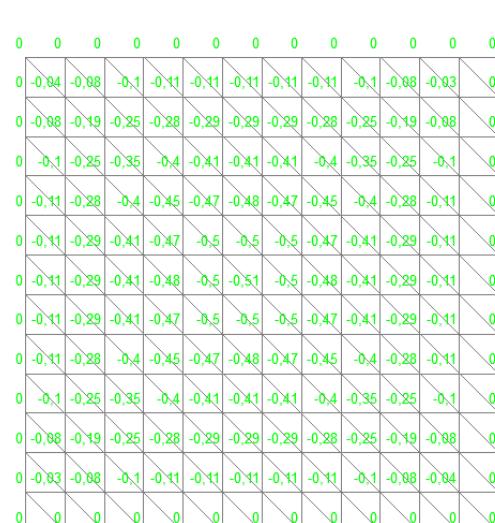
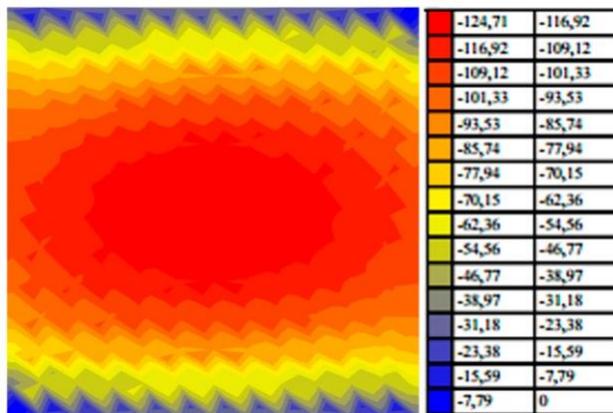
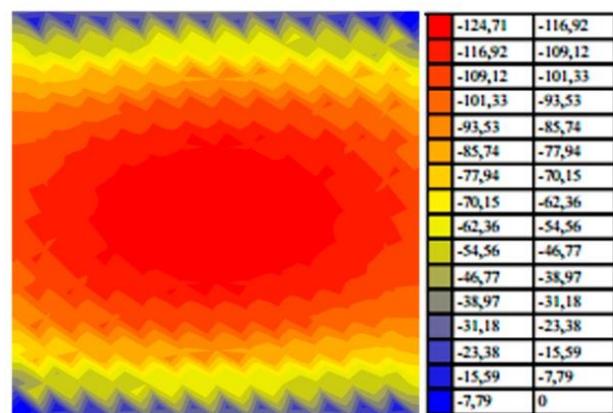
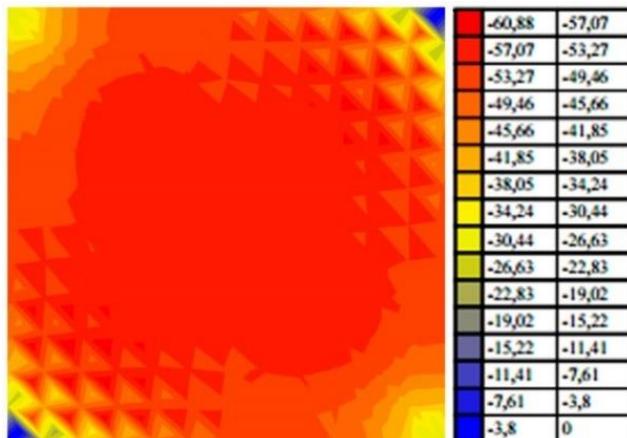
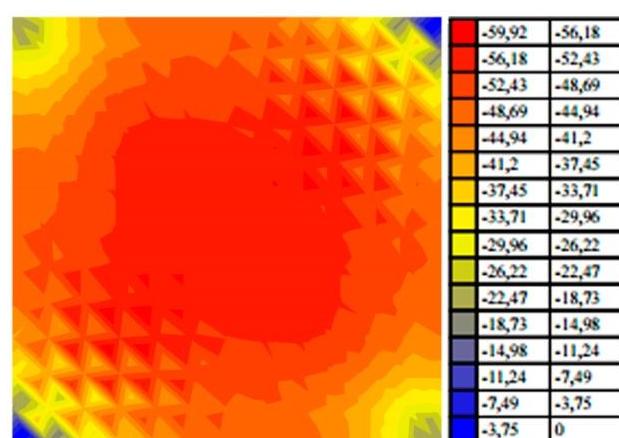
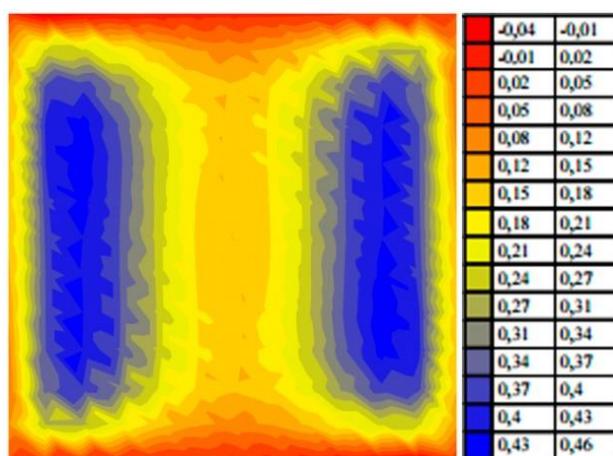
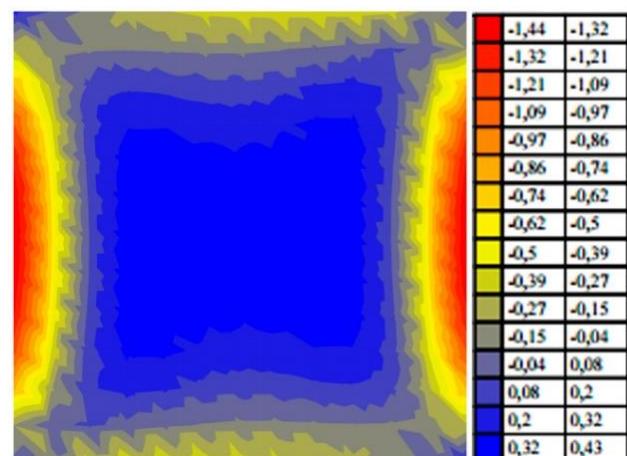


Рис.8. Жесткое закрепление при R=21 м

**Напряжения  $N_x, N_y$ , тс/м<sup>2</sup>**Рис. 9. Шарнирное закрепление при  $\frac{f}{L} = \frac{1}{15}$ Рис. 10. Жесткое закрепление при  $\frac{f}{L} = \frac{1}{15}$ Рис. 11. Шарнирное закрепление при  $R=21$  мРис. 12. Жесткое закрепление при  $R=21$  м**Напряжения  $M_x, M_y$ , тс/м<sup>2</sup>**Рис. 13. Шарнирное закрепление при  $\frac{f}{L} = \frac{1}{15}$ Рис. 14. Жесткое закрепление при  $\frac{f}{L} = \frac{1}{15}$

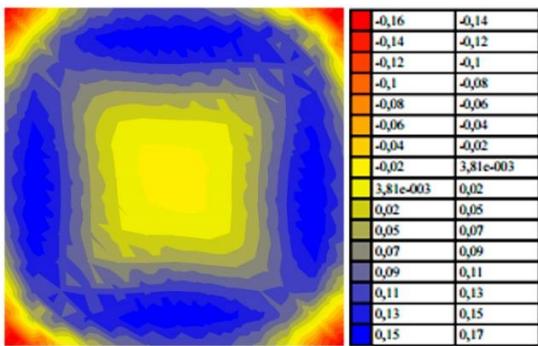


Рис. 15. Шарнирное закрепление при  $R=21$  м

Расчет на снеговую нагрузку сделан аналогично постоянной (снег справа) в различных ее вариантах рис. 17, характер прогибов, моментов, напряжений показан на рис. 18, 19, 20. Характер

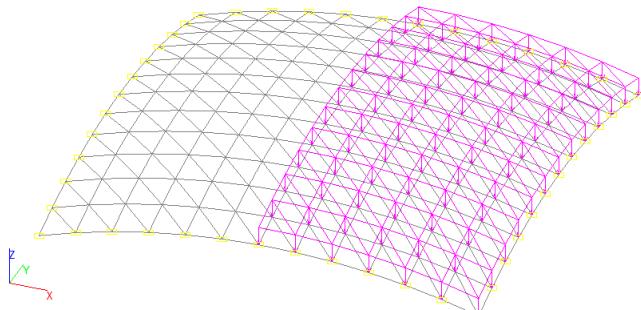


Рис. 17. Схема приложения снеговой нагрузки

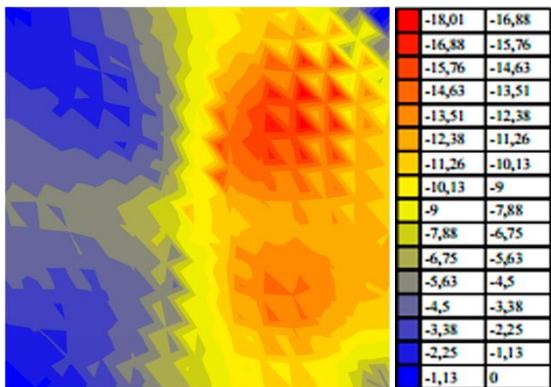


Рис. 19. Напряжения  $N_x, N_y$ , тс/м<sup>2</sup>

Анализируя полученные результаты ручного способа и с помощью ПК SCAD можно сделать вывод об их хорошей сходимости. Ручной способ несколько отличается от расчета на ПК SCAD так, как в расчетах был учтен только один член ряда, SCAD дает более точные результаты и так же показывает, что граничные условия влияют на характер полученных эпюр и их значения.

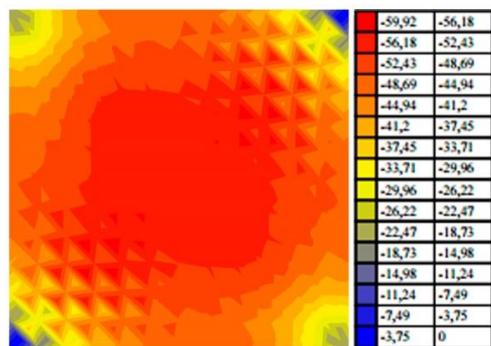


Рис. 16. Жесткое закрепление при  $R=21$  м

эпюр показан на наиболее невыгодное загружение оболочки от снеговой нагрузки [5].

Снеговая нагрузка (справа) для оболочки при  $R=21$  м (жесткое закрепление)

Рис. 18. Прогибы в относительно оси Oz, мм

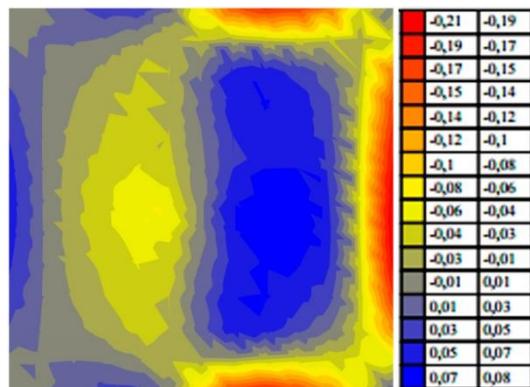


Рис. 20. Напряжения  $M_x, M_y$ , тс/м<sup>2</sup>

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Безухов Н.И., Лужин О.В. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1974. 200с.
  2. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение к технике. М.: Гостехиздат, 1949. 630 с.

3. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. Учеб. пособие для втузов. М.: Высш. школа, 1972. 296 с.
4. Старцева Л.В., Архипов В.Г., Семенов А.А. Строительная механика в примерах и задачах. Учебное издание. М.: Изд-во АСВ, 2013. 224 с.
5. Нагрузки и воздействия: СП 20.13330.2011 М.: Москва, 2011.
6. Семенов А.А., Габитов А.И. Проектно-вычислительный комплекс SCAD в учебном процессе. Статический счет. Учеб. пособие. М.: Издательство АСВ, 2005. 152 с.
7. Ржаницын А.Р. Пологие оболочки и волнистые настилы. Научное сообщение. Выпуск №14. М.: Госстройиздат, 1960. 128 с.
8. Рюле Г. Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения). В двух томах. Том I. Железобетон, армоцемент. Москва, Стройиздат. 1973. 304 с.

**Startseva L.V., Valieva E.T., Garifullin M.Z., Nabiiev I.I., Shaikhutdinov A.A.**

## INVESTIGATION OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE SHADOW SHELL AS A DEPENDENCE ON VARIOUS FACTORS

*Membraned structures made of reinforced concrete are among the most elegant and, at the same time, economical architectural solutions, but they have a huge drawback, namely, the complexity of the calculations when designing them. Today, thanks to the introduction of modern computer technologies in the design of building structures, the speed of calculations and their accuracy has increased. The finite element method in combination with modern computer technologies creates opportunities for modeling and calculation of structures of any complexity. To verify the correctness of this method, a comparison is made between the results of the calculation of the model obtained by the considered method and the analogous one, constructed by means of SCAD. In this paper, the stress-strain state is investigated depending on the presence of various factors. These are the ratio of the lifting arm to the span and the thickness of the shell to its radius. The problem of choosing a shallow shell is most rational in terms of geometric characteristics. In addition, the change in strength and deformation characteristics is investigated depending on the conditions for securing the shell along the ends (articulated / rigid). The study is carried out under the action of constant and temporary loads and the most optimal variants of the construction of shallow shells are given.*

**Keywords:** sloping shell, stress-strain state, transverse forces, momentless and instantaneous forces, fastening conditions, PC SCAD.

**Старцева Луиза Владимировна**, кандидат технических наук, профессор кафедры строительных конструкций. Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Адрес: Россия, 450062, г. Уфа, улица Менделеева, 195, корпус УГНТУ № 5.

E-mail: info@rusoil.net

**Валиева Элина Тахировна**, магистрант кафедры строительных конструкций.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Адрес: Россия, 450062, г. Уфа, улица Менделеева, 195, корпус УГНТУ № 5.

**Гарифуллин Марат Зуфарович**, магистрант кафедры строительных конструкций.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Адрес: Россия, 450062, г. Уфа, улица Менделеева, 195, корпус УГНТУ № 5.

**Набиев Ильнур Илдусович**, магистрант кафедры строительных конструкций.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Адрес: Россия, 450062, г. Уфа, улица Менделеева, 195, корпус УГНТУ № 5.

**Шайхутдинов Айдар Азаматович**, магистрант кафедры строительных конструкций.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Адрес: Россия, 450062, г. Уфа, улица Менделеева, 195, корпус УГНТУ № 5.

## ОЦЕНКА ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В ОТДЕЛЬНЫХ МИКРОРАЙОНАХ Г. БЕЛГОРОДА\*

Alexsem-n@yandex.ru

*Рост территории и населения г. Белгорода обуславливает увеличение доли городской территории, находящейся в зоне акустического дискомфорта. В связи с этим, своевременное прогнозирование и выявление участков территории города, на которые жители подвергаются воздействию уровней звукового давления, превышающих установленные санитарно-гигиенические нормативы, становится все более актуальной проблемой. Основным источником шумового воздействия в условиях г. Белгорода является шум транспортных потоков. В данной работе проведена оценка, моделирование и построение шумовой карты Южного микрорайона г. Белгорода, который был выбран как наиболее населенный район города с большим количеством магистралей с высокой интенсивностью автомобильного движения. Выявлены зоны акустического дискомфорта, в которых уровни звукового давления от транспортного шума на территориях, прилегающих к жилым домам, превышают санитарно-гигиенические нормативы.*

**Ключевые слова:** шум, транспортный шум, шумовое загрязнение, шумовая карта, городская среда.

**Введение.** Стратегия развития города Белгорода предусматривает создание комфортной и экологически безопасной городской среды за счет пространственного развития, совершенствования улично-дорожной сети, перехода к эколого-градостроительному планированию [1]. Рост территории и населения Белгорода обуславливают неизбежное увеличение интенсивности транспортных потоков, которые являются основной причиной шумового загрязнения городской территории и возникновения акустического дискомфорта. Органами Роспотребнадзора отмечается все большее количество жалоб населения на транспортный шум [2]. Проблема акустического дискомфорта урбанизированных территорий крупных городов в настоящее время становится все более острой, что отмечается ростом числа исследований в этой области [4–9]. Шумовые воздействия в условиях городской среды в настоящее время являются одними из наиболее вредных техногенных факторов, наряду с загрязнением окружающей среды, и способны привести к расстройствам нервной системы и сердечно-сосудистым заболеваниям, в итоге сокращая жизнь человека на 8–10 лет. Согласно исследованиям, проведенным в Европе и Азии, около 20 % жителей страдают от шума, уровень которого превышает допустимые нормы и неблагоприятно отражается на здоровье. По данным Всемирной организации здравоохранения около 40 % жителей Европы подвержены влиянию шума транспортного движения, интенсивность которого превышает 60 дБ в дневное и ночное время [10, 11].

Во многих случаях цель описания шума окружающей среды (шумового режима) состоит в том, чтобы разработать прогноз шумовой ситуации, которая возникает в результате строительства проектируемых промышленных предприятий или магистралей автомобильного, рельсового и воздушного транспорта. Для тихих селитебных территорий задачи необходимо решать, пользуясь соответствующими расчетами или проводя исследования на моделях [12, 13].

Целью данной работы является оценка уровня акустического воздействия транспортных потоков на шумовую обстановку и построение шумовых карт отдельных микрорайонов г. Белгорода для прогнозирования и выявления участков городской среды, в которых уровни звукового давления превышают установленные санитарно-гигиенические нормативы.

**Методика.** Исследование шумовой обстановки в отдельных микрорайонах г. Белгорода проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 20444-2014 и ГОСТ Р 53187-2008 [14,15]. В качестве основных шумовых характеристик транспортных потоков выбраны эквивалентный  $L_{Aeq}$  и максимальный  $L_{Amax}$  уровни звука, дБА, измеренные в дневное (с 7.00 до 23.00) и ночное время (с 23.00 до 7.00) в периоды максимальной интенсивности движения транспорта. Для натурных измерений использовали интегрирующий шумомер Экофизика-110, соответствующий требованиям ГОСТ 17187-2010. При проведении измерений шума автотранспортных потоков микрофон располагали на расстоянии  $7,5 \pm 0,2$  м от оси ближней к точке измерения полосы на высоте

$1,5 \pm 0,1$  м от уровня покрытия проезжей части. Измерения уровней шума проводили до стабилизации показаний прибора в пределах выбранной точности измерений ( $\pm 0,5$  дБА) не менее 5 минут.

При определении эквивалентных уровней звука по измерениям вычисляли средние уровни звукового воздействия  $L_{EA}$ , дБА, для транспортных средств каждого вида (легковые, грузовые, автобусы, троллейбусы) по формуле:

$$L_{Aeq, \text{автом}} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \left[ 10^{\frac{\bar{L}_{EA,t} + 10 \lg n_t}{10}} + 10^{\frac{\bar{L}_{EA,p} + 10 \lg n_p}{10}} + 10^{\frac{\bar{L}_{EA,a} + 10 \lg n_a}{10}} + 10^{\frac{\bar{L}_{EA,m} + 10 \lg n_m}{10}} \right] \right) \quad (2)$$

где  $L_{EA,t}$ ,  $L_{EA,p}$ ,  $L_{EA,a}$ ,  $L_{EA,m}$  – средние уровни звукового воздействия по видам транспортных средств (легковые, грузовые, автобусы, троллейбусы), дБА.

После проведения измерений определяли величину неопределенности измерений уровней звука с уровнем доверия  $U=95\%$  в зависимости от особенностей источников шума, продолжительности измерений, метеорологических условий, измерительной аппаратуры и других факторов по методике ГОСТ 20444-2014 [14].

Результаты натурных измерений уровней шума были использованы при проведении моделирования шумовой обстановки и построения шумовых карт территории с помощью программного комплекса АРМ «Акустика». Программа АРМ «Акустика» позволяет создать пространственный план исследуемой местности с учетом застройки и действующих источников шума (линейных и точечных), а также рассчитать уровни акустического воздействия в любой точке плана в пространстве, построить цветовые поля и изолинии уровней звука в горизонтальной и вертикальной плоскости с заданными пользователем параметрами [15, 16]. Для создания пространственной схемы расположения объектов расчета в исследуемом микрорайоне использовались пространственные 3D-модели микрорайона, полученные с использованием геоинформационной системы 2GIS.

### Основная часть. Проведение замеров уровней шума в Южном микрорайоне г. Белгорода.

Для защиты населения от шума решающее значение имеют санитарно-гигиенические нормативы допустимых уровней шума, поскольку они определяют необходимость разработки тех или иных мер по шумозащите в городах. Степень шумозащищенности в первую очередь определяется нормами допустимого шума для помещения или территории данного назначения. Проникающие в помещения или на территорию шумы от любых источников не должны превышать нормативных величин. В России допустимые уровни

$$\bar{L}_{EA,i} = 10 \lg \left( \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} 10^{0,1 L_{EA}} \right) \quad (1)$$

Измеренные значения уровней звукового воздействия арифметически усредняли по видам транспорта и рассчитывали эквивалентный уровень звука автотранспортного потока за временной интервал времени наблюдения  $T$  по формуле:

$$L_{Aeq, \text{автом}} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \left[ 10^{\frac{\bar{L}_{EA,t} + 10 \lg n_t}{10}} + 10^{\frac{\bar{L}_{EA,p} + 10 \lg n_p}{10}} + 10^{\frac{\bar{L}_{EA,a} + 10 \lg n_a}{10}} + 10^{\frac{\bar{L}_{EA,m} + 10 \lg n_m}{10}} \right] \right) \quad (2)$$

шума установлены в следующих нормативных документах: СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий, на территории жилой застройки, ГОСТ 12.1.036-81 (2001) «Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях» и других.

Для анализа шумовой обстановки были выбрана городская территория в Южном микрорайоне г. Белгорода, как наиболее густонаселенная часть города с большим количеством улиц с высокой интенсивностью автомобильного движения. С целью оценки уровня шумового загрязнения территорий мы провели замеры уровней шума в различных точках на территориях микрорайонов между улицами между улицами Щорса, Губкина, Октябрьской, Буденного, Спортивной, Есенина. Так как основным источником шума на территории данных микрорайонов является автомобильный транспорт, то при оценке уровня шума мы рассматривали не отдельные транспортные средства, а комплексные источники шума – транспортные потоки. Для определения исходных данных для акустического расчета разработаны и стандартизованы методы измерения и оценки шумовых характеристик потоков грузовых и легковых автомобилей, автобусов и троллейбусов. В соответствии с литературными источниками определены математические зависимости уровня шума от следующих факторов: интенсивности, скорости движения и состава транспортных потоков (с учетом уклона и типа покрытия дорожного полотна), что позволяет прогнозировать динамику измерения шумового режима на магистральных улицах и дорогах. В соответствии со стандартами [14, 15] шумовой характеристикой потоков автомобилей, автобусов и троллейбусов является эквивалентный уровень звука  $L_{Aeq}$ , дБА, измеренный на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы движения.

Для комплексной оценки уровня шума от транспортных потоков было подсчитано среднее число грузовых, легковых автомобилей, автобу-

сов и троллейбусов, проезжающих за час по указанным улицам. Полученные результаты об ин-

тенсивности движения в данных точках представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Данные об интенсивности транспортных потоков в исследуемых районах

№	Точка измерения	Интенсивность движения, автомобилей в час		
		Легковых	Грузовых	Общественный транспорт
1	Ул. Буденного	1350	50	80
2	Ул. Губкина	1800	280	150
3	Ул. Щорса	1550	210	150
4	Ул. Конева	1200	50	70
5	Ул. Щорса (Сити Молл)	1900	71	100

Одновременно с замерами уровня шума, была проведена оценка по методике, предложенной в литературе [17]. В соответствии с этой методикой по интерполяции были вычислены уровня шума от транспортных потоков в зависимости от интенсивности, скорости движения и

состава транспортных потоков (с учетом уклона, типа покрытия дорожного полотна и количества полос движения). Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Эквивалентный уровень шума в зависимости от интенсивности движения

№	Точка измерения	Эквивалентный уровень шума, дБА	
		Измеренный	Вычисленный
1	Ул. Буденного	74,2	73,2
2	Ул. Губкина	74,1	72,1
3	Ул. Щорса	77,5	76,5
4	Ул. Конева	74,5	75,5
5	Ул. Щорса (Сити Молл)	80,1	79,1

Полученные значения превышают допустимые значения, установленные СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий, на территории жилой застройки».

#### Расчет уровней шума и построение карты шумового загрязнения Южного микрорайона от шума транспортных магистралей и других источников

Полученные данные об уровне шума на территории исследуемого микрорайона были использованы для составления шумовой карты района. Для построения карты использовалась программный комплекс АРМ «Акустика» версии 2.4. Программа предназначена для автоматизации деятельности при проведении оценки влияния шума существующих объектов на окружающую среду. Расчеты в программе проводятся в соответствии с действующими нормативными документами.

В начале построения шумовой карты была получена карта микрорайона и создана сетка координат в программе «Акустика» с размерами

ячейки 50 м. На следующем этапе построения карты в программу были введены основные характеристики источников шума – транспортных магистралей, трансформаторных подстанций, мест погрузки-разгрузки вблизи магазинов, установок кондиционирования воздуха, остановок общественного транспорта. Далее с помощью программы «Акустика» была построена шумовая карта территории микрорайона.

Анализ полученной шумовой карты дает возможность определить наиболее проблемные зоны Южного микрорайона г. Белгорода по шумовому фактору. К ним следует отнести перекрестки улиц Губкина и Щорса (превышение до 8 дБА), улиц Губкина и Буденного (превышение до 4 дБА). Все жилые дома, расположенные вблизи исследуемых улиц, находятся в зоне акустического дискомфорта, что повышает риски возникновения специфических функциональных отклонений в состоянии здоровья, связанных с воздействием транспортного шума, которые могут быть определены по специальным методикам.

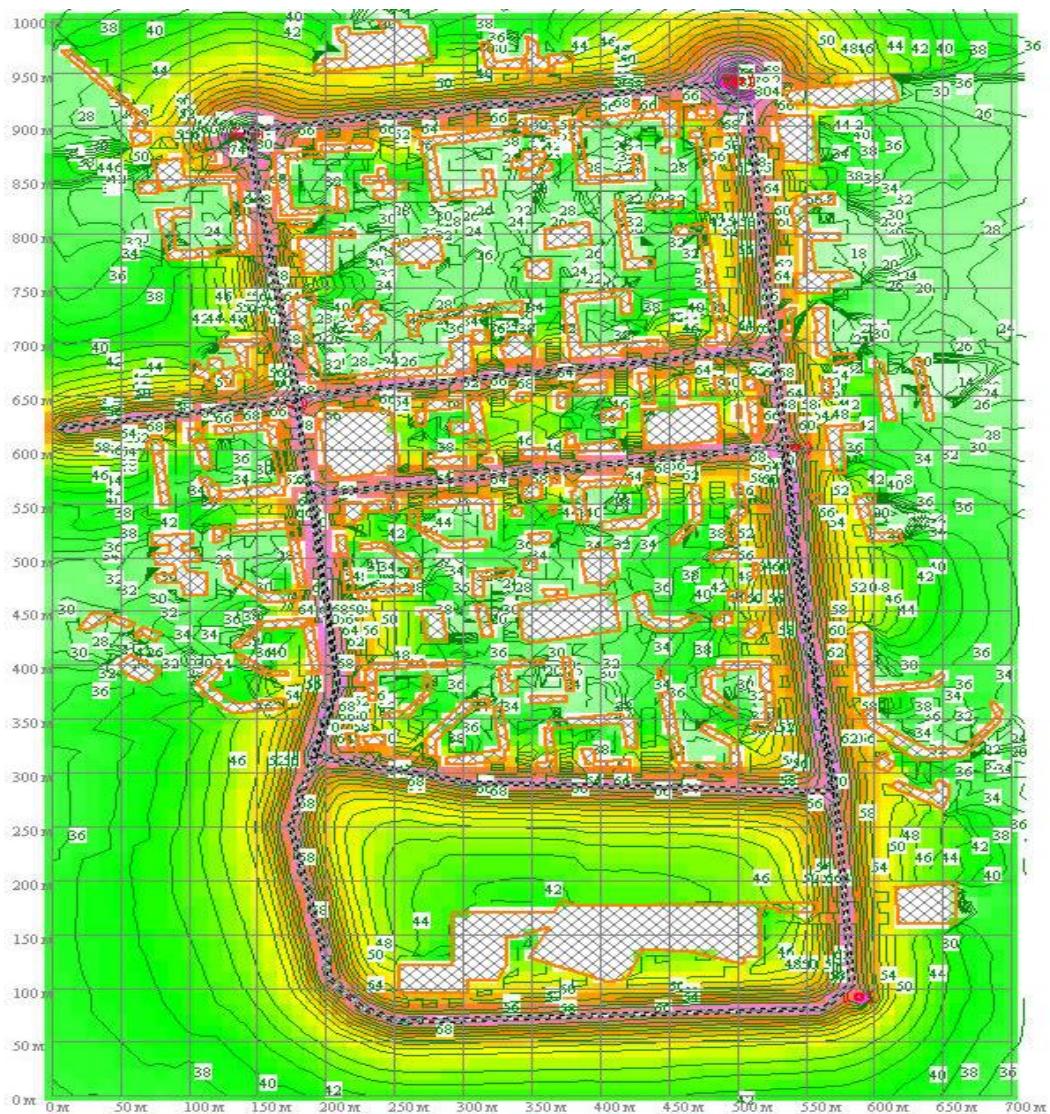


Рис. 1. Модель шумовой обстановки Южного микрорайона г. Белгорода

**Выводы.** Учитывая, что основным источником шума в исследуемом микрорайоне являются транспортные магистрали (улицы с интенсивным движением транспорта), решение вопроса снижения шума в условиях города напрямую связано с решением проблемы увеличения автомобильного транспорта в городе. К настоящему времени количество личного автомобильного транспорта в г. Белгороде составляет около 122 тыс. единиц на 390 тыс. человек населения и продолжает увеличиваться. Мероприятия по снижению шумового загрязнения в городе предусмотрены Концепцией «Комплексная схема развития городского транспорта на 2009–2025 гг.», в которой поставлена задача разработки системы мер по снижению шумового загрязнения городской среды автотранспортом с целью снижения численности населения, проживающего в условиях шумового дискомфорта на 10 % [18].

Построение оперативных шумовых карт отдельных микрорайонах города Белгорода дает

возможность выявлять участки городской территории, на которых жители проживают в условиях, не отвечающих санитарно-гигиеническим требованиям по шумовому фактору.

Практическая значимость работы заключается в том, что исследуя основные источники шума, окружающие человека, особенно в городской среде, существует возможность не только предложить лучшее решение при выборе способа защиты от шума, но и контролировать его уровень в источнике образования.

\*Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2017–2021 годы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития г. Белгорода до 2025 г., утв. Советом депутатов г. Белгорода от 30.01.2007 № 413.
2. Областной доклад «О состоянии сани-

тарно-эпидемиологического благополучия населения Белгородской области в 2016 году». Белгород, Управление Роспотребнадзора по Белгородской области, 2017. 211 с.

3. Бочаров А.А., Колесник А.Г., Соловьев А.В. Акустические шумы урбанизированных территорий на примере г. Томска // Известия ТПУ. 2012. №1. С.191–196.

4. Половинкина Ю.С. Шумовое загрязнение окружающей среды урбанизированных территорий (на примере города Волгограда) // Научный журнал КубГАУ. 2012. №76. С.584–593

5. Харченко С.В. Шумовое загрязнение в городах в связи с характером рельефа территории (для ключевых участков в гг. Курск и Тамбов) // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2015. №3 (200). С.182–190

6. Скворцов А.Н., Савельев А.П., Пьянзов С.В. Оценка акустического загрязнения селитебной территории в г. Саранске // Вестник МГУ. 2016. №2. С. 218–227

7. Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.Г., Шульженко В.Н., Шаптала В.В. Барашкова О.С. Расчет шумового загрязнения территории ВУЗа от близлежащих промышленных предприятий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. №2. С. 75–76.

8. Степанова И.А., Степанов А.С., Ивлева Я.С., Мануев Л.Ю. Экологическая оценка транспортной инфраструктуры по фактору шумового загрязнения на примере города Оренбурга // Вестник ОГУ. 2015. №10 (185). С.438–440.

9. Кирюшина Н.К., Степанов В.Н. Метод выявления домов, находящихся в зоне сверхнормативного действия транспортного шума в условиях города Москвы // Вестник МГСУ. 2011. №3-1. С. 77–81

10. Bilaşco Ş., Govor C., Roşca S. Vescan I., Filip S. Fodorean I. GIS model for identifying urban

areas vulnerable to noise pollution // Front. Earth Sci. V.11 (2). Pp. 214–228.

11. Ming Cai, Jingfang Zou, Jiemin Xie, Xialin Ma Road traffic noise mapping in Guangzhou using GIS and GPS // Applied Acoustics. 2015. Vol. 87. Pp. 94–102.

12. Семейкин А.Ю. Моделирование шумового воздействия транспортных потоков в городской среде на примере отдельных районов г. Белгорода / Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции // Юргинский технологический институт Томск. политех. ун-та (Юрга, 5-6 ноября 2015 г.). Юрга: изд-во ТПУ, 2015. С. 303–306.

13. Литовка А.А., Семейкин А.Ю. Моделирование транспортного шума в городской среде на примере г. Белгорода / Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докладов международной научно-практической конференции // Губкинский филиал Белгор. гос. технол. ун-та (Губкин 16 апр. 2015 г.). Губкин: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 186–191.

14. ГОСТ 20444-2014. Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики.

15. ГОСТ Р 53187-2008. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий.

16. АРМ «Акустика» 2.4. Руководство пользователя. М.: МНПО «Экоблик», 2008. 22 с.

17. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М.: Университетская книга, Логос, 2008. 424 с.

18. Концепция «Комплексная схема развития городского транспорта на 2009-2025 гг.», утв. Советом депутатов г. Белгорода от 9.12.2008 № 131.

## Semeykin A.Yu.

### ASSESSMENT OF THE NOISE SITUATION OF URBAN ENVIRONMENT IN CERTAIN DISTRICTS OF BELGOROD

*The growth of the territory and population of the city of Belgorod causes an increase in the proportion of urban areas in the zone of acoustic discomfort. In this regard, the timely prediction and identification of areas of the city, to which residents are exposed to sound pressure levels exceeding the established sanitary and hygienic standards, is becoming an increasingly urgent problem. The main source of noise impact in the city of Belgorod is traffic noise. In this work, an estimation, modeling and construction of a noise map of the Southern district of Belgorod, which was chosen as the most populated area of the city with a large number of highways with high traffic intensity, was carried out. Areas of acoustic discomfort, in which levels of sound pressure from transport noise in zones adjacent to residential buildings exceed sanitary and hygienic standards, was determined.*

**Keywords:** noise, transport noise, noise pollution, noise map, urban environment.

**Семейкин Александр Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: alexsem-n@yandex.ru

## ДВА ЦИЦИКАРА: РАЗВИТИЕ ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПОСЕЛЕНИЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ КИТАЙСКО-ВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

**008703@pnu.edu.ru**

*В настоящее время русскому архитектурно-градостроительному наследию в Китае рубежа XIX-XX веков уделяется много внимания как отечественными, так и зарубежными исследователями. Но до сих пор остаются вопросы, не получившие однозначного ответа; обнаруживаются ранее неизвестные факты и документы, которые позволяют по-новому рассмотреть исторические события. Большой исследовательский интерес представляют вопросы процесса градообразования в полосе отчуждения китайской восточной железной дороги, которые определили за короткий исторический период жизнеспособную структуру расселения. Несмотря на применение типовых проектов, как зданий, так и поселений, выделяется ряд станций, которые имеют ярко выраженные характерные особенности. Особый интерес представляет станция Цицикар, находящаяся в западной части главной линии дороги, в 25 километрах от древнего китайского города Цицикар. В статье освещены результаты исследования образования и градостроительного развития города в зоне отчуждения железной дороги, рассмотрены особенности формирования русской архитектурной среды в инородческом социуме. Работа построена на анализе документов Российского государственного исторического архива г. Санкт-Петербурга, Российского государственного архива г. Москвы, а также данных из исторических литературных источников.*

**Ключевые слова:** архитектура, градообразование, Китайско-Восточная железная дорога, планировка, расселение.

**Введение.** 27 августа (8 сентября) 1896 г. в Берлине китайской стороной в лице Сюй Цзинчэна и Русско-Китайским банком был подписан контракт на постройку и эксплуатацию китайской восточной железной дороги (КВЖД) на территории Маньчжурии [1]. В географических описаниях отмечался неоднородный характер территории: пустынные степи, гористый рельеф, большое количество рек, большая площадь плодородных земель [2]. Основным фактором при прокладке железной дороги и расположения станций была освоенность территории, характеризующаяся, наличием китайских поселений, прилегающих к ним обрабатываемых земель и лесные ресурсы. Это должно было обеспечить гигантскую стройку материалами, рабочей силой и создать продовольственную базу.

Линия КВЖД прошла по территории со сравнительно высокой для малонаселенной Северной Маньчжурии концентрацией китайских поселений: отдельные промысловые и сельскохозяйственные фанзы, многочисленные деревни, китайские города [3]. Для нужд дороги выделялась полоса шириной 70 м [4]. Близ станций, в зависимости от класса, площадь отчуждения варьировалась от 600 до 6500 га на Западной ветке, от 300 до 5600 га – на Восточной. В официальных соглашениях отмечалось, что дорога не должна пересекать существующие китайские города, а

проходить на расстоянии от них [5].

Всего было оборудовано 92 станции, 54 из которых расположены на главной линии, 38 – на южной ветке. Между станциями выдерживалось расстояние в среднем тридцать верст. Каждые десять верст закладывались либо разъезды (на главной линии 47 разъездов, на южной ветви – 25), либо площадки (60 и 38 соответственно) [6]. Китайские поселения не вошли в полосу отчуждения КВЖД, но оказались в зоне ее влияния – новая транспортная артерия стала мощным фактором социально-экономического развития северо-восточного региона. От нее пролегли железнодорожные ветки к каменноугольным месторождениям у поселков Джалаинор и Фушунь, к многочисленным лесным концессиям вдоль дороги. От русских станций были проложены узкоколейные железнодорожные ветки к крупным историческим китайским поселениям, что обеспечивало постоянные экономические и культурные связи. Функциональная специализация станций первоначально определялась обслуживанием железной дороги. Со временем русские станции со смешанным русско-китайским населением стали элементами расселения вдоль линии дороги. В исторических китайских городах появлялись русские военные части, церкви, здания утилитарного назначения – телеграф, почта, отделение банка, русско-китайские школы и т.д. Историческая

планировка и традиционная жилая застройка хутунами сохранялась.

При строительстве станций КВЖД использовались специально разработанные типовые генеральные планы, подразделяющиеся на классы в зависимости от площади территории отчуждения, численности потенциального населения станции и грузопотока. Всего выделялось пять классов. К станциям I класса относились Далянь и Харбин; станций II класса было девять, и располагались они через каждые 220 верст; III класса – восемь; IV – сорок девять (четыре станции были вне ветки при угольных копях и порте Инкоу); V – тридцать. Класс станции определял площадь поселения, планировку, функциональное зонирование, расположение железнодорожных служб (ремонтные мастерские, депо). От этого определялся и класс вокзала, его размеры и наличие удобств: вокзалы V класса имели площадь 20,87 кв. саженей, IV – 58,36, III – от 58,36 до 110, II – 110, I класса – 300 [6]. Помещения первого и второго классов, как правило, находились на втором этаже.

Была разработана целая серия проектов жилых домов для разных чинов железной дороги. Дома отличались по жилой площади, по типам зданий (дома на одну или две семьи), по строительным материалам (деревянные, из кирпича и натурального камня). Во всех разработанных вариантах жилые дома имели веранду, возводились на индивидуальных участках, на которых находились хозяйствственные постройки (склады, сараи, ледники). Дома на два хозяина имели отдельные входы через палисадник. Практически на всех станциях были построены деревянные православные храмы.

## 1. История формирования города Цицикара

**1.1. Древний город Северной Маньчжурии.** Особый интерес представляет развитие маньчжурского города Цицикар (в просторечии – Букуй, что в переводе с даурского означает «благоприятный, многообещающий»). Цицикар и окружающая местность, называемая Аньянси, имеет богатое историческое и культурное наследие. В этом районе расселение начало формироваться с 1125 г. Но официально годом основания города считается 1333. Активный рост Цицикара начинается с XVII в. с развитием торговых отношений между Россией и Китаем. Имея выгодное экономико-географическое положение, он стал крупным распределительным центром на пути торговых караванов из Кяхты (Забайкалье) в Пекин. С 1699 г. в Цицикаре формируются административно-управленческие функции, в нем располагается ставка хэйлунцзянского цзянцзюня и

фудутуна для управления прилегающими землями [7].

Многочисленные караваны останавливались у городских стен, где на специально организованных площадях организовывались торги между русскими и китайцами. Цицикар имел постоянные экономические связи с городами Баян-сусу, Хуланчэн, Хайлар. С XIX в. в сентябре и октябре постоянно проводились ярмарки, на которые съездились продовольственные товары со всей северной Маньчжурии. Кроме крупных оптовых операций, активно развивалась частная торговля. Численность населения в разные годы колебалась от 30 до 70 тыс. человек. В 1895 г. в городе насчитывалось около 400 лавок купцов [8], в начале XX в. их было больше тысячи, в 1927 г. насчитывалось около восьми тысяч торгово-промышленных фирм [9]. Развитию города способствовали выход к судоходной реке Наньцзишань (Букуй-цзян) и наличие крупных трактов, проложенных от Цицикара к городам Хайлар, Кэшань, Байцоан, Пекину, к удаленным приграничным поселениям Сахаляну и Кяхте [8].

### 1.2. Анализ структуры древнего города.

Город располагался на правом берегу судоходной реки и был вытянут вдоль нее с юга на север. В основе города – старая, обнесенная высокой каменной стеной крепость (импань), имеющая в плане форму квадрата. С ростом численности населения территория города расширилась. Новое поселение плотно окружило крепость, дополнительно был построен второй ряд каменной стены. Планировка внутреннего города была регулярной, улицы проложены в направлении север-юг.

В градостроительном отношении Цицикар был закрытым городом: с севера, востока и юга шла крепостная стена, с запада – река Наньцзишань. К середине XIX в. он подошел к своим территориальным пределам, и его дальнейшее пространственное развитие возможно было только за второй линией крепостных стен. За внешней стеной в месте проведения ярмарок сложилась живописная планировка с узкими криволинейными улицами и большими торговыми площадями. Город получил развитие в южном направлении. Главная улица Торговая пересекала город и выходила на тракт, ведущий в Пекин. Численность населения динамично увеличивалась за счет переселения китайцев из северных деревень, из многочисленных сел, окружающих город. Строительство железной дороги увеличило поток переселенцев и привело к стихийному освоению территории. К этому времени Цицикар состоял из трех структурных единиц, которые имели свои особенности планировочной организации, функциональной специализации и застройки: старая

крепость – административная часть; территория внутри оборонительной стены – жилая; район за крепостной стеной – торговый (рис. 1).

В конце XIX в. Цицикар представлял собой типичный китайский город с характерной пространственной организацией городской среды. Основу планировки жилых районов составляли сыхэюани – обнесенные стеной дворы одного или нескольких хозяев, застроенные по периметру зданиями разной иерархии. Такие дворы стояли вплотную друг к другу так, что между ними оставался лишь небольшой проход – хутун

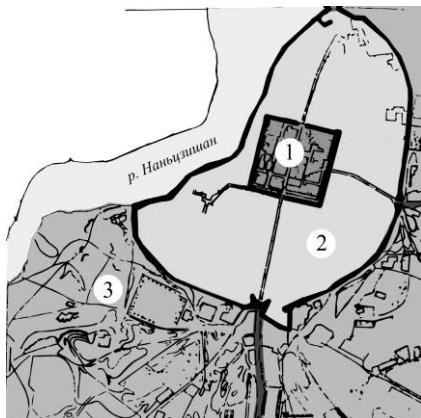


Рис. 1. Старый город (1905):  
1 – Старая крепость; 2 – Жилая  
застройка; 3 – Торговая зона (схема  
на основе рисунка из альбома [11])



Рис. 2. Застройка старой части китайского города  
(фото из альбома) [11]

## 2. Станция Цицикар

**2.1. Особенности застройки.** Железнодорожная станция Цицикар была построена на линии КВЖД в 25 километрах от китайского города. До сегодняшнего дня она сохранилась под названием Аньянси и является районом городского подчинения округа Цицикара. Для связи двух поселений в 1909 г. была проложена узкоколейная железнодорожная ветка [9]. Класс – II [6]. По ведомости отчуждаемых земель западной линии, на станцию Цицикар отводилось 6500 китайских шан (1 шан примерно равен 1 га) [5].

Основным композиционным центром являлся вокзал. Вокзальный комплекс состоял из нескольких сооружений, обслуживающих дорогу: пассажирских вокзалов, отдельно для русских и для китайцев, водонапорной башни и железнодорожного депо. За прямоугольной привокзальной площадью со сквером пролегал парадный бульвар. На площади располагалась деревянная церковь.

Железнодорожный поселок быстро рос, и за короткое время сложилась среда, характерная для небольшого провинциального русского города – одноэтажная застройка, храм, много зелени. Основу генерального плана жилого поселка

[10]. Узкие криволинейные улицы и внутренние дворы являлись жестким планировочным каркасом. На окраинах города основная застройка формировалась из фанз, которые плотно примыкали друг к другу, образовывая сплошной фронт улиц (рис. 2). Плотность застройки была высокой, одноэтажные дома ковром заполняли пространство города. На их фоне контрастно выделялись крепостные стены, пагоды, храмы, входные ворота, которые являлись композиционными акцентами в застройке.

составляла регулярная сетка кварталов с размерами 100 на 100 саженей (площадь приблизительно 4,5 га). Согласно проекту по углам квартала строились 4 жилых дома на два хозяина [12]. Проезд имел ширину 3,5 м. По окраинам возводились дома на участках меньшего размера. Поскольку со строительством железной дороги резко возрос приток населения, приезжим выделялись участки для самостоятельного возведения домов. Как правило, они возводились деревянными и напоминали русские избы. Строились и каменные здания на две семьи с входом в торцах. На станции рядом с железнодорожным поселком строили фанзы китайцы, которые приезжали на заработки. К 1927 г. насчитывалось около 4 тыс. человек [9].

Вместе с дорогой были построены двухклассная железнодорожная школа, почта, метеостанция, поселковая бойня, больница, маслобойный завод, паровая мельница и табачная фабрика, церковь (рис. 3) [13]. Храм во имя святых апостолов Петра и Павла на привокзальной площади был построен в 1913 г. правлением общества железной дороги [14]. Позже был возведен каменный православный храм, общей площадью 396 м<sup>2</sup>. Он был выполнен в неорусском стиле с колокольней, перекрытой шатром (рис. 4).



Рис. 3. Храм Святых Апостолов Петра и Павла на станции Цицикар. Фрагмент открытки



Рис. 4. Каменный храм на станции Цицикар. Фотография очевидца, 1990-е гг.

**2.2. Здание вокзала.** Здание вокзала Цицикара построено в 1903 г. по проекту для вокзалов второго и третьего класса, как здания на станциях Имяньпо, Яомынь, Джалантунь, Хайлар. При строительстве вокзала в проект вносились изменения, касающиеся внутренних планировок и деталировки здания.

Комплекс пассажирского вокзала состоял из двух павильонов – для европейцев (слева) и для китайцев (справа); между ними был широкий проход, перекрытый навесом и использовался для хранения багажа. Общим было стилистическое решение обоих павильонов: строились они из красного кирпича. Выделялись белым цветом обрамления окон, боковые пилястры, горизонтальные пояски. Карниз декорировался деревянной резьбой. Скаты крыш подчеркивались деревянными элементами.

Здание для европейцев было двухэтажным

(рис.5), в его состав входили помещения 1 и 2 классов с уборными, буфет, телеграф, кассы, помещения для третьего класса, комната начальника участка, подсобные помещения. Павильон для китайцев был одноэтажным, с отдельным входом и выходом на перрон (рис. 6). В архитектурном отношении в качестве главного элемента комплекса выделялся центральный вход европейского павильона, который на фасаде был отмечен высоким фронтоном. Фасад формируют метрические ряды окон. Более сложное решение имел главный элемент со стороны перрона. На него накладывалась легкая деревянная конструкция пассажирского дебаркадера. Оконные простенки фасада были декорированы. Это связано было с тем, что со стороны железнодорожных путей вокзал должен был формировать образ станции. На перроне для пассажиров сооружался навес [15].



Рис. 5. Вид на восточную часть вокзального комплекса станции Цицикар (фрагмент открытки)



Рис. 6. Вид на западную часть вокзального комплекса станции Цицикар (фрагмент открытки)

**2.3. Влияние русской станции на китайский город.** С появлением станции Цицикар резко изменилось развитие китайского города. Значительные перемены произошли в пределах первой крепостной стены. Русским было разрешено строительство представительских зданий на территории старого города: департамент финансов, дом и управление генерал-губернатора, телеграф, православная церковь (рис. 9), которая

была построена после занятия города русскими войсками [16]. В старом городе находились Клуб железнодорожников, Русское консульство, отделение Русско-Азиатского банка и управление лесного предприятия И.П. Шевченко [9]. В традиционной китайской плотно-низкой застройке контрастно выделялись здания в русском стиле.

Но основное строительство проходило за границами второго ряда оборонительных стен.

Планировка новой части китайского города носила расчлененный характер. Рядом с вокзалом вдоль узкоколейки русскими был образован небольшой район железнодорожников с регулярной сеткой кварталов, которые были застроены жилыми зданиями. Была застроена и дорога южного направления, которая подходила к воротам старого города (рис. 7). В короткие сроки на ней были сооружены двухэтажные кирпичные здания, в которых открылись представительства крупных торговых фирм, как китайских, так и

русских. Архитектура сооружений была разнообразной. Фронт улицы формировался чередованием каменных зданий в европейских ретро стилях и традиционных китайских. Кроме жилых домов были построены общественные сооружения: школы, почта, ресторан, театр, управление железной дорогой. В северной части сконцентрированы учебные заведения: ремесленное, женское училище, учительская семинария, низовое училище [7].



Рис. 7. Новая часть китайского города Цицикар [3]

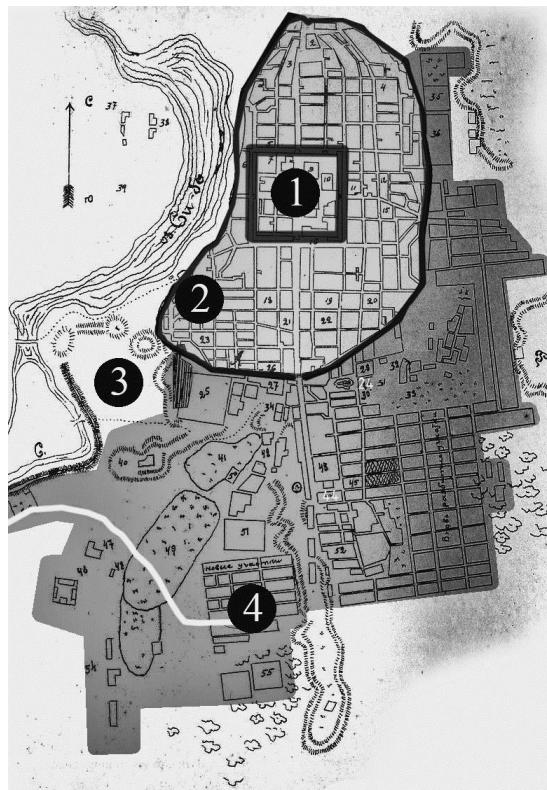


Рис. 8. Схема Цицикара (1910): 1 – Старая крепость; 2 – Жилая застройка; 3 – Новый китайский город; 4 – Железнодорожный вокзал до станции. Схема на основе плана города, опубликованного в 1910 году [17]



Рис. 9. Фрагмент застройки новой части города Цицикар. Китайский монетный двор и русская церковь.  
Фрагмент открытки

**Заключение.** Образование и развитие русских станций вблизи исторических городов Китая отражает особенности формирования своеобразного архитектурно-градостроительного конгломерата, основу которого определяют две культуры: России и Китая. Ярким примером этого является развитие исторического китайского города Цицикар и русской железнодорожной станции Цицикар (Аньянси). И в настоящее время в историческое наследие города входит как архитектура старого города, так и русская архитектура железнодорожного поселения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скачков П.И. Мясников В.С. Русско-китайские отношения 1689–1915. Официальные документы. М.: Издательство восточной литературы, 1958. С. 74.
2. Арсеньев В.К. Китайцы в Уссурийском крае. Нансен. Ф. В страну будущего. М.: Крафт+, 2004. С. 279.
3. North Manchuria and the Chinese Eastern Railway. Harbin: C.E.R. Printing, 1924. С. 398–399.
4. Алферова О. КВЖД [Электронный ресурс] / Алферова О. – Режим доступа: [http://old.zabunb.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1150](http://old.zabunb.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=1150) (дата обращения: 16.07.2017).
5. Сборник документов, относящихся к китайской восточной железной дороге. Издание канцелярии правления Общества китайской восточной железной дороги, 1922 // ГАРФ. Ф. 6081. Оп. 1. Д. 143. Л. 69–71.
6. Типы зданий и служб при них. Планы, фасады, разрезы, сметы, пояснительные записки // РГИА. Ф. 350. Оп. 16. Д. 929. Л. 65.
7. 中国-齐齐哈尔 - WWW.QQHR.GOV.CN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qqhr.gov.cn/> (дата обращения: 13.07.2017).
8. Паукер Е.О. Маньчжурия. С.-Петербург: Типография СПб акц. общ. «Слово», 1904. С. 75–76.
9. Справочник по Северной Маньчжурии и КВЖД. Харбин: Экономическое бюро КВЖД. Типография «Полиграф», 1927. С. 501–503.
10. Лучкова В.И. История китайского города. Градостроительство, архитектура, садово-парковое искусство. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. С. 268–269.
11. Альбом сооружения Китайской-Восточной железной дороги 1897–1903. С.-Пб., 1903. С. 162.
12. Типовой квартал на 4 дома. План // РГИА. Ф. 350. Оп. 16. Д. 1570. Л. 1.
13. Журнал «Политехник» Сидней, 1980 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:929b5VsU50sJ:www.slideshare.net/breviarissimus/1980-36548997+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ru> (дата обращения: 27.02.2017).
14. Казаки в Маньчжурии - стр. 9 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.preditoria.org/forums/index.php?PHPSESSID=a3f9c7a4d700007a747c8c86e2619a38&topic=46.40> (дата обращения: 16.07.2017).
15. Предварительная записка к применению проектов пассажирских зданий на станциях дороги // Ф. 350. Оп. 16. – Д. 927. Л. 1-7.
16. ИнфоРост Н.П. ГПИБ | Путеводитель по великой Сибирской железной дороге. 1903–1904 / сост. по офиц. данным под ред. А. И. Дмитриева-Мамонова. – СПб, 1904. [Электронный ресурс] / Н.П. ИнфоРост. – Режим доступа: <http://elib.shpl.ru/tu/nodes/16100#page/448/mode/gid/zoom/1>. (дата обращения: 16.07.2017).
17. Гребенщиков А.В. Бутху и Мэргэн по р. Нонни (продолжение) // Вестник Азии. 1910. № 3. С. 174–193.

---

**Glatolenkova E.V., Kozyrenko N.E.****TWO CITIES: THE DEVELOPMENT OF THE SETTLEMENTS PLANNING STRUCTURE  
OF QIQICAR IN THE CHINESE EASTERN RAILWAY ZONE**

*At the present time, there is much attention is paid for Russian architectural heritage of the 19th and 20th centuries in China. But there are many questions have not been answered. Previously unknown facts and documents are revealed that allow review the historical events in a new way. Of great research interest are the issues of the process of city formation in the Chinese Eastern railway zone, which in a short historical period determined a viable structure of settlement. Despite the use of standard projects, both buildings and settlements, a number of stations are distinguished, which have pronounced characteristic features. Of particular interest is Qiqihar Station, located in the western branch, 25 kilometers from the ancient Chinese city of Qiqihar. The article highlights the results of the study of education and urban development of the city in the Chinese Eastern railway zone, the peculiarities of the formation of the Russian architectural environment in a foreign society are considered. The work is based on the analysis of documents of the Russian State Historical Archive in St. Petersburg, the Russian State Archive in Moscow, as well as data from historical literary sources.*

**Keywords:** architecture, urban development, Chinese Eastern railway, planning, settling.

---

**Глатоленкова Екатерина Викторовна**, старший преподаватель кафедры дизайна архитектурной среды.

Тихоокеанский государственный университет.

Адрес: 680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

E-mail: 008703@pnu.edu.ru

**Козыренко Наталья Ефремовна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры дизайна архитектурной среды.

Тихоокеанский государственный университет.

Адрес: 680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Брагина Н.Ю., стар. препод.  
Таджикский Технический Университет имени академика М.С. Осими

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА Г. ДУШАНБЕ

[nikakoz123@gmail.com](mailto:nikakoz123@gmail.com)

Столица Республики Таджикистан - город Душанбе – на сегодняшний день является современным комфортным городом. Удивительно, что в двадцатые годы прошлого века на его месте находился всего лишь древний кишлак. В этой связи чрезвычайно интересным вопросом является изучение особенностей развития градостроительства города Душанбе. В ходе исследования выявлены основные направления развития города, исследованы особенности его архитектуры. Изучены архитектурные и строительные практики, которые были характерны для развивающегося города. Затронут вопрос развития жилищного строительства города Душанбе.

**Ключевые слова:** архитектура, строительство, развитие градостроительства, генеральный план, композиция, сооружения.

Город Душанбе – столица Республики Таджикистан является крупнейшим промышленным, административным, научным и культурным центром республики. Современный Душанбе – город новый, созданный за годы советской власти на месте древнего кишлака Душанбе. Первые поселения людей возникли на этой территории в глубокой древности.

После образования в октябре 1924 г. Таджикской автономной Советской социалистической республики Душанбе был провозглашен столицей республики. В 1925 г. кишлак Душанбе был преобразован в город, сюда стали прибывать специалисты из других городов страны.

С образованием союзной республики начался особенно интенсивный рост города, чему в немалой степени способствовало окончание строительства железной дороги Термез-Душанбе. Несмотря на огромные трудности, испытываемые молодой республикой в первые послевоенные годы, принимались решительные меры по строительству в городе благоустроенных жилищ, школ, больниц [1].

В 1924-м году первая улица города была названа Советской. Протяжённостью всего лишь в 3 километра, она делила на две части бывший кишлак Душанбе.

Одними из первых архитекторов в столицу молодой республики приехали П.И. Ваулин и С.В. Кутин. К сентябрю 1926 года изыскатели выполнили топографическую съемку земель и составили первый план Душанбе. Необходимо отметить, что тридцатые годы и особенно их вторая половина характеризовалась значительным размахом архитектурных и градостроительных мероприятий в республике.

27 апреля 1927 г. Совнарком республики принял постановление "О строительстве города

Душанбе", которым Душанбинский горисполком обязывался принять меры по составлению предварительного проекта планировки города и ведению строительства по плану.

В 1930 г. Совнарком утвердил первый предварительный проект планировки, в котором площадь старого базара отводилась под крупный парк и были намечены трассы первых улиц города. Началось строительство первого в городе сооружения и железобетона – здания тепловой электростанции. В строительной практике того времени наблюдалась чрезмерная разбросанность новостроек и принимались малые плотности застройки, что очень затрудняло благоустройство Душанбе.

В 1931 г. начались работы по составлению первого генерального плана города. Генпланом предусматривалось логичное функциональное зонирование территории, преимущественная 2-3-этажная застройка. Сеть улиц увязывалась с направлением реки Душанбинки и окружающим ландшафтом.

Очень важным событием 1935 года был созыв первой в истории Таджикистана республиканской конференции советских архитекторов. На нем обсуждались вопросы теории и практики советской архитектуры, использования национальных форм и традиций. С этого важного события в жизни архитекторов республики и приезда пополнения молодых архитекторов из Ленинграда начался период значительной активизации работ в области архитектуры и градостроительства в Таджикистане.

В 1935 г. институту «Гипрогор» была поручена разработка нового генерального плана города Душанбе. Генплан города, рассчитанный на 170 тыс. жителей (авторский коллектив: архитекторы Н.В. Баранов и М.М. Баранов, инженеры –

В. Шелейховский и Г.М. Ситко), был утвержден Совнаркомом республики в 1938 г. В соответствии с этим генпланом город развивался на левом берегу реки Душанбинки и представлял собой сужающийся к северу треугольник, ограниченный рекой, холмами и железной дорогой. Намечалась в основном 3–4 – этажная застройка (96 % от всего объема) с высокими плотностями (до 3200 м<sup>2</sup> жилой площади на 1 га). Предусматривался значительный снос малоценных и ветхих домов (до 70 % объема существующего жилого фонда). Равномерно и обоснованно размещались промышленные зоны города. Генеральный план обусловил формирование интересной планировочной структуры города и в значительной степени способствовал рождению его оригинального архитектурного облика. В до-военные годы было осуществлено строительство большого количества крупных общественных зданий, которые характеризовали поиски национального образа в архитектуре и свидетельствовали о высоком уровне градостроительства.

Первую попытку найти образ крупного общественного здания для столицы была предпринята в конце тридцатых годов – был создан проект Театра оперы и балета им. Айни. Строительство здания началось в 1939 году на пересечение улицы Лахути и проспекта Куйбышева (ныне академиков Раджабовых). Сейчас здесь находится одно из красивейших мест столицы – площадь имени 800-летия Москвы. Почти одновременно с театром проектировалась первая трехэтажная столичная гостиница «Вахш».

В 1939 году созданием Комсомольского озера, парка и строительством спортивного комплекса (ныне стадион им. Фрунзе) было положено начало планомерному освоению правого берега реки Душанбе. Озеро с водной поверхностью около 20 га и парк вокруг были созданы по инициативе душанбинской молодежи и выполнены силами общественности города и окрестных поселков. Сейчас это одно из озер, которые входят в большой каскад.

В 1940 г. началось строительство Дома правительства Таджикской ССР и формирование главной площади столицы.

Здание Дома правительства благодаря удачно найденному масштабу, пропорциям, ритму объемов и деталей, сыграло роль своеобразного архитектурного модуля не только в застройке площади, но и города в целом. В этот же период были построены и другие крупные здания, и комплексы, а также первые кварталы 2 и 3-этажных жилых домов.

В послевоенный период, когда в результате интенсивного индивидуального строительства почти все пригодные для застройки территории

на левом берегу реки Душанбинки были исчерпаны, Совет Министров СССР принял решение о составлении нового генерального плана г. Душанбе. Работа была поручена всесоюзному тресту «Горстройпроект». Генплан города (авторский коллектив: архитекторы Д.С. Меерсон, В.М. Балдин, инженеры А.Ф. Дембовский, А.А. Эшлиман) был закончен в 1955 году, по замечаниям согласующих организаций многоократно дорабатывался, но так и не был утвержден. Город, рассчитанный на 250 тыс. жителей, располагался на обоих берегах реки Душанбинки, которая выполняла роль главной планировочной оси города. Для правобережной части города была принята мелкоквартальная планировка с преимущественно малоэтажной застройкой.

В 1945–1957 годах градостроительные мероприятия в Таджикистане приняли особенно широкий размах. В этот период и формируется архитектурный облик Душанбе. Начали строиться трехэтажные жилые дома по проспекту Ленина (ныне проспект Рудаки) и по улице Айни и первые четырехэтажные дома, построены: библиотека Фирдоуси, здания Госбанка (Национальный банк) и президентский дворец, краеведческий музей, здание МВД, Политехнический институт, Таджикский драматический театр им. Лахути [2].

В 50-е годы были построены кварталы многоэтажных жилых домов по ул. Ленина и Айни, возведено много школ, детских садов, кинотеатров, больниц и других культурно бытовых учреждений. Большое внимание уделялось благоустройству и озеленению улиц города. В этот период были возведены такие значительные здания, как ЦК КП Таджикистана, библиотека им. Фирдоуси, Краеведческий музей, Политехнический институт, театр им. А. Лахути, городская больница и др. В основных чертах сформировалась застройка улиц Ленина, Айни, Куйбышева и площадей им. Айни, Ленина, Путовского.

Архитектурная практика 60-х – начала 70-х годов характеризуется улучшением объёмно-планировочных решений, увеличением этажности и протяженности жилых домов, повышением уровня их инженерного оборудования. Реже стало практиковаться разбросанное по городу штучное строительство жилья. Был осуществлен переход к созданию крупных жилых массивов, преимущественно на свободных территориях. Улучшилось благоустройство жилых районов. Архитекторы полностью отказались от устаревшей системы периметральной обстройки кварталов жилыми домами, основанной на различных сочетаниях парадных осевых композиций и применении ордерных систем, и перешли к поискам

совершенно новых приемов, к созданию микрорайонов с многоступенчатой системой обслуживания населения.

Первое время получил большое распространение прием так называемой «свободной планировки», но в подавляющем большинстве случаев это привело к невыразительной застройке не только пространства самого микрорайона, но и первую очередь улиц и магистралей.

В республике был произведен пересмотр всех действующих типовых проектов. В типовые проекты жилых домов были внесены существенные улучшения. Одновременно с усовершенствованием старых разработаны новые серии типовых проектов жилых домов для городского и сельского строительства. В проектах применен сборно-монолитный железобетонный каркас с кирпичным заполнением. Эти жилые дома выгодно отличаются от всех предыдущих лучшей планировкой квартир и архитектурой, больше отвечают требованиям, предъявляемым к современному южному жилью.

В начале 60-х годов в результате творческой перестройки архитекторов республики, обусловленной борьбой с излишествами и украшательством, произошли существенные изменения в застройке города Душанбе.

Значительное увеличение капитальных вложений на жилищное строительство, переход строительства на индустриальные рельсы, применение типовых проектов зданий и сооружений обеспечили мощный рост города, формирование его новых жилых районов на правом берегу реки Душанбинки. Были созданы серии жилых домов, имеющих улучшенную планировку квартир, разработано много индивидуальных проектов жилых домов для застройки главных улиц города, которые существенно обогатили его архитектурный облик.

В 1962 г. к разработке генерального плана города приступил институт «Таджикгипрострой». Генплан города с расчетной численностью населения 460 тыс. жителей (на 1980 г.) был закончен в 1965 году (авторский коллектив: архитекторы В.В. Пекарский, С.Н. Самонина, И.Е. Ткачев, инженеры Т.Ф. Терещенко, В.И. Бирюков) и утвержден Советом Министров Таджикской ССР в 1966 г. Генеральный план 1965 г. сыграл большую положительную роль в формировании планировочной структуры города, в выработке основ планировки и застройки общегородского центра, в развитии сетей транспортных магистралей.

Вместо мелких жилых кварталов, застроенных по периметру, стали возникать новые жилые образования – микрорайоны со свободно разме-

щенными типовыми жилыми домами. Существенное влияние на формирование архитектурного облика Душанбе оказали построенные в 60-е годы жилые и общественные здания с качественно новыми архитектурными и конструктивными решениями: жилые дома на ул. Ленина со встроенными учреждениями обслуживания, гостиница «Душанбе», здания железнодорожного вокзала и аэровокзала и др. В соответствии с генпланом города началось строительство жилых домов повышенной этажности. Более комплексно стали застраиваться микрорайоны, все большее внимание уделялось их благоустройству и озеленению.

В 1970 г. был проведен конкурс на реконструкцию центра города Душанбе.

К 50-летию образования Таджикской ССР в Душанбе введен в эксплуатацию ряд новых жилых комплексов и отдельных крупных зданий и сооружений. Так, была проделана работа над архитектурным ансамблем Выставки достижений народного хозяйства Таджикской ССР, который входит органической составной частью в парковую зону центра города Душанбе.

В основу архитектурной композиции ансамбля выставки положен принцип максимального использования территории. Главные павильоны выставки располагаются в наиболее высокой части участка, хорошо просматриваемой со всех сторон на фоне Гиссарского горного хребта. Почти всегда убеленный сединами величавый Гиссарский хребет окаймляет Душанбе с севера и является источником потоков прохладного воздуха, которые тихими ночами освежают город. В комплексе выставки – ресторан на 250 мест. Первый этаж ресторана отводится в основном для размещения хозяйствственно-административных и складских помещений, гардероба и маленького бара. Собственно, ресторан расположен на втором этаже. Двухсветный проем, через который входят посетители, делит объем на две части. Большой зал, решенный в двух уровнях, перекрыт пространственной плитой, отделанной алюминием. Его летняя площадка связана с первым этажом открытой лестницей. Банкетный зал рассчитан на 80 человек. Для отделки здания применены гранит, мрамор и ракушечник.

Еще одним из крупнейших сооружений правобережной части Душанбе является Дворец культуры Таджикского Совета Профсоюзов (ныне Таджикская государственная филармония). Его объемно-пространственная композиция обусловлена местоположением. Это 3-этажное квадратное в плане здание с внутренним двориком и выступающей сценической коробкой. Большая часть его первого этажа не застроена и служит проходом в парк.

В 1970 г. был проведен всесоюзный конкурс на планировку и застройку центра города Душанбе. По результатам конкурса разработка проекта детальной планировки центра была поручена институту «Гипророг» (Москва). Проект был закончен в 1979 году и с большими оговорками утвержден (авторский коллектив: архитекторы В.С. Высоцкий, Г.В. Теребинский, инженер Л.А. Козлова). Архитектурно-планировочная организация центра в этом проекте базируется на двух основных композиционных пересекающихся осях - меридиональной, проходящей вдоль реки Душанбинки по высокой левобережной террасе и широтной – вдоль Большого Гиссарского канала. В настоящее время начата застройка и ведется реконструкция отдельных узлов будущего общегородского центра, а историческим этапом в формировании планировки и застройки города станет выход его центра на левобережную высокую бровку реки Душанбинки, занятую пока различными складскими и коммунальными объектами.

За годы советской власти на месте древнего глинобитного кишлака вырос современный город с развитой промышленностью, с центрами науки, образования и культуры. Его предприятия производят 32 % валовой продукции промышленности республики. Изделия столичных предприятий известны всей стране и далеко за ее пределами. Это высококачественные хлопчатобумажные и шелковые ткани, холодильники, ткацкие станки, оборудование для сельхозмашин, изделия пищевой промышленности, нефтяное оборудование, трикотажные, швейные и кожевенные изделия. В городе имеется 29 научно-исследовательских институтов Академии Наук Таджикской ССР и других ведомств, 82 общеобразовательные школы, 146 детских дошкольных учреждений, 8 высших и 9 средних специальных учебных заведений, 5 театров, филармония с концертным залом, 24 библиотеки, 25 кинотеатров и др. [3].

Широкий размах получило жилищное строительство. Жилой фонд города составляет в настоящее время около 5,2 млн. м<sup>2</sup> общей площади. Ежегодно вводится в эксплуатацию около 200 тыс. м<sup>2</sup> общей площади.

Значительное внимание за последнее десятилетие было уделено благоустройству, озеленению и инженерному оборудованию города. Построены новые городские магистральные улицы: Путовского, Правды, Негмат Карабаева, Профсоюзов, Коваля, Шамси, Крымова, Ахмада Дониша и др., подверглись коренной реконструкции ул. Ленина, Айни, Дружбы народов, Коммунистическая и др. Появились первые транспорт-

ные путепроводы, подземные пешеходные переходы. Заложены новые парки (Победы, Дружбы народов), построено или реконструировано множество скверов и бульваров. Проложены десятки километров инженерных коммуникаций. Возведено много памятников и монументов: Айни, Авиценне, Турсун-Заде, мемориальный комплекс в парке Победы и др. Все эти сооружения существенно преобразили и обогатили архитектурный облик Душанбе, придали ему черты крупного столичного города [4].

Являясь одной из столиц мира, Душанбе предстоит в ближайшее время решить огромный пласт сложных проблем системы жизнеобеспечения – интенсивное градостроительство, решение проблем транспортных коммуникаций, сохранение тенденций к увеличению автотранспортного парка столицы, реконструкция инженерных коммуникаций и водопроводных сетей, развитие туризма, что потребует строительства современных отелей, создание соответствующей инфраструктуры для функционирования всего комплекса промышленной, социальной и культурной жизни. Не на последнем месте стоит и проблема озеленения и благоустройства города.

Неумолимо бежит время. С каждым годом меняется облик города, хорошеет столица, украшением которой являются её улицы, парки, скверы, площади. Главным градообразующим и величественно-архитектурным центром Душанбе остается проспект Рудаки – улица, по которой можно изучать не только историю самой столицы, но и всего Таджикистана. Именно здесь сосредоточена основная административная и культурная жизнь, именно здесь решаются важнейшие политические вопросы международной и внутренней политики Таджикистана. Формирование новой архитектуры занимает важное место в решении народно-хозяйственных задач Душанбе. Еще в 2002 году Президент Таджикистана Э.Ш. Рахмонов на территории военного городка, расположенного в центре города, заложил капсулу, на месте которой построен комплекс зданий различного назначения. В нем центральное место занимает Дворец Наций. Возведен мемориальный ансамбль Исмоили Сомони, тем самым центральная площадь столицы еще более преобразилась. Архитектурно-пространственная композиция центра города создана с удачным использованием рельефа местности, богатой палитры зелени и водоёмов. Построены фонтаны, посажены цветники и газоны. Здесь же для отдыха горожан и гостей столицы разбиты минискверы.

Основные проспекты и улицы города приняли облик современных автомагистралей со всей необходимой инфраструктурой — новыми

остановками с нижней и верхней подсветкой, рекламными щитами, газонами, клумбами.

Парк с развлекательным комплексом «Пойтахт-80» в центре столицы на пересечении проспекта Сомони и улицы Ахори общей площадью 10 гектаров – одна из достопримечательностей Душанбе. Символизируя юбилей столицы Таджикистана в парке, сооружены 80 террас со светомузыкальной композицией, 80-струйный фонтан, аква- и лесопарки, переходные лестницы, детские аттракционы, концертные площадки, выставочные залы.

Благоприятные рельефно-природные условия создают прекрасный и неповторимый силуэт города. Продолжаются работы по строительству новых университетских и медицинских городков, возводятся современные гостиницы, вводятся в строй крупные торговые комплексы, построены красивые многоэтажные жилые здания, новый облик приобретет Центральный парк культуры и отдыха, реконструируются действующие и построенные новые путепроводы, улицы и мосты, возрастёт протяжённость маршрутов общественного транспорта [5].

Трудно перечислить все строящиеся и намеченные к строительству в ближайшие годы объекты, но понятно одно, что Душанбе может быть

прекрасен не только в истории, но и в настоящем, и что весьма важно стать им и в будущем. Мир, воцарившийся на земле Таджикистана, позволит превратить столицу в современный и развивающийся мегаполис со всей необходимой экономической, социальной и культурной инфраструктурой, которые придаут Душанбе неповторимый архитектурный облик.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веселовский В.Г. Таджикская советская архитектура // Таджикская ССР. Энциклопедия. Изд. 2-е. Душанбе: ТСЭ, 1984. 452 с.
2. Веселовский В.Г., Мукимов Р.С., Мамадназаров М.Х., Мамаджанова С.М. Архитектура Советского Таджикистана. М: Стройиздат, 1987. 319 с.
3. Панфилов О.М., Дубовицкий В.Н. Душанбе – молодой и древний. М.: Душанбе: Адиб, 1991. 247 с.
4. Аитоненко Б.А. История Таджикской ССР. М.: Душанбе: Маориф, 1983. 397 с.
5. Хакимов Х.Х. История архитектуры XX века. М.: Душанбе: ТТУ, 2003. 215 с.

---

**Bragina N.Yu.**

### INVESTIGATION OF URBAN DEVELOPMENT AND DIRECTIONS DUSHANBE

*The capital of Tajikistan - Dushanbe city – today is a modern comfortable city. Surprisingly, in the twenties of the last century were only the ancient village. In this regard, an extremely interesting issue is the study of urban planning of the city of Dushanbe. The study identified the main directions of development of the city, the peculiarities of its architecture. Studied architectural and construction practices that were typical for a developing city. The issue housing development in Dushanbe.*

**Keywords:** architecture, construction, development, urban planning, master plan, composition, structure.

---

**Брагина Нафиса Юнусовна**, старший преподаватель кафедры Архитектура и Дизайн.

Таджикский Технический Университет имени академика М.С. Осими.

Адрес: 734042, Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10.

E-mail: nikakoz123@gmail.com

Кущев Л.А., д-р техн. наук, проф.,  
Никулин Н.Ю., аспирант,  
Алифанова А.И., доц.,  
Яковлев Е.А., канд. техн. наук, доц.,  
Щекин И.И., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ ЖКХ\*

Nick\_973gt@mail.ru

Рассматривается необходимость применения теплообменных аппаратов в системах теплоснабжения ЖКХ и энергетики. Уделено особое внимание главной задаче по разработке теплообменных аппаратов – повышению коэффициента теплопередачи. Рассмотрены основные способы повышения коэффициента теплопередачи. Подробно представлены исследования турбулизации нагреваемой жидкости в межтрубном пространстве кожухотрубного теплообменного аппарата для систем ЖКХ и энергетики. Изложены результаты теоретических исследований изменения турбулизации при различных конфигурациях геометрии поверхности теплообмена. Предложено расположение элементов теплообменной поверхности с учетом конструкции аппаратов, исполненных по ГОСТ 27590.

**Ключевые слова:** турбулизация, теплообменный аппарат, ребро круглого сечения, теплопередача.

**Введение.** Применение теплообменных аппаратов в системах ЖКХ необходимо главным образом для нужд горячего водоснабжения (ГВС), что регламентировано № 417-ФЗ от 07.12.2011 г. Согласно этому закону, все реконструируемые и вновь строящиеся объекты должны быть подключены к системе ГВС по открытой схеме. Данное требование подразумевает непосредственное использование теплообменных аппаратов. В системах теплоснабжения ЖКХ и энергетики в основном используются кожухотрубные теплообменные аппараты, производимые по ГОСТ 27590. При этом теплообменный аппарат может быть расположен: в индивидуальном тепловом пункте, в центральном тепловом пункте, источнике тепловой энергии (котельной, ТЭЦ, АЭС).

Применение теплообменных аппаратов также широко распространено на ТЭС и ТЭЦ, АЭС для приготовления теплоносителя на отопление, вентиляцию, ГВС и технологические нужды [1].

Основной проблемой при разработке теплообменных аппаратов является повышение коэффициента теплопередачи  $k$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \text{ К})$ , – важнейшей характеристики аппарата. Добиться этого возможно несколькими способами: изменением геометрии теплообменной поверхности; выбором надлежащего гидродинамического режима; применением внешней энергии (ультразвук, электромагнитное поле); комбинированными способами (изменение геометрии теплообменной

поверхности плюс применение ультразвука) и т.д. [2–4].

Именно выбор верных технических решений позволит сконструировать теплообменные аппараты для различных температурных и гидравлических режимов и, соответственно, расширить их применение в теплоснабжении и других сферах промышленности [5–8].

Представляет интерес использование способа изменения геометрии теплообменной поверхности. В корпусе кожухотрубного теплообменного аппарата расположены теплообменные трубы с системой перегородок для закручивания потока жидкости. Самыми распространенными являются теплообменные аппараты с гладкими трубками, с профильными применяются крайне редко.

**Методика.** Основной проблемой теплообмена горячей твердой поверхности и холодной жидкости является характер режима обтекания. В классических работах Кутателладзе С.С., Жукаускаса А.А., Шлихтинга Г., Хинце И.О. [9–11] установлено, что при обтекании потоком жидкости цилиндра, начиная с  $Re = 60$ , за кормовой частью образуется зона завихрений, а при  $Re = 5000$  и выше за кормовой частью – полное турбулентное перемешивание. Это приводит к уменьшению толщины ламинарного подслоя жидкости у пластины, а, следовательно, увеличению передачи теплоты через этот слой.

В отличие от схемы, в которой рассмотрено обтекание вертикального стержня [6], нами предложена схема обтекания круглого цилиндра, за которым образуется зона повышенной турбулизации потока (рис. 1). Круглый цилиндр является

элементом оригинального кожухотрубного теплообменного аппарата (патент РФ №149737), разработанного в БГТУ им. В.Г Шухова (г. Белгород) на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции.

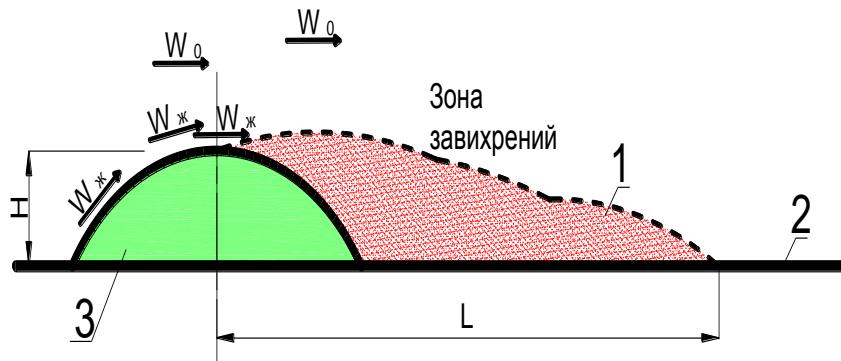


Рис. 1. Развитие вихревого движения жидкости за ребром цилиндрической формы при омывании

1 – зона завихрений и повышенной турбулизации, 2 – пластина, 3 – ребро цилиндрической формы;

$W_*$  – касательная скорость при омывании ребра цилиндрической формы, м/с,  $W_0$  – скорость основного потока жидкости, м/с

Представляет интерес изучение влияние величины скорости жидкости, регламентируемой [12] на величину турбулизации нагреваемой жидкости, а также влияние длины зоны завихрений.

Нами проведен вычислительный эксперимент изучения влияния гидродинамических характеристик потока межтрубного пространства на турбулизацию потока и длину зоны завихрений. Исследование производилось при помощи программного комплекса «Ansys CFX». Данное программное обеспечение предназначено для вычислений в гидродинамике [13, 14].

**Основная часть.** Особенностью предложенного нами кожухотрубного теплообменного аппарата являются теплообменные трубы, оснащенные пластинами с расположенным на них ребрами цилиндрической формы [15]. Оснащение пластин 2 ребрами 3 позволяет увеличить теплообменную поверхность и создать дополнительную турбулизацию потока нагреваемой жидкости при обтекании этих ребер [16]. Важно отметить, что расстояние между ребрами 1 и высота ребер  $H$  – новые конструктивные параметры теплообменного аппарата, которые необходимо определить для скоростных режимов эксплуатации, регламентированных [12] (рис. 2).

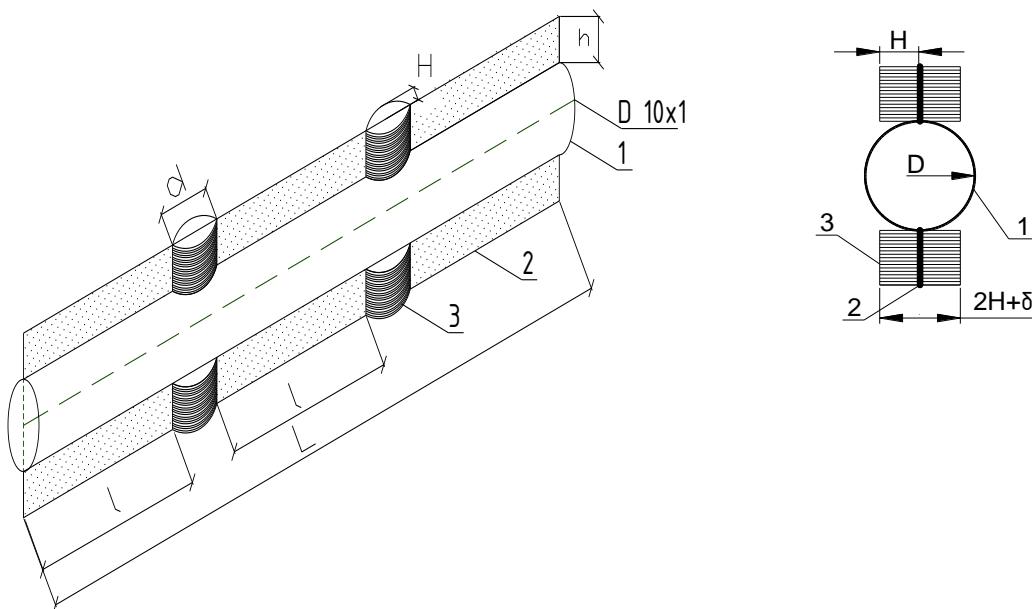


Рис. 2. Элемент теплообменной поверхности кожухотрубного теплообменного аппарата

1 – трубка, 2 – пластина, 3 – ребра цилиндрической формы

Для начальной стадии определения оптимальных геометрических параметров кожухотрубного теплообменного аппарата был проведен поисковый вычислительный эксперимент [13] с геометрическими размерами:  $d = 8$  мм,  $H = 4$  мм. На основании этого эксперимента для дальнейших исследований приняты следующие исходные данные:

1) при скорости 1 м/с зона завихрений, образующаяся за ребром, охватывает значительную лобовую часть следующего ребра, то вероятно предположить, что зона завихрений может быть длиннее расстояния  $9H$  при скорости 1 м/с. Поэтому целесообразно провести исследование при расстоянии, большем 40 мм между ребрами круглого сечения, которое составит 70 мм.

2) максимальная высота (радиус) ребра круглого сечения должна быть такой, чтобы ребра не выходили за габариты теплообменной трубы (рис.2), т.е. должно соблюдаться условие:

$2H+\delta \leq D$ . Согласно [17],  $D = 16$  мм. Данному условию соответствуют следующие значения:  $H=7,5$  мм (максимальное значение),  $\delta = 1$  мм. Поэтому исследовалась длина и высота зоны завихрений при различной высоте ребра: 2 мм и 6 мм (шаг 2 мм);

3) необходимо изучить влияние повышенной скорости жидкости в межтрубном пространстве большей, чем 1 м/с, на длину и высоту зоны завихрений, так как с увеличением скорости жидкости, обтекающей твердую поверхность, повышается и коэффициент теплопередачи [6]. Для исследований принимаем значение скорости – 1,3 м/с.

Результаты исследований представлены в виде графического распределения интенсивности турбулизации при различных скоростях поперечного обтекания ребер круглого сечения (рис. 3–5).

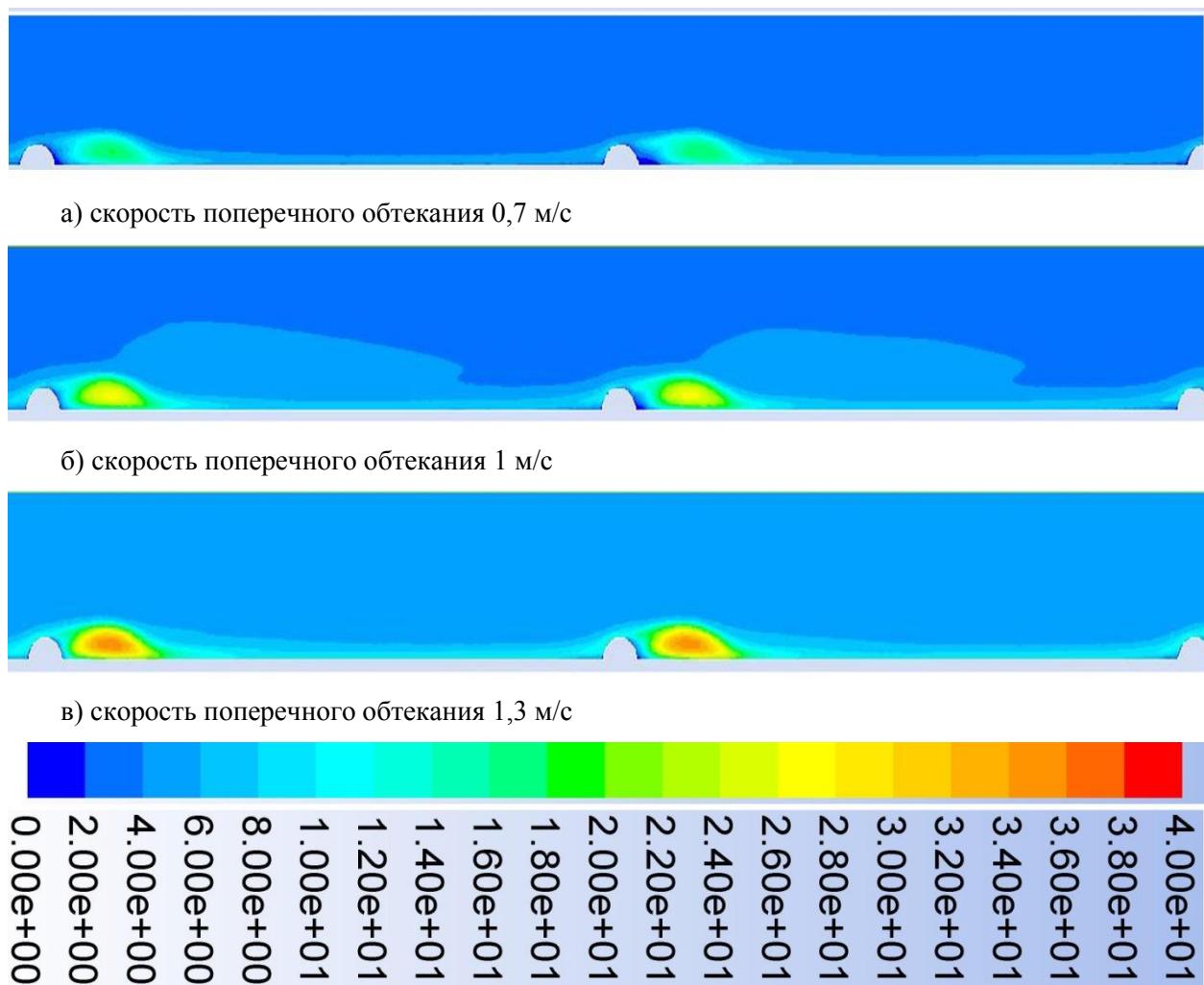


Рис. 3. Графические распределения степени турбулентности потока при различных скоростях поперечного обтекания ребер цилиндрической формы высотой 2 мм

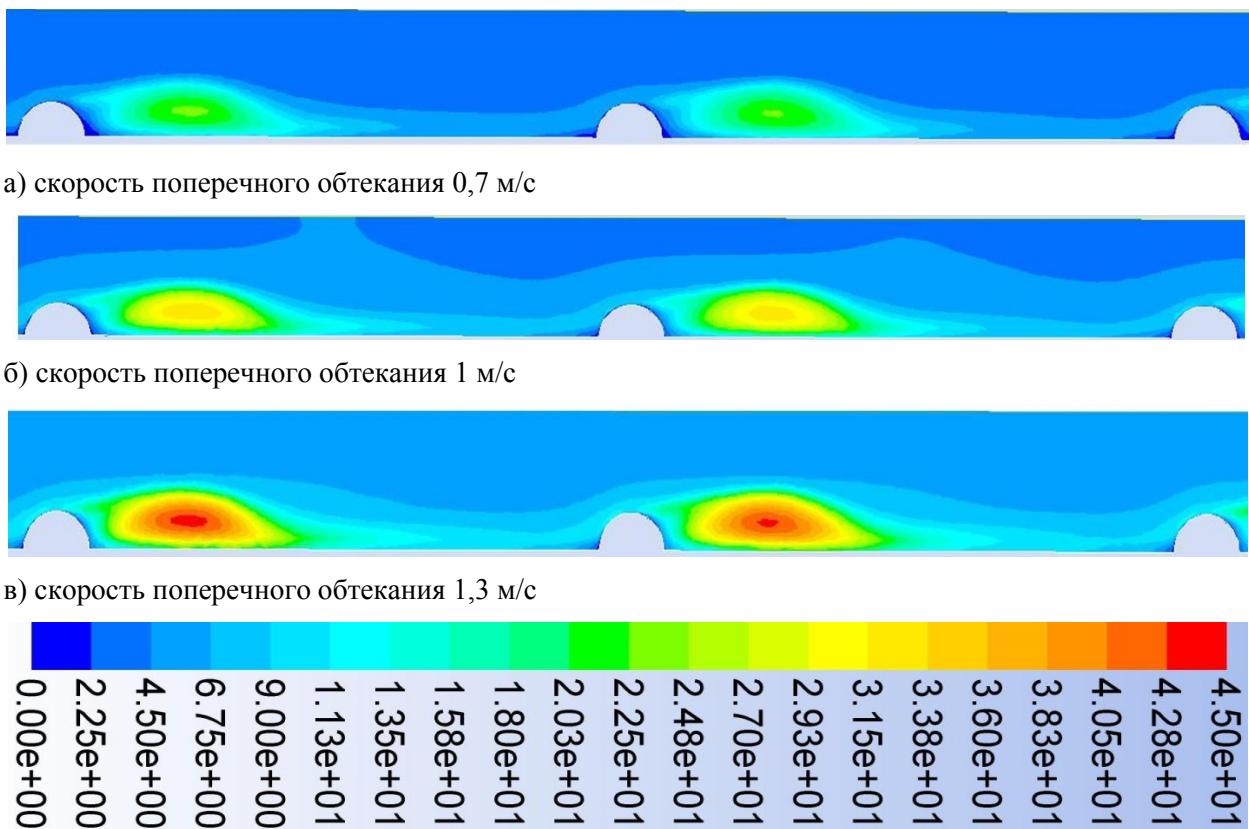


Рис. 4. Графические распределения степени турбулентности потока при различных скоростях поперечного обтекания ребер цилиндрической формы высотой 4 мм

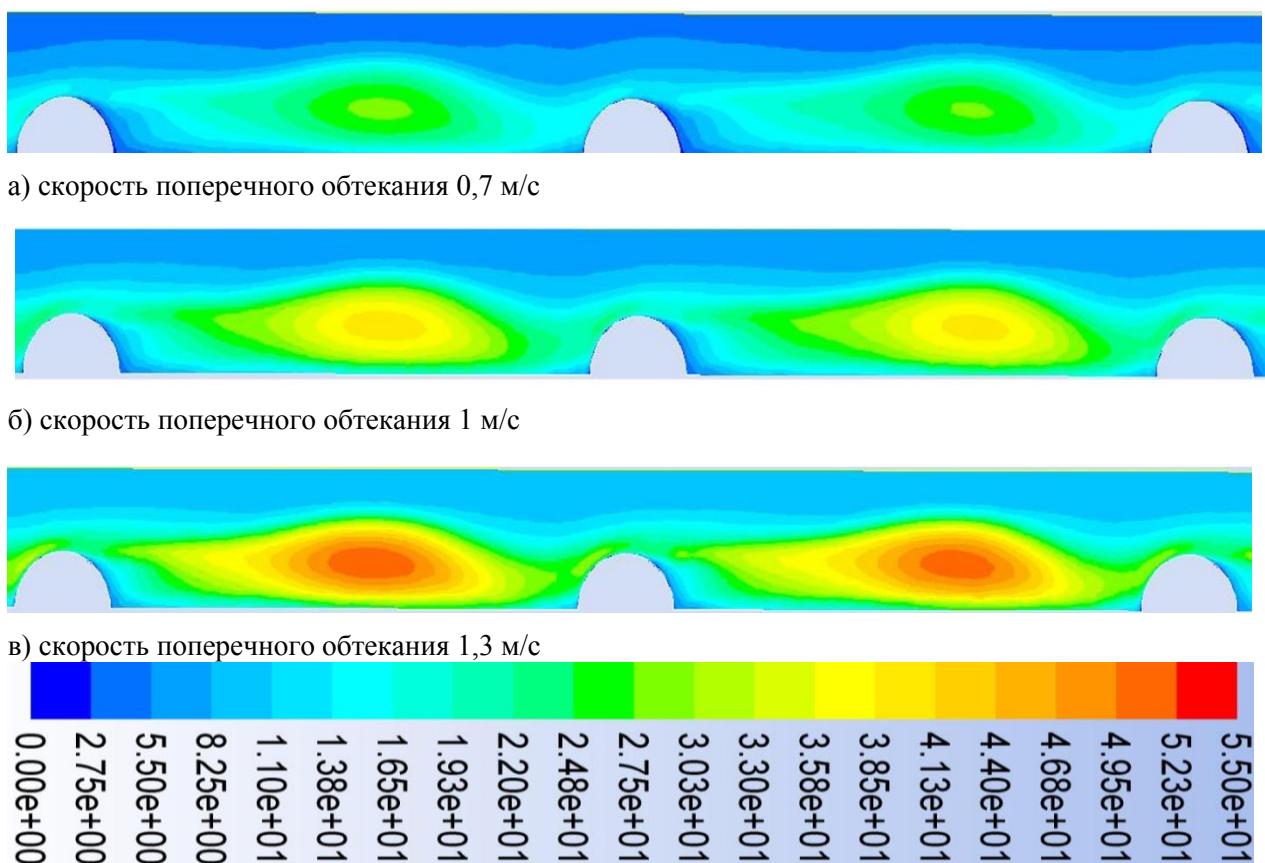


Рис. 5. Графические распределения степени турбулентности потока при различных скоростях поперечного обтекания ребер цилиндрической формы высотой 6 мм

Значение турбулизации потока принимается равным 10 %, так как при данном значении поток принято считать высокотурбулизированным [6].

После измерений длины зоны турбулизации для каждого случая (при высоте ребра 2, 4, 6 мм и скоростях потока 0,7; 1,0; 1,3 м/с) получены следующие значения относительной длины  $l_0$

зоны турбулизации (представлены в таблице 1), которые рассчитываются:

$$l_0 = \frac{l_{TU}}{H} \quad (1)$$

где  $l_{TU}$  – длина зоны завихрений.

Таблица 1

**Геометрические характеристики зоны повышенной турбулизации**

Высота ребра круглого сечения, мм	Относительная длина зоны турбулизации при скорости потока, м/с			Высота зоны турбулизации над пластиной при скорости потока, м/с		
	0,7	1	1,3	0,7	1	1,3
2	8,75	10,94	11,65	3,51	3,52	3,58
4	8,85	11,56	13,80	6,82	7,29	7,77
6	9,43	9,76	10,29	12,1	Свыше 15 мм	

В ходе вычислительного эксперимента получены следующие результаты:

1. Относительная длина зоны повышенной турбулизации для ребер с высотой (диаметром) 2, 4 и 6 мм и скоростями потока 0,7; 1 и 1,3 м/с лежит в пределах 12Н, как и указано в [6].

2. Высота зоны повышенной турбулизации для ребра высотой 2 мм в пределах значений скоростей 0,7; 1 и 1,3 м/с меняется незначительно (увеличение при каждом повышении скорости на 0,3 м/с не превышает 1,7 %).

3. Высота зоны повышенной турбулизации при высоте ребра 4 мм в пределах значений скоростей 0,7; 1 и 1,3 м/с меняется в среднем на 7 %.

Из анализа результатов вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что увеличение теплообмена (в конечном итоге коэффициента теплопередачи К) в кожухотрубном аппарате с измененной геометрией теплообмена [15] будет достигнуто при высоте ребра 4 мм, скорости 0,7–1,3 м/с, длине зоны завихрений 12 Н. При этом будет решена основная задача кожухотрубного теплообменного аппарата – нагрев большего количества теплоносителя при одинаковых габаритных размерах существующих теплообменных аппаратов.

Для проверки эффективности работы кожухотрубного теплообменного аппарата разработана полупромышленная установка «Независимая система отопления многоэтажного жилого дома», (рис. 6).

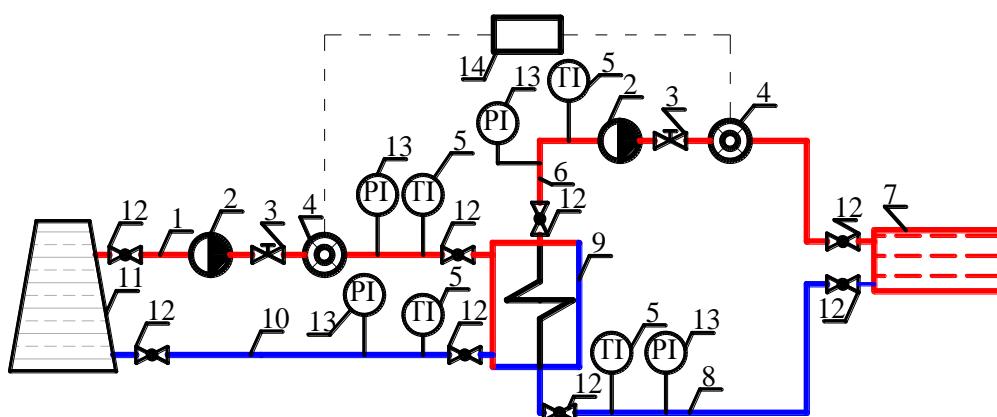


Рис. 6. Независимая система отопления многоэтажного жилого дома

1 – подающий трубопровод от источника теплоснабжения, 2 – циркуляционный насос, 3 – регулирующее устройство, 4 – расходомер, 5 – термометр, 6 – подающий трубопровод от теплообменного аппарата, 7 – потребители, 8 - обратный трубопровод от системы отопления, 9 - теплообменный аппарат, 10 – обратный трубопровод к источнику теплоснабжения, 11 – источник теплоснабжения, 12 – отключающее устройство (шаровый кран), 13 – манометр, 14 – тепловычислитель

Основной целью эксперимента является исследование высокоэффективного кожухотрубного теплообменного аппарата с выполнением требований СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов». Режимы работы аппарата приняты согласно температурам наружного воздуха, определяемым СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* (с Изменением N 2)». Исследования проведены для температурного графика отпуска тепловой энергии от отопительной котельной пгт. Майский Белгородского района (водогрейные котлы: 3 котла «Энтророс» и 2 котла «АВ-4»).

**Выводы.** Следовательно, для интенсификации теплообмена в кожухотрубных теплообменных аппаратах целесообразно изменение геометрии теплообменной поверхности, что позволит турбулизировать поток нагреваемой жидкости. Это в конечном итоге приведет к повышению коэффициента теплопередачи кожухотрубного теплообменного аппарата.

\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стерман Л.С., Тевлин С.А., Шарков А.Т. Тепловые и атомные электростанции. Учебник для ВУЗов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Энергоиздат, 1982. 456 с.
2. Алхасова Д.А. Исследование и гидродинамические расчеты внутриставажинных теплообменников с продольными ребрами : дисс. канд техн. наук. Махачкала. 2009. 143 с.
3. Угрюмова С.Д., Попова Е.Ю., Акимов С.А. Интенсификация процессов нагревания и охлаждения в компактных теплообменных аппаратах // Научные труды Дальрыбвтуза. 2011. № 33. С. 204–210.
4. Киреев В.В. Научные основы и практические результаты повышения эффективности теплообменных аппаратов : дисс. докт. техн. наук. Ангарск. 2006. 337 с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: «Энергия», 1977. 344 с.
6. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
7. Александрова А.А., Кузнецова И.К., Дмитриев Е.А. Оптимальные по технико-экономическим критериям конструкции кожухотрубных теплообменников, полученные с помощью графического метода // Успехи в химии и химической технологии. 2007. №2. Т. 21. С. 62–66.
8. Taborek J. Evolution of heat exchanger design techniques // Heat Transfer Eng. 1979. №1. Pp. 15 – 29.
9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1973. 416 с.
10. Шлихтинг Г., Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
11. Hinze J.O. An introduction to its mechanism and theory. London.: McGraw-Hill book company, 1959. Р. 680.
12. СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов». М., 1995. 79 с.
13. Кущев Л.А., Никулин Н.Ю., Феоктистов А.Ю., Яковлев Е.А. Интенсификация тепловых процессов в кожухотрубном теплообменном аппарате // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2016. №3. С. 9–17.
14. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. № 8. Pp. 1598–1600.
15. Пат. 149737 Российской Федерации МПК F28D 7/100/ Кожухотрубный теплообменный аппарат / Н.Ю. Никулин, Л.А. Кущев, Д.Ю. Суслов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. №2014134083/06, заявл. 19.08.14, опубл. 20.01.15, Бюл. №2. 4 с.
16. Никулин Н.Ю., Кущев Л.А., Семенок В.С. Разработка кожухотрубного теплообменного аппарата с измененной геометрической поверхностью [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.scienceforum.ru/2015/pdf/17842.pdf> (дата обращения 14.07.17).
17. ГОСТ 27590-2005. Подогреватели кожухотрубные водо-водяные систем теплоснабжения. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 24 с.

**Kushchev L.A., Nikulin N.Yu., Alifanova A.I., Yakovlev E.A., Shchekin I.I.**

## MODERN METHODS OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION IN SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGERS HOUSING AND UTILITIES

*The article is devoted to necessity of application of heat exchangers in heating systems, utilities and energy. Special attention is given to the main task of the development of heat exchangers. It is the increase of heat transfer coefficient. ways of improving heat transfer coefficient are considered. Investigated the turbulence of the heated fluid in the annular space of shell and tube heat exchanger for utilities and energy. The results of theoretical studies of turbulence changes with different configurations of the geometry of the heat transfer*

*surface. The proposed location of the elements of the heat exchange surface, including the design of devices made according to State standard 27590 (RF).*

**Keywords:** *turbulence, heat exchanger, fin of circular cross section, heat transfer*

---

**Кущев Леонид Анатольевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: Nick\_973gt@mail.ru

**Никулин Николай Юрьевич**, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: Nick\_973gt@mail.ru

**Алифанова Алла Ивановна**, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: tgv@intbel.ru

**Яковлев Евгений Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: agd@intbel.ru

**Щекин Илья Игоревич**, аспирант кафедры энергетики теплотехнологии.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: snake6009@gmail.com

*Графкина М.В., д-р. техн. наук, проф.,  
Свиридова Е.Ю., канд. техн. наук,  
Сафрина Н.А., студент  
Московский политехнический университет*

## АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*evg\_sviridova@mail.ru*

*В настоящее время строительство относится к одной из самых травмоопасных отраслей экономической деятельности. В статье приведены результаты проведенного авторами анализа производственного травматизма в строительстве. Представлена информация о динамике производственного травматизма в строительной отрасли, сведения об уровне травматизма с утратой трудоспособности и со смертельным исходом, в том числе среди женщин и иностранных граждан. В ходе анализа установлено определённое противоречие в требованиях по расследованию несчастных случаев на производстве при дорожно-транспортных происшествиях и предложен подход для разработки более действенных мер по профилактике несчастных случаев на производстве. Авторы считают целесообразным создание примерного перечня мероприятий по охране труда и профилактике производственного травматизма в результате катастроф, аварий или иных повреждений транспортных средств. Выявление основных причин производственного травматизма позволит реализовать эффективный комплекс мероприятий, направленный на снижение и предотвращение несчастных случаев на производстве в строительстве.*

**Ключевые слова:** строительство, несчастный случай на производстве, метод сплошной выборки, коэффициент частоты травматизма, утрата трудоспособности, дорожно-транспортные происшествия, расследование несчастных случаев.

**Введение.** Строительство является одной из крупнейших отраслей экономической деятельности. Состояние строительной отрасли во многом предопределяет общий уровень благосостояния общества и по ее развитию можно судить об уровне экономики в целом. Отрасль в настоящее время характеризуется высокой степенью модернизации, технического перевооружения и оснащения. Использование сложной строительной техники, привлечение значительного количества работающих (табл. 1) по совокупности со спецификой работы (работа на высоте, складирование и перемещение

строительных материалов, наличие на территории траншей, котлованов и др.) предопределяет высокую степень риска производственного травматизма. Актуальность проблемы анализа производственного травматизма в различных сферах подтверждается на отечественном и международном уровне [1–9].

Анализ и выявление основных причин производственного травматизма позволит разработать эффективный комплекс мероприятий, направленный на снижение/предотвращение несчастных случаев на производстве (НСП) в строительстве.

*Таблица 1*

### Среднесписочная численность работающих в строительной отрасли (по данным Роструда)

Год	2010	2011	2012	2013	2014
Численность (тыс. человек)	1532,2	1545,3	1557,0	1488,7	1463,6

**Методология.** При выявлении причин производственного травматизма применяются методы статистического анализа, исследование происходит в несколько этапов сначала идет накопление статистических данных затем их обработка с разбивкой по определенным группам (по годам, по регионам, по отраслям деятельности, по тяжести травматизма, по возрастному признаку и т.д.), затем формулируются выводы и рекомендации. При этом принято для наглядности сгруппированные

табличные сведения представлять в виде диаграмм или графиков.

Зачастую статистических данных по определенному признаку набирается довольно много, что позволяет перейти к выборочному методу (выборка) исследования, когда анализируются не все случаи, а их часть (обычно от 5 до 25 %). При условии, что выборка представлена, она отражает все свойства исследуемой совокупности случаев. Однако при анализе производственного травматизма, видимо

по тому, что речь идет о невосполнимом ресурсе – жизни и здоровье человека, практически всегда используется метод сплошной выборки.

Статистические методы исследования позволяют выявить общее состояние травматизма, его динамику, определенные тенденции и пр. Однако для сокращения НСП требуется детальное исследование обстоятельств каждого несчастья, условий труда, организации охраны труда, организации расследования и др.

В целях получения достоверных сведений о производственном травматизме в строительстве был проведен анализ отчетов и докладов Федеральной службы по труду и занятости (Роструд) [10–17].

**Основная часть.** Анализ данных по

производственному травматизму показал, что по количеству зарегистрированных страховых НСП по данным Фонда социального страхования РФ на примере 2014 г. строительная отрасль занимала третье место (табл. 2) после таких отраслей экономики как: обрабатывающее производство (16 277 страховых случаев) и транспорт и связь (5997 страховых случаев). Отрасли экономической деятельности приведены в соответствии с классификаторами видов экономической деятельности (ОКВЭД), утвержденными приказами Росстандарта (за определенные периоды времени) и применяемыми в показателях мониторинга Роструда в период с 2010–2014 гг.

Таблица 2

**Страховые случаи в строительстве за 2014 год (по данным ФСС РФ)**

Количество страховых случаев	Всего		Несчастные случаи		Случаи, связанные с профзаболеванием	
	4977		4649		328	

Среди пострадавших в результате НСП с утратой работоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом в 2014 г.

есть женщины и иностранные граждане (табл.3, табл.4).

Таблица 3

**Состояние травматизма в строительстве с утратой трудоспособности на 1 рабочий день и более и со смертельным исходом в 2014 году (по данным Роструда)**

Численность пострадавших	Среднесписочная численность работающих (тыс. чел)		Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на 1 рабочий день и более и со смертельным исходом, чел					
	всего	из них женщин	всего	Кч	из них женщин	Кч	из них с лицами в возрасте до 18 лет	иностранных граждан
	1463,6	261,8	2711	1,9	170	0,6	-	75

Таблица 4

**Состояние травматизма в строительстве со смертельным исходом в 2014 году (по данным Роструда)**

Численность пострадавших	Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве со смертельным исходом, чел					
	всего	Кч см	из них женщин	Кч см	из них с лицами в возрасте до 18 лет	иностранных граждан
	282	0,193	11	0,042	-	35

По коэффициенту частоты травматизма Кч (т.е. по коэффициенту, отражающему количество НСП, приходящееся на 1000 работающих) строительство в 2014 г. делило третье место с обрабатывающим производством. Более значимые показатели в этот период был у

следующих отраслей: рыболовство, рыбоводство (Кч =3,0) и сельское хозяйство, охота, лесное хозяйство (Кч =2,3) [13].

По количеству иностранных граждан, пострадавших в результате НСП с потерей трудоспособности на один день и более и со

смертельным исходом в 2014 г. 75 человек, среди них со смертельным исходом – 35 человек, строительство как отрасль экономической деятельности находится на первом месте. В обрабатывающем производстве показатели соответственно – 49 человек и 5 человек, в транспорте и связи – 24 человека и 2 человека. Такой высокий показатель в строительстве, по-видимому, можно объяснить привлечением в отрасль значительного количества рабочих, выходцев из бывших советских республик. Такие

работники имеют зачастую низкий уровень образования, низкую квалификацию и плохое знание русского языка.

По количеству пострадавших женщин по данным мониторинга Роструда за указанный ранее период строительство занимает по коэффициентам частоты – по Кч седьмое место, по Кч см первое место.

В табл. 5 приведена динамика производственного травматизма в строительстве за 2010–2014 гг.

Таблица 5

**Динамика производственного травматизма в строительстве за 2010- 2014 гг.  
(по данным Росстата)**

		Среднесписочная численность работающих (тыс. чел)		Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом, чел	Изменение численности пострадавших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом, чел
год	год	2010	2014		
1532,2	2010	1545,3	2011	4636	-1927
1557,0	2012	1488,7	2013	4482	-601
1463,6	2014	3832	2011	3310	359
2711	2012	3310	2013	2711	371
		2014	2010-2014	2013-2014	2010
					359
					371
					359
					320
					282
					-77
					-38

Анализ данных табл. 6 показывает, что численность пострадавших при НСП с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом за период 2010 – 2014 гг. сократилась на 1927 человек, с 2013 г. по 2014 г. на 601 человек. Численность пострадавших при НСП со смертельным исходом за период 2010 – 2014 г.г. сократилась на 77 человек, с 2013 г. по 2014 г. на 38 человек.

В 2015 г. по сравнению с 2014 г. [12, 13] произошло снижение абсолютного количества погибших в результате НСП. Однако доля НСП с тяжёлыми последствиями и со смертельным исходом для пострадавших в строительстве была наиболее значительной по отношению к другим наиболее традиционно травмоопасным отраслям экономической деятельности. Соотношение НСП со смертельным исходом: в строительстве – более 33 %; в обрабатывающем производстве – более 31 %; транспорт и связь – более 22,5 %; при добыче полезных ископаемых – более 22 %.

В 2016 году в сфере строительства также

отмечено снижение количества погибших в результате НСП с тяжелыми последствиями по отношению к 2015 годом. Но уровень НСП со смертельным исходом в строительстве по-прежнему остался самым высоким среди травмоопасных видов деятельности: в строительстве – 19 %, в обрабатывающем производстве – 18 %, в отрасли сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство – 10 %, на транспорте – 10 %, при добыче полезных ископаемых – 9 %.

Проверки, проведенные Рострудом в 2015 г. по всем видам расследования НСП, выявили значительное количество нарушений нормативно-правовых актов по охране труда в сфере строительства – 84 368 нарушений (доля среди других видов экономической деятельности – 14,4 %). Это нарушения допускались при проведении медицинских осмотров, обучении по вопросам охраны труда, обеспечении работающих СИЗ и др.

Анализ данных по видам происшествий

показал, что долгое время по результатам мониторинга 2010–2014 гг. и статистики за 2015 г. и 2016 г. среди НСП с тяжелыми последствиями на первом месте остается падение пострадавших с высоты соответственно за 2015 г. и 2016 г. на эти происшествия приходится – 27,2 % и 24 %; на втором месте воздействие движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей, машин и т.д. – 24,5 %, 22 %;

на третьем месте транспортные происшествия – 9,2 %, 14 %; на четвертом месте – падение, обрушение, обвалы предметов, материалов, земли и пр. – 11,7 %, 11 %. На другие виды происшествий приходится 27,4 % и 29 %. На рис. 1 приведена диаграмма, отражающая процентное соотношение происшествия с тяжелыми последствиями в 2016 году.

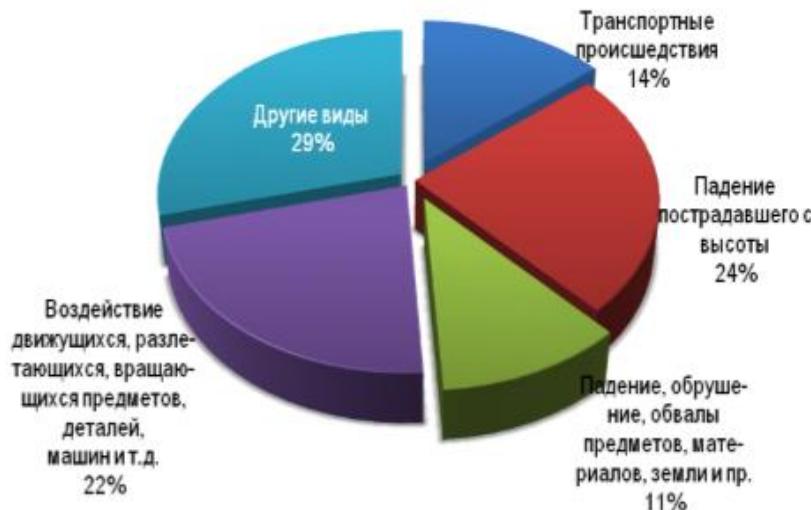


Рис. 1. Виды происшествий с тяжелыми последствиями (по данным Роструда, 2016 г.)

На рис. 2 показана доля различных причин в НСП с тяжелыми последствиями в 2014 г. Как видно из представленной диаграммы, наиболее

распространённой причиной НСП с тяжелыми последствиями является неудовлетворительная организация работ – 30,93 %.



Рис. 2. Распределение причин НСП с тяжелыми последствиями (по данным Роструда, 2014 г.)

В соответствии со ст. 229 Трудового кодекса РФ для расследования несчастного случая, в результате которого один или несколько пострадавших получили смертельные или тяжелые повреждения здоровья, создается

комиссия. В состав ее обязательно входит государственный инспектор труда, он же должен возглавить комиссию, а также представители органа исполнительной власти и исполнительного органа страховщика. Такой

состав комиссии гарантирует тщательность проведенного расследования, верную классификацию НСП и развернутый перечень мероприятий, направленных на предотвращение и исключение подобных несчастных случаев. При этом при заполнении раздела Акта о несчастном случае на производстве «Мероприятия по устранению причин несчастного случая, сроки» используются нормативно-правовые акты, предъявляющие требования к охране труда. Например, «Правила по охране труда при работе на высоте», утвержденные Приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 28 марта 2014 г. № 155н, «Правила проведения земляных работ, установки временных ограждений, размещения временных объектов в городе Москве», утвержденные Правительством Москвы в Постановлении от 19 мая 2015 года № 299-ПП и др.

Однако, та же ст. 229 Трудового кодекса РФ предписывает, что если несчастный случай произошел в результате катастрофы, аварии или иного повреждения транспортного средства, то расследование проводится комиссией, которая создается и возглавляется работодателем. При этом предписывается обязательное использование материалов расследования катастрофы, аварии или иного повреждения транспортного средства, проведенного соответствующим федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по контролю и надзору в установленной сфере деятельности, органами дознания, органами следствия и владельцем транспортного средства. Таким образом, присутствие государственного инспектора труда в комиссии по расследованию НСП даже с тяжёлыми и смертельными последствиями для пострадавших становится не обязательным. Какими-либо подзаконными нормативными правовыми актами данное противоречие не урегулировано [18].

Анализ материалов расследования НСП, произошедших в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП), проведенных в соответствии с указанными требованиями показывает, что в силу обязательного использования материалов ГИБДД, органов дознания и следствия в разделе «Мероприятия по устранению причин несчастного случая, сроки» указываются, как правило, мероприятия, основанные на выполнении требований Правил дорожного движения (ПДД), утвержденные Постановлением Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090.

Рассмотрим, как пример, два несчастных

случаев, которые произошли в 2016 г. в строительных организациях, занимающихся строительством автомагистрали М 11 Москва-Санкт Петербург (пикет № 3644+39.40) и пикеты №№3816-3828. В акте о НСП, произшедшем 08.06.2016 г. указываются нарушения п.п. 1.3, 10.1, 19.2 ПДД, где речь соответственно идет о соблюдении участником дорожного движения требований ПДД; о соблюдении скорости, позволяющей водителю постоянно контролировать транспортное средство для выполнения требований ПДД; об использовании дальнего и ближнего света и действиях водителя при ослеплении. Акт о НСП от 12.09.2016 г. – при расследовании установлено нарушение п.п. 1.5 и 10.1 ПДД, где п.1.5 предписывает участникам дорожного движения действовать таким образом, чтобы не создавать опасности для движения и не причинять вреда. Необходимость оповещения работников о произошедших несчастных случаях и соблюдении ПДД указывается в разделе Акта о НСП «Мероприятия по устранению причин несчастного случая, сроки».

Анализ других материалов расследования НСП, произошедших при ДТП показывает, что они практически не содержат мероприятий, направленных на решение проблем охраны труда, устранение причин подобных происшествий и составлены без учета соответствующих нормативно-правовых актов, предъявляющих требования к проведению этих мероприятий [19].

Необходим примерный «Перечень мероприятий по охране труда и профилактике производственного травматизма в результате катастроф, аварий или иных повреждений транспортных средств» (далее – Перечень), который поможет работодателям при оформлении Акта о несчастном случае на производстве, произошедшем в результате катастрофы, аварии или иного повреждения транспортного средства, даже в отсутствии государственного инспектора труда разработать действенные и эффективные меры по профилактике производственного травматизма и предотвращению причин подобных несчастных случаев. В такой Перечень должны быть включены мероприятия, основанные на нормативно-правовых актах, предъявляющих требования к безопасности транспортных средств, проверке их технического состояния, требования к обучению работающих вопросам охраны труда, режиму труда и отдыха водителя, проведению предрейсовых, межрейсовых и послерейсовых медицинских осмотров и др. Перечень также поможет работодателям чаще обращаться к нормативно-правовым документам, повысит уровень их знаний в области требований

охраны труда. Например, чтобы обеспечить проверку соответствия технического состояния, комплектации автотранспортного средства требованиями нормативно-правовых документов необходимо будет обратиться к Правилам проведения технического осмотра транспортных средств (утв. Постановлением Правительства РФ от 05.12.11 г. № 1008 «О проведении технического осмотра транспортных средств»), ГОСТ Р 51709 «Автотранспортные средства», Техническому регламенту Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств», утв. решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.11 № 877), Межотраслевым правилам по охране труда на автомобильном транспорте ПОТ РМ-027-2003 и другим документам. Для установления и соблюдения режимов труда и отдыха водителей транспортных средств, а также для разработки при необходимости графика движения по времени и на движение и стоянку транспортного средства необходимо действовать в соответствии с Положением об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха водителей автомобиля, утв. Приказом Министерства транспорта РФ от 20.08.2004 г. №15; Межотраслевыми правилами по охране труда на автомобильном транспорте ПОТ РМ 027-2003 и др. Важно предусмотреть в Перечне необходимость повышения квалификации водителей транспортных средств на основании требований Федерального закона от 10.12.1995г. №196-ФЗ «О безопасности Дорожного Движения», согласно которому юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны создавать условия для повышения квалификации водителей и других работников, обслуживающих и эксплуатирующих автомобильный транспорт и обеспечивающих безопасность дорожного движения (ст. 20), а также требований к профессиональной подготовке водителей, которые содержатся в Приказе Министерства транспорта РФ от 15.01.2014 г. № 7.

**Выводы.** Проведенный анализ производственного травматизма в сфере строительства показал, что строительство относится к одной из самых травмоопасных отраслей, где, несмотря на тенденцию к снижению общего количества НСП и НСП с тяжелыми последствиями и смертельным исходом, уровень по отношению к другим видам экономической деятельности остается довольно высоким. Выявленные виды происшествий позволяют работодателям сосредоточить внимание на наиболее «узких местах» и провести необходимые профилактические мероприятия по

дальнейшему сокращению НСП. Установлено определённое противоречие в требованиях по расследованию несчастных случаев на производстве при ДТП и предложен подход, основанный на более глубоком изучении требований нормативно-правовых актов для разработки более действенных мероприятий по профилактике НСП.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rules of the Game: a brief introduction to International Labour Standards [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_norm/-normes/documents/publication/wcms\\_318141.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_norm/-normes/documents/publication/wcms_318141.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
2. Compendium of International Labour Conventions and Recommendations [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_norm/-normes/documents/publication/wcms\\_413175.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_norm/-normes/documents/publication/wcms_413175.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
3. Handbook of procedures relating to international labour Conventions and Recommendations [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_norm/-normes/documents/publication/wcms\\_192621.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_norm/-normes/documents/publication/wcms_192621.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
4. David Tajgman, Catherine Saget, Natan Elkin and Eric Gravel Rights at work in times of crisis: Trends at the country level in terms of compliance with international labour standards [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_emp/-emp\\_elm/documents/publication/wcms\\_167804.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_emp/-emp_elm/documents/publication/wcms_167804.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
5. Guide to international labour standards [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_norm/-normes/documents/publication/wcms\\_246944.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_norm/-normes/documents/publication/wcms_246944.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
6. Fundamental rights at work and international labour standards [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_norm/-normes/documents/publication/wcms\\_087424.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_norm/-normes/documents/publication/wcms_087424.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
7. International labour standards: a global approach [Электронный ресурс]. URL:[http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed\\_norm/-normes/documents/publication/wcms\\_087692.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_norm/-normes/documents/publication/wcms_087692.pdf) (дата обращения: 22.04.2017).
8. Графкина М.В., Михайлов В.А., Нюнин

Б.Н. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобилестроение и тракторостроение». Москва, 2002. 416 с.

9. Николаенко Т.М., Николаенко Н.Н. Оценка экономической эффективности от мероприятий по охране труда в строительных организациях // Сибирский торгово-экономический журнал. 2009. № 8. С. 28–30.

10. Доклад об осуществлении государственного надзора за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права, и надзора в сфере социальной защиты населения за 2016 год. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/doklad\\_y-ob-osushchestvlenii-i-effektivnosti-federalnogo-gosudarstvennogo-nadzora-za-soblyudeniem-tru/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/doklad_y-ob-osushchestvlenii-i-effektivnosti-federalnogo-gosudarstvennogo-nadzora-za-soblyudeniem-tru/) (дата обращения: 27.04.2017).

11. Доклад об осуществлении и эффективности в 2015 году государственного надзора и контроля в сфере труда и социальной защиты населения. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/doklad\\_y-ob-osushchestvlenii-i-effektivnosti-federalnogo-gosudarstvennogo-nadzora-za-soblyudeniem-tru/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/doklad_y-ob-osushchestvlenii-i-effektivnosti-federalnogo-gosudarstvennogo-nadzora-za-soblyudeniem-tru/) (дата обращения: 27.04.2017).

12. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2015 год [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/otchet\\_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/otchet_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/) (дата обращения: 27.04.2017).

13. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2014 год [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/otchet\\_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/otchet_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/) (дата обращения: 27.04.2017).

14. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2013 год [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/otchet\\_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/otchet_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/) (дата обращения: 27.04.2017).

15. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2012 год [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/otchet\\_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/otchet_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/) (дата обращения: 27.04.2017).

16. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2011 год [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/otchet\\_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/otchet_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/) (дата обращения: 27.04.2017).

17. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2010 год [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rostrud.ru/press\\_center/doklady/otchet\\_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/](https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/otchet_y-o-deyatelnosti-federalnoy-sluzhby-po-trudu-i-zanyatosti/) (дата обращения: 27.04.2017).

18. Богомазов А. Особенности и проблемы расследования несчастных случаев на производстве, произошедших в результате дорожно-транспортных происшествий // Социальное партнерство. 2013. № 4 (26) 59. С. 58–60.

19. Графкина М.В., Сафрина Н.А. Анализ и профилактика производственных несчастных случаев, произошедших в результате дорожно-транспортных происшествий // Организация и безопасность дорожного движения: Материалы X международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения д. т. н., профессора Л. Г. Резника: в 2 томах. Тюмень, 2017. С. 278–284.

**Grafkina M.V., Sviridova E.Y., Safrina N.A.**

## **ANALYSIS OF PRODUCTION TRAUMATISM IN CONSTRUCTION**

*Currently, construction is one of the most traumatic industries of economic activity. The article presents the results of an analysis of industrial injuries in construction conducted by the authors. Information is presented on the dynamics of occupational injuries in the construction industry, information on the level of injuries with disability and fatalities, including among women and foreign citizens. The analysis established a certain contradiction in the requirements for the investigation of accidents at work in road accidents and proposed an approach for developing more effective measures to prevent accidents at work. The authors consider it expedient to create an approximate list of measures to protect labor and prevent occupational injuries as a result of accidents, accidents or other damage to vehicles. The identification of the main causes of industrial injuries will allow implementing an effective set of measures aimed at reducing and preventing accidents at work in construction.*

**Keywords:** construction, occupational accidents, method of continuous sampling, frequency of injury rate, disability, traffic accidents, investigation of accidents.

**Графкина Марина Владимировна**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Экологическая безопасность технических систем».  
Московский политехнический университет.  
Адрес: Россия, 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38.  
E-mail: marina.grafkina@rambler.ru

**Свиридова Евгения Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экологическая безопасность технических систем».  
Московский политехнический университет.  
Адрес: Россия, 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38.  
E-mail: evg\_svirodova@mail.ru

**Свиридова Надежда Андреевна**, студентка.  
Московский политехнический университет.  
Адрес: Россия, 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38.  
E-mail: andrevna1811@mail.ru

Лозовой Н.М., канд. техн. наук, доц.,  
Лозовая С.Ю., д-р техн. наук, проф.,  
Мартынова Н.С., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЛЬЕФА И ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ИНФРАСТРУКТУРЫ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ БГТУ ИМ. В.Г. ШУХОВА

nataychik9@gmail.com

В данной статье рассмотрена актуальность проблемы проведения своевременного мониторинга состояния рельефа и инфраструктуры антропогенных объектов. Произведены анализ материалов по исследуемой территории БГТУ им. В.Г. Шухова – результаты тахеометрической съемки территории университета и аэрофотоснимки с геоданными формата KML, загруженные из бесплатных источников – и дальнейшая привязка результатов тахеометрической съемки к растровым изображениям по реальным географическим координатам местности. Осуществлены анализ на предмет совпадения границ объектов, полученных с помощью тахеометрической съемки, с границами объектов на аэрофотоснимках, и оценка их точности. Выделены динамичные антропогенные объекты и прослежены стадии их развития. Выяснено, что точность определения границ антропогенных объектов по аэрофотоснимкам на начальном этапе изысканий позволяет использовать аэрофотоснимки для первичного мониторинга и выявления областей изучаемой территории, которые требуют более точного и тщательного контроля и продолжительного наблюдения из-за происходящих динамических процессов. Сделаны выводы о необходимости применения дистанционного метода оценки состояния рельефа для решения прикладных задач строительства.

**Ключевые слова:** состояние рельефа, антропогенные объекты, оценка точности, границы объектов, аэрофотоснимки, мониторинг земной поверхности.

**Введение.** В современных условиях технического прогресса хозяйственная деятельность человеческого общества активно изменяет ход и направленность развития многих природных процессов и явлений. Антропогенные изменения природной среды часто искусственно вызывают резкое усиление или ослабление естественных процессов и явлений [1, 2].

Белгородская область – один из наиболее экономически развитых регионов России. Природные особенности области и текущие темпы развития региона обуславливают необходимость производства своевременного мониторинга состояния рельефа. Сельскохозяйственная деятельность, строительство и добыча полезных ископаемых непрерывно изменяют рельеф нашей области. Однако производство съемки рельефа всей территории на постоянной основе нерентабельно [3, 4].

### Оценка состояния рельефа и точности определения границ антропогенных объектов

Для оценки состояния рельефа и точности определения границ антропогенных объектов на первом этапе необходимо провести анализ материалов по исследуемой территории Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Для этого были ис-

пользованы аэрофотоснимки местности за период с 2004 года по 2017 год и результаты тахеометрической съемки за 2011 год [5, 6].

Аэрофотоснимки за 2004, 2010, 2011, 2014, 2015 и 2017 годы были получены с помощью бесплатных приложений Google Earth и SASplanet совместно с файлами формата KML. KML – формат файлов, несущий в себе географическую информацию, в том числе пространственные метки, которые можно использовать для привязки различных графических данных [7]. Снимки были выполнены в одинаковом масштабе 1:500, что упрощает работы по выявлению объектов рельефа местности и оценке точности полученных результатов, а разноплановые источники графической информации о рельефе исследуемой местности, повышают достоверность и точность полученных результатов [8]. Тахеометрическая съемка производилась в масштабе 1:1000 с высотой сечения 1 м. Ее результаты представлены в формате DWG.

С помощью инструментов ArcGIS была произведена трансформация растровых изображений. Трансформирование – это преобразование наклонного снимка в горизонтальную плоскость [9, 10]. После этого была осуществлена привязка тахеометрической съемки к аэрофотоснимкам по

реальным географическим координатам местности, что позволили сделать пространственные геометки формата KML [11].

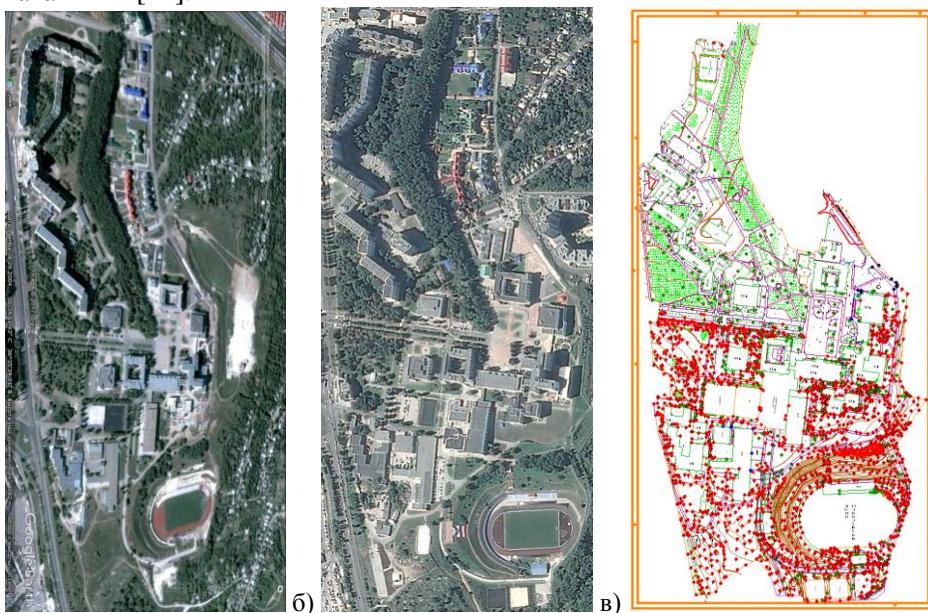


Рис. 1. Исходные материалы:

а – аэрофотоснимок за 2004 год; б – аэрофотоснимок за 2017 год; в – тахеометрическая съемка

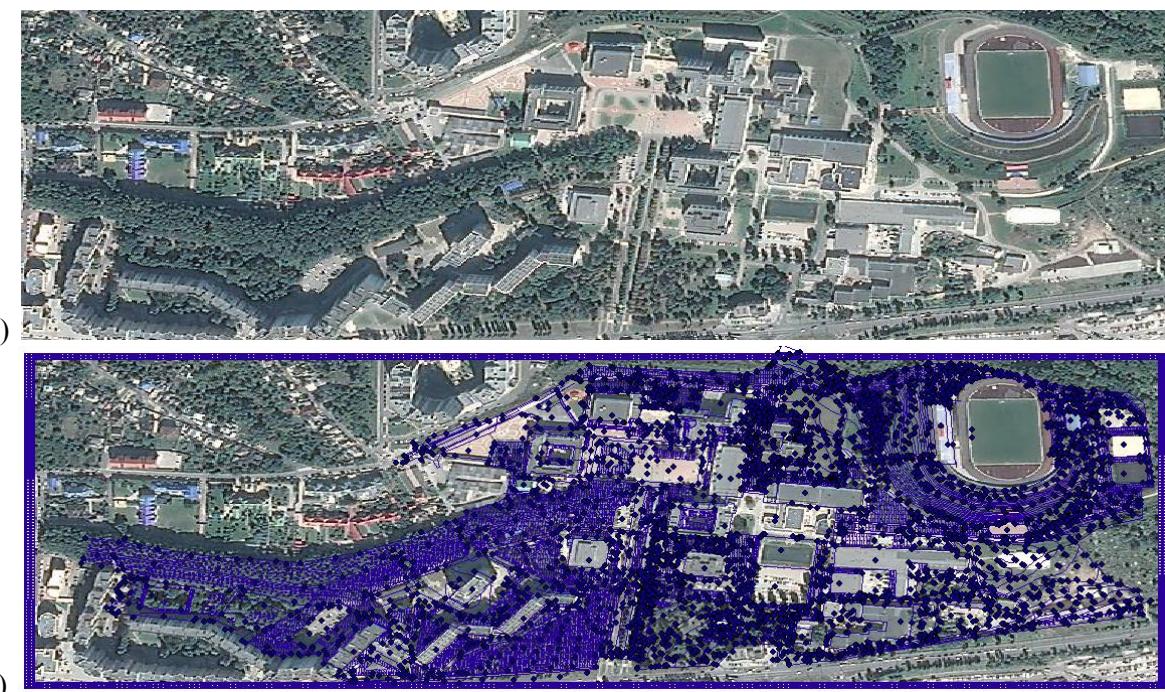


Рис. 2. Аэрофотоснимок изучаемой местности  
а – до привязки; б – после привязки

Далее был проведен анализ на предмет совпадения границ объектов, полученных с помощью тахеометрической съемки, с границами объектов на аэрофотоснимках [12]. В 80 % случаев границы исследуемых объектов на аэрофотоснимков и тахеометрической съемки совпадают (рис. 2 а, б), в остальных случаях имеются незначительные расхождения (рис. 2 в).

Согласно Инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов после привязки необходимо осуществить проверку её точности [13]. Средние ошибки на опорных точках после внешнего ориентирования продемонстрированы в таблице.

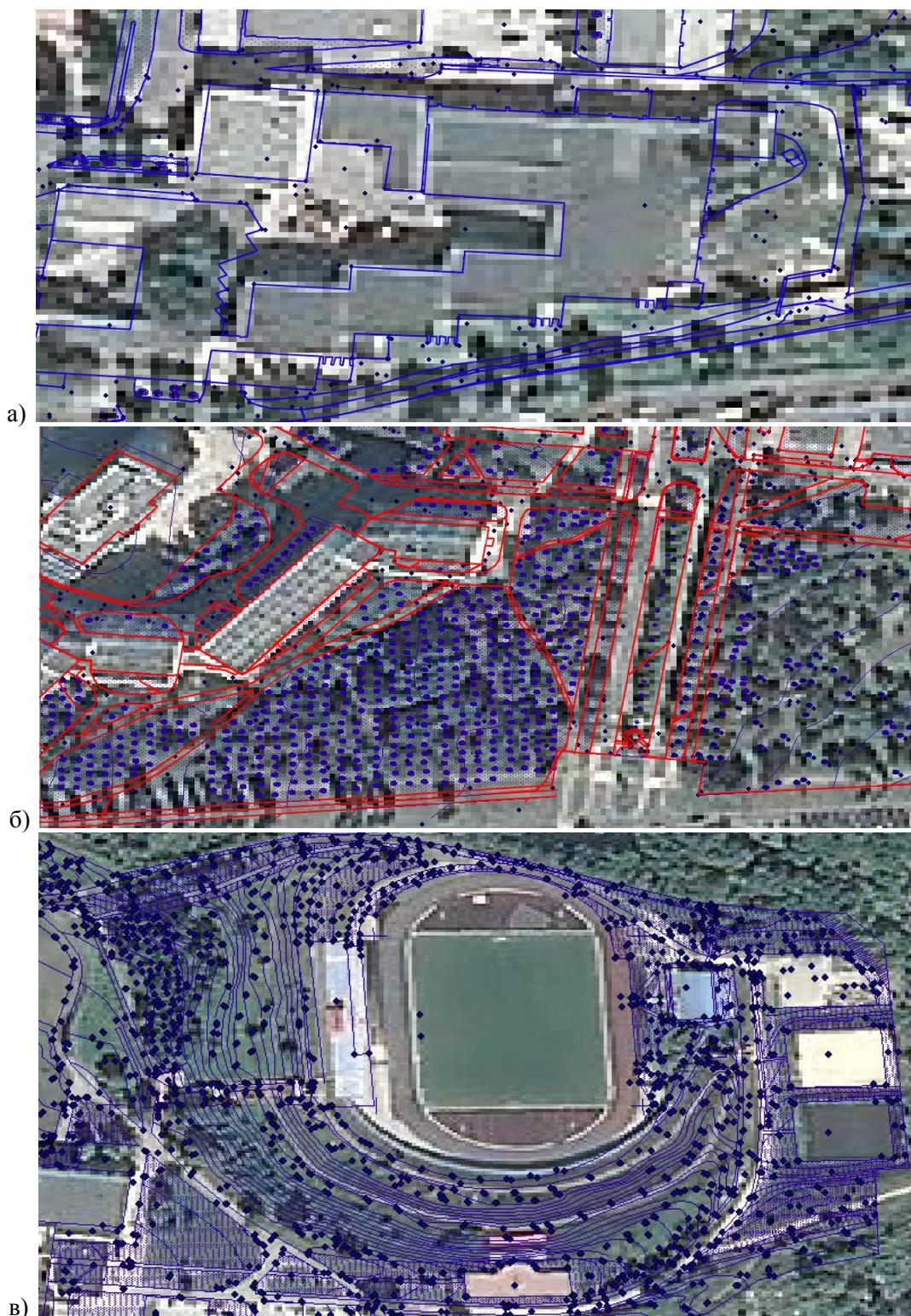


Рис. 3. Анализ совпадения границ антропогенных объектов

Таблица  
Допуски на средние ошибки привязки на опорных точках

Масштаб	$h_{\text{сеч}}$	Допуск, м
1:500	0,5	0,5
1:1 000	1	1
1:2 000	1	1,5
1:10 000	2,5	2
1:25 000	5	5

С помощью инструментов и приложений ArcGIS были проведены измерения и расчеты, которые позволили вычислить точность определения границ антропогенных объектов по аэрофотоснимкам. Наибольшая ошибка привязки составила 0,96 м, что удовлетворяет допуску,

предусмотренному Инструкцией [13]. Таким образом, точность определения границ соответствует установленным допускам, что делает полученные данные применимыми для дальнейших исследований рельефа [14].

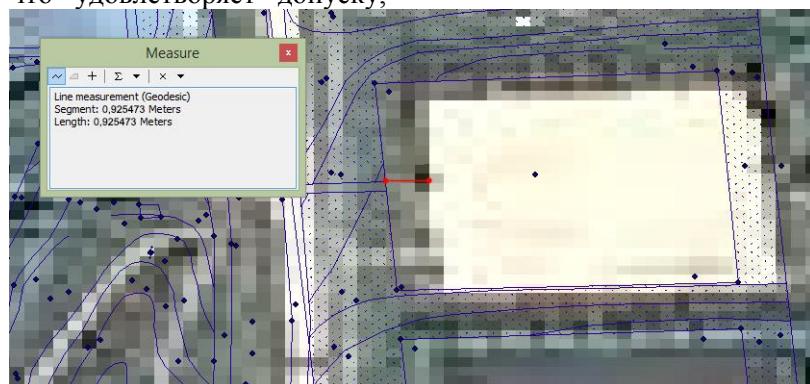


Рис. 4. Измерение погрешностей привязки

По косвенным дешифровочным признакам были определены наиболее динамичные объекты и стадии их развития. Такими объектами оказались учебный корпус, общежитие, бассейны и

обустройство территории, прилежащей к стадиону университета [15]. На рисунке 5. наглядно продемонстрирована динамика данных антропогенных объектов, а именно этапы строительства данных сооружений.

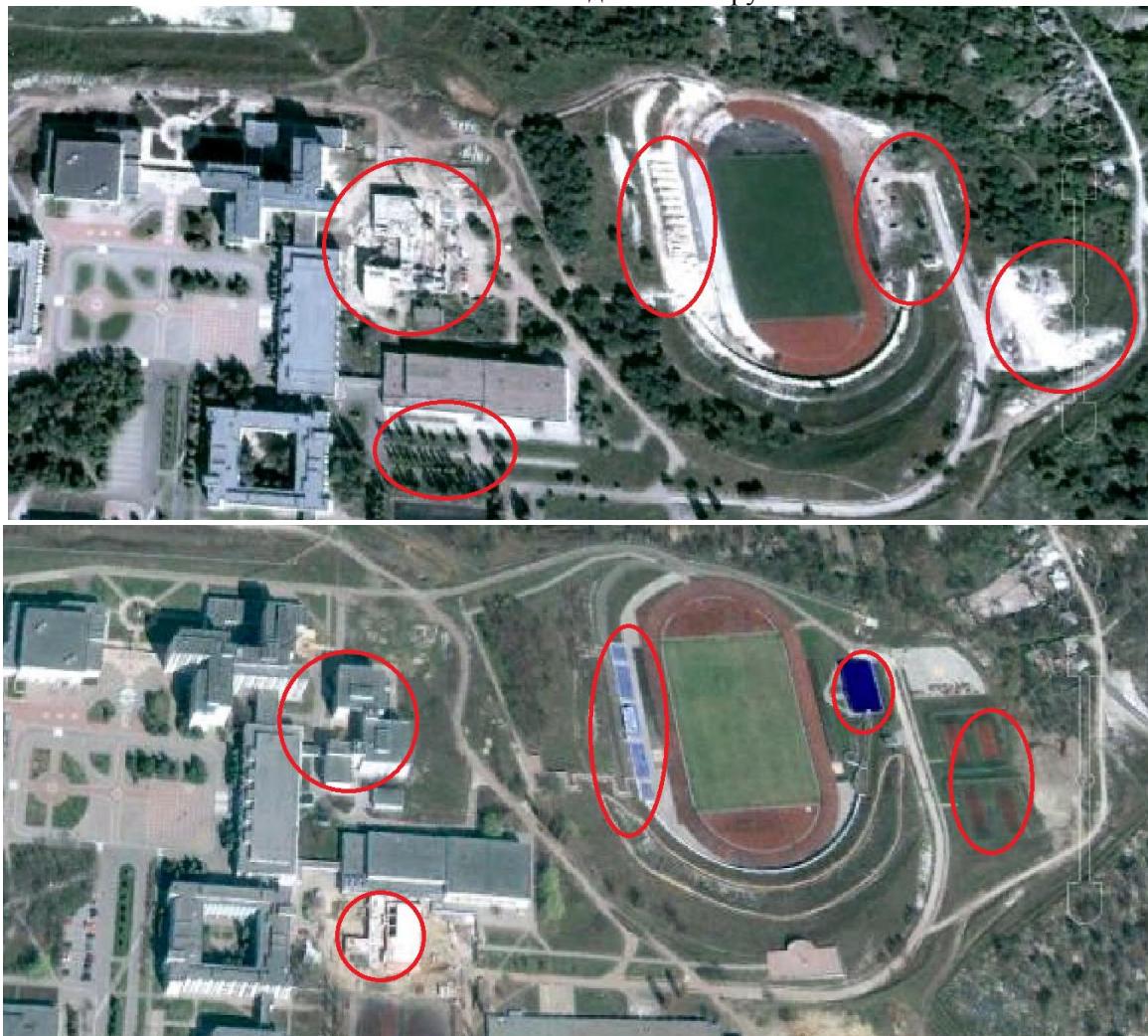


Рис. 5. Аэрофотоснимки изучаемой местности (начало)  
а – за 2004 год; б – за 2010 год.

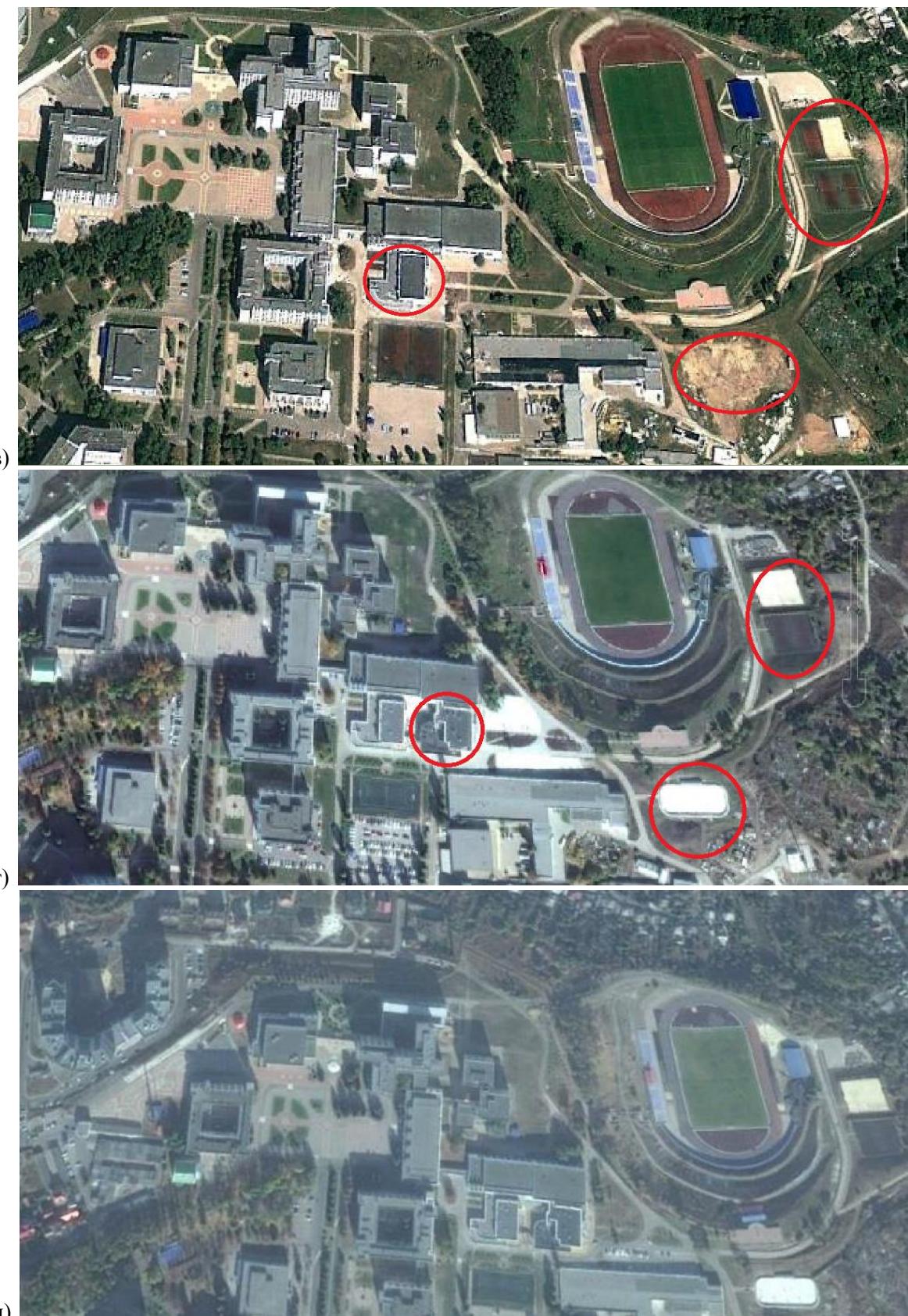


Рис. 5. Аэрофотоснимки изучаемой местности (окончание)  
в – за 2011 год; г – за 2014 год; д – за 2015 год

При анализе совпадений границ объектов на снимках 2017 года с результатами тахеометриче-

ской съемки 2011 года было выявлено, что наиболее точное соответствие границ наблюдается на равнинной территории, тогда как наибольшие

расхождения границ соответствуют территории, расположенной на склоне или в непосредственной близости к нему и берегам реки Северский Донец. Эти несоответствия могут быть обусловлены как погрешностями фотоснимка, так и динамическими процессами, происходящими на

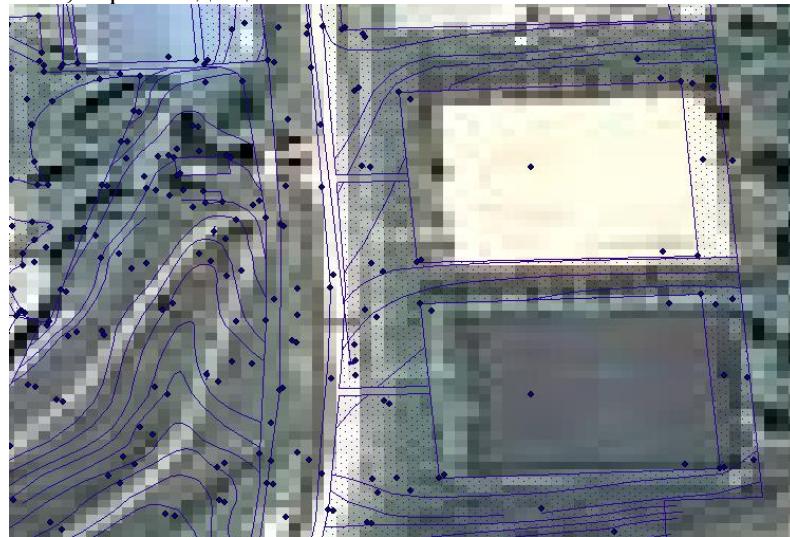


Рис. 6. Участок возможных динамических процессов

**Выводы.** Таким образом, было выяснено, что точность определения границ антропогенных объектов по аэрофотоснимкам на начальном этапе изысканий позволяет использовать аэрофотоснимки для первичного мониторинга и выявления областей изучаемой территории, которые требуют более точного и тщательного контроля и продолжительного наблюдения из-за происходящих динамических процессов, и участков, динамические процессы на которых развиты слабо или не развиты вовсе. Такой подход существенно сокращает продолжительность мониторинга, а также физические и материальные затраты по его проведению. Также по результатам оценки и анализа рельефа были выявлены несколько динамичных объектов среды и прослежены этапы их развития.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петин А. Н., Новых Л. Л., Петина В. И., Глазунов Е. Г. Экология Белгородской области. Учебное пособие для учащихся 8-11х классов. М.: МГУ, 2002. 288 с.
2. Маккавеев Н.Н. Сток и русловые процессы. М.: МГУ, 1971. 241с.
3. Шаповалов В.А., Полухин О.Н., Петин А.Н. Белгородоведение: учебник для общеобразовательных учреждений. Белгород: БелГУ, 2002. 410 с.
4. Анисимов В.А., Макарова С.В. Инженерная геодезия. Хабаровск: ДВГУПС, 2009. 150 с.

данных участках местности. Это может послужить обоснованием для проведения более тщательного мониторинга рельефа и наблюдений за деформациями зданий и сооружений.

5. Мартынова Н.С., Лозовая С.Ю. Свойства языков Арнольда в описании природных процессов/ Сборник докладов VIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4 т. Т. 3. // Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2015. С. 194-196
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Киев (Украина): Национальный авиационный университет, 2008. 245 с.
7. Конин В.В. Спутниковые системы и технологии. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.
8. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. М.: УПП "Репрография" МИИГАиК, 2008. 212 с.
9. Quick start guide ArcMap [Электронный ресурс]. URL: <http://desktop.arcgis.com/arcmap/latest/get-started/setup/arcgis-desktop-quick-start-guide>
10. Scott Crosier, Bob Booth, Katy Dalton, Andy Mitchell, Kristin Clark. ArcGIS 9. ESRI, 2004. 368 с.
11. Учебное пособие по курсу «Топографическое дешифрирование. Дешифрирование объектов земельного и городского кадастра». М.: МГУГИК, 2009. 120 с.
12. Учебное пособие по курсу «Дешифрирование снимков». Изучение динамики природных процессов и объектов по аэро- и космическим снимкам. М.: МГУГИК, 2006. 77 с.
13. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. М.: ЦНИИГАиК, 2002. 100 с.

14. Дроздов С.Л., Сладкопевцев С.А. Дистанционные методы оценки природных ресурсов (рельеф и почвы): учебное пособие. М.: МИ-ИГАиК, 2015. 150 с.

15. Методические указания по ведению наблюдений за состоянием дна, берегов, состоянием и режимом использования водоохранных зон и изменениями морфометрических особенностей водных объектов или их частей. М., 2012. 100 с.

---

**Lozovoy N.M., Lozovaya S.Yu., Martynova N.S.**

### **ESTIMATION OF THE STATE OF THE RELIEF AND THE ACCURACY OF DETERMINING THE BOUNDARIES OF ANTHROPOGENIC OBJECTS**

*This article describes the urgency of the problem of timely monitoring of the earth's surface. The analysis of materials on the investigated territory of BSTU named after V.G. Shukhova - results of tacheometric survey of the university territory and aerial photos with geolocation data of KML format, downloaded from free sources - and further binding of results of tacheometric survey to bitmaps on real geographical coordinates of the area. An analysis was carried out for the coincidence of the boundaries of objects obtained with the help of tacheometric survey with the boundaries of objects on aerial photographs, and an assessment of their accuracy. Dynamic anthropogenic objects are singled out and the stages of their development are traced. It was found out that the accuracy of determining the boundaries of anthropogenic objects from aerial photographs at the initial stage of the survey makes it possible to use aerial photographs for primary monitoring and identification of areas of the study area that require more accurate and careful monitoring and continuous monitoring due to dynamic processes. Conclusions are drawn on the need to apply a remote method of assessing the state of the relief for solving the applied problems of construction.*

**Keywords:** state of the relief, anthropogenic objects, estimation of accuracy, boundaries of objects, aerial photographs, monitoring of the earth's surface.

---

**Лозовой Николай Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: lozwa88@mail.ru

**Лозовая Светлана Юрьевна**, доктор технических наук, профессор кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мартынова Наталья Сергеевна**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: nataychik9@gmail.com

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.12737/article\_59a93b0a115287.77901848

*Аниanova T.B., канд. техн. наук, доц.,  
Рахимбаев Ш.М., д-р техн. наук, проф.,  
Погромский А.С., ст. преп.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ\*

[anik.tv@yandex.ru](mailto:anik.tv@yandex.ru)

Для теплоизоляционных строительных материалов, особенно ячеистых, большую роль играют процессы переноса тепла в порах. Использование критерии подобия позволяет получить дополнительную информацию о процессах теплообмена, которые происходят в материале, что дает возможность прогнозировать и оптимизировать поровую структуру материала в процессе его производства и эксплуатации.

Критерий Грасгофа характеризует стадию формирования поровой структуры пенобетона и газобетона. При прочих равных условиях в период формирования структуры в пенобетоне имеются более благоприятные условия для роста пузырька, чем в газобетоне. Чем больше величина критерия Прандтля, тем хуже работает тепловой пограничный слой. Расчеты показали, что тепловой пограничный слой в газобетоне будет работать несколько хуже, чем в пенобетоне.

**Ключевые слова:** теория подобия, критерии подобия, коэффициент теплопроводности, тепловой пограничный слой.

**Введение.** Теория подобия широко применяется при расчете физических и физико-химических процессов. Критерии подобия являются мерами соотношения между параметрами, существенными для рассматриваемого процесса. Они обладают всеми свойствами инвариантов, так как безразмерны, могут изменять свое значение от точки к точке данной системы, но для сходственных точек подобных систем не зависят от относительных размеров натуры и модели. В силу безразмерности численные значения критериев подобия не зависят от применяемой системы единиц измерения [1].

Критерии подобия могут быть получены для любого процесса, если известны аналитические зависимости между характеризующими его величинами. Обычно это дифференциальные уравнения, описывающие процесс. Вместе с тем следует отметить, что один и тот же процесс, которому соответствует определенное дифференциальное уравнение, может быть интегрально описан при использовании различных систем критериев.

**Основная часть.** Критерии Грасгофа и Рэлея описывают процессы переноса в поле силы тяжести.

Критерий Грасгофа рассчитывается по уравнению 1:

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – определяющий геометрический размер, м;  $\beta$  – коэффициент объемного теплового расширения газа, °К<sup>-1</sup>;  $\Delta t$  – разность температур, °К;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с, который равен  $\frac{\mu}{\rho}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Критерий  $Gr$  представляет собой меру соотношения сил внутреннего трения (вязкости) и подъемной силы, определяемой разностью плотностей в различных точках неизотермического потока. Иными словами, он показывает отношение сил, вызывающих движение пузырька вверх, к силам внутреннего трения – вязкости, препятствующим этому.

Применительно к пенобетону и газобетону этот критерий характеризует стадию формирования поровой структуры. Числитель отражает силы, вызывающие рост диаметра пузырька, а знаменатель – силы внутреннего трения, препятствующие расширению. Расчет этого критерия позволяет сравнить формирование пузырька газа в пенобетоне и в газосиликате неавтоклавного твердения.

Справочные данные [2] для расчета критерия Грасгофа, а также критерия Рэлея и Прандтля приведены в табл. 1.

При выполнении расчета учитывали, что в порах пенобетона находится кислород, а газобетона – водород. Результаты расчета критерия

Грасгофа для пенобетона и газобетона представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

## Справочные данные для расчета критериев

Показатель	Газ	
	водород	кислород
Коэффициент объемного теплового расширения газа, $^{\circ}\text{К}^{-1}$	$3,664 \cdot 10^{-3}$	$3,672 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент динамической вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$	$0,0088 \cdot 10^{-3}$	$0,0202 \cdot 10^{-3}$
Плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,09	1,47
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{К})$	0,2	0,034
Теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{К})$	$14,27 \cdot 10^3$	$1,009 \cdot 10^3$

Таблица 2

## Значения критерия Грасгофа для пенобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, $^{\circ}\text{К}$				
	1	2	3	4	5
0,5	0,023838	0,047676	0,071513	0,095351	0,119189
1	0,190702	0,381404	0,572106	0,762808	0,95351
2	1,525616	3,051232	4,576848	6,102464	7,628081
3	5,148954	10,29791	15,44686	20,59582	25,74477
4	12,20493	24,40986	36,61479	48,81972	61,02464
5	23,83775	47,6755	71,51326	95,35101	119,1888

Таблица 3

## Значения критерия Грасгофа для газобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, $^{\circ}\text{К}$				
	1	2	3	4	5
0,5	0,00047	0,00094	0,001409	0,001879	0,002349
1	0,003758	0,007517	0,011275	0,015033	0,018792
2	0,030067	0,060133	0,0902	0,120267	0,150334
3	0,101475	0,20295	0,304425	0,4059	0,507376
4	0,240534	0,481067	0,721601	0,962134	1,202668
5	0,469792	0,939584	1,409377	1,879169	2,348961

Сравнение критерия Грасгофа показывает, что в пенобетоне он в несколько раз больше, чем в газобетоне. Это связано с тем, что плотность и коэффициент динамической вязкости кислорода больше, чем у водорода, а при расчете критерия Грасгофа эти величины возводятся в квадрат.

Большое значение величины критерия Грасгофа свидетельствует о том, что пузырьку легче увеличиваться в объеме.

$$Ra = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu \cdot a} = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot c \cdot \rho}{\nu \cdot \lambda}. \quad (2)$$

где  $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ , равная  $\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ ;  $c_p$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Таким образом, при прочих равных условия в период формирования пузырька в пенобетоне имеются более благоприятные условия для роста пузырька, чем в газобетоне.

Критерий Рэлея связан с процессами теплопереноса внутри газового пузырька в процессе эксплуатации поробетонов. Он рассчитывается по уравнению 2:

Критерий Рэлея показывает отношение величины теплового расширения к силам вязкости и к теплопроводности. Результаты расчета критерия Рэлея для пенобетона и газобетона представлены в табл. 4 и 5.

Для пенобетона критерий Рэлея значительно больше, чем для газобетона, что подтверждает

утверждение: рост пузырька газа в пенобетоне происходит легче, чем в газобетоне.

Таблица 4

## Значения критерия Рэлея для пенобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, °К				
	1	2	3	4	5
0,5	0,01429	0,02858	0,04287	0,05716	0,071449
1	0,114319	0,228638	0,342957	0,457277	0,571596
2	0,914553	1,829106	2,743659	3,658212	4,572765
3	3,086616	6,173233	9,259849	12,34647	15,43308
4	7,316424	14,63285	21,94927	29,2657	36,58212
5	14,28989	28,57978	42,86967	57,15956	71,44945

Таблица 5

## Значения критерия Рэлея для газобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, °К				
	1	2	3	4	5
0,5	0,000295	0,00059	0,000885	0,00118	0,001475
1	0,00236	0,00472	0,007079	0,009439	0,011799
2	0,018878	0,037757	0,056635	0,075513	0,094391
3	0,063714	0,127428	0,191143	0,254857	0,318571
4	0,151026	0,302052	0,453079	0,604105	0,755131
5	0,294973	0,589946	0,884919	1,179893	1,474866

В предыдущих публикациях авторов [3–6] была выдвинута гипотеза о том, что в процессах переносах тепла поробетонов значительную роль играет тепловой пограничный слой (пристенный слой). В связи с этим авторы данной работы исходят из того, что теплоперенос в поробетонах происходит путем теплопроводности через твердую межпоровую перегородку, далее через тепловой пограничный слой достигает поры, где дальнейший процесс осуществляется с учетом газообразной фазы.

В порах достаточно малого диаметра, очевидно, все пространство занимает тепловой пограничный слой и в этом случае теплоперенос по всей поре происходит путем теплопроводности. Если диаметр поры превышает определенный размер, то в ней возможен и конвективный перенос, который отличается большей интенсивностью в сравнении с теплопроводностью.

Критерий Прандтля характеризует подобие физических свойств теплоносителей в процессах конвективного теплообмена. Он является мерой подобия полей температур и скоростей, показывает отношение сил вязкости к интенсивности теплопереноса. Критерий Прандтля рассчитывается по уравнению 3:

$$\frac{V}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \text{Pr}, \quad (3)$$

где  $V$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{m}^2/\text{s}$ , который равен  $\frac{\mu}{\rho}$ ;  $a$  – температуропроводность,  $\text{m}^2/\text{s}$ , равная  $\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $c_p$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Критерий Прандтля показывает отношения вязкости к температуропроводности. Чем больше величина критерия  $Pr$ , тем хуже работает тепловой пограничный слой. Для пенобетона критерий  $Pr$  равен 0,5995, для газобетона – 0,6279, значит, тепловой пограничный слой в газобетоне будет работать несколько хуже.

Число Кнудсена характеризует роль переноса тепла с участием газовой фазы. Симплекс подобия (или число) Кнудсена определяется по уравнению 4:

$$Kn = \frac{l}{\delta}, \quad (4)$$

где  $l$  – средняя длина свободного пробега молекул газа, м;  $\delta$  – определяющий размер объекта, в котором перемещается газ, м.

Число Кнудсена показывает отношение средней длины свободного пробега молекул газа к размеру объекта, в котором они перемещаются.

В ячеистых материалах передача тепла осуществляется теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией [7]. Механизм переноса тепла характеризуется критерием Кнудсена (3).

Допустим, что в материалах имеются поры размером 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 мм. Результаты расчета симплекса Кнудсена представлены

в табл. 5. Расчеты, произведенные по методике [2] совпадают с табличными данными авторов [8, 9].

Таблица 5

## Значения критерия Кнудсена

Материал	Критерий $Kn \times 10^{-2}$ , для ячеек размером, мм										
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пенобетон (азот)	0,213	0,107	0,053	0,036	0,027	0,021	0,018	0,015	0,013	0,012	0,011
	0,236	0,118	0,059	0,039	0,029	0,024	0,020	0,016	0,014	0,013	0,012
Газобетон (водород)	0,238	0,119	0,059	0,039	0,029	0,024	0,019	0,017	0,015	0,013	0,012

Из табл.5 видно, что во всех случаях  $Kn << 1$ . Это говорит о том, что перенос тепла в данном случае осуществляется теплопроводностью (кондукцией). В области малых диаметров пор симплекс Кнудсена для газобетона примерно на 10 % больше, чем в пенобетоне, что говорит о том, что в газобетоне теплопроводность газа и теплового пограничного слоя больше, чем в пенобетоне.

Анализ результатов работы [7] показывает, что конвекция в горизонтальном слое пористого материала, подогреваемого снизу, начинается при критическом значении критерия Рэлея  $Ra_{kp} > 40$ . Для строительной отрасли наибольший практический интерес представляет случай, когда существует градиент температуры в горизонтальном направлении.

**Выводы.** При вертикальном нагреве движущей силой конвективных струй являются два фактора: градиент температур и градиент плотности, а при горизонтальном – только градиент температур, роль плотности снижается с уменьшением диаметра пор и капилляров материала. Исходя из этого, можно сделать достаточно обоснованное предположение, что при горизонтальном потоке переноса тепла переход на конвективный теплообмен будет происходить при критическом значении числа Рэлея существенно больше 40.

Сопоставление расчетных данных, представленных в табл. 4 и 5 приводят к выводу, что в поробетонах строительного назначения конвективной составляющей теплопереноса можно пренебречь.

При учете переноса тепла в строительных материалах в порах достаточно малого диаметра все пространство занимает тепловой пограничный слой, следовательно, теплоперенос по всей поре происходит путем теплопроводности. Если диаметр поры превышает определенный размер, то в ней возможен и конвективный перенос, который отличается большей интенсивностью в сравнении с теплопроводностью. Из приведен-

ных данных следует вывод, что в пенобетонах, в которых диаметр пор не превышает 2–3 мм, конвективная составляющая теплопереноса не играет существенной роли, если температура не превышает 20–50 °C.

Коэффициент теплопроводности, по крайней мере, для теплоизоляционных ячеистых материалов (пенобетон, газобетон), при средней плотности не более 300–400 кг/м<sup>3</sup>, при температуре до 30–40 °C мало зависит от формы, размера ячеек, свойств межпоровых перегородок. При увеличении градиента температур, увеличении диаметра пор до 5 мм и более влияние указанных показателей возрастает.

\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. Пер. с нем. Е.М. Лейкина. М.: Мир, 1983. 520 с.
3. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 128 с.
4. Аниканова Т.В. Теплоизоляционные пенобетоны с ускоренным схватыванием. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Белгород. 2007. 169с.
5. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Погромский А.С. Влияние теплового пристенного слоя на теплопроводность пористых и зернистых материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 42–46.
6. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. О влиянии теплового пограничного слоя на теплотехнические характеристики строительных материалов // Чтения РААСН. Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов. Белгород: Изд-во БГТУ. 2014. С. 179–184.

7. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Техло-физические свойства огнеупоров. Справочное изд. М.: Металлургия, 1982. 152с.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматиз, 1963. 708 с.
9. Цедерберг Н.Б. Теплопроводность газов и жидкостей. М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408с.

---

**Anikanova T.V, Rakhimbaev Sch. M., Pogromskiy A.S.**

**THE APPLICATION OF SIMILARITY THEORY IN THE ANALYSIS OF THE PROCESSES OF PRODUCTION AND OPERATION OF CELLULAR CONCRETE**

*For insulating building materials, especially cellular, play a big role in heat transfer processes in the pores. The use of criteria of similarity allows to obtain additional information on heat transfer processes that occur in the material, giving the possibility to predict and optimize the pore structure of the material in the process of production and operation.*

*Grashof criterion characterizes the stage of formation of the pore structure of foam concrete and aerated concrete. Under other equal conditions during the formation of structure in the foam concrete has more favorable conditions for the growth of the bubble than in aerated concrete. The higher the value of the Prandtl number, the worse the working of the thermal boundary layer. The calculations showed that the thermal boundary layer in the aerated concrete will work somewhat worse than in the foam concrete.*

**Keywords:** theory of similarity, criterion of similarity, coefficient of thermal conductivity, thermal boundary layer.

---

**Аниканова Татьяна Викторовна**, кандидат технических наук, доцент.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: anik.tv@yandex.ru

**Рахимбаев Шарк Матрасолович**, доктор технических наук, профессор.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: pogrom7@yandex.ru

**Погромский Алексей Сергеевич**, старший преподаватель.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: pogrom7@yandex.ru

**Клименко В.Г., канд. техн. наук, доц.,  
Гасанов С.К., аспирант,  
Кашин Г.А., студент**

**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Мамин С.Н., канд. техн. наук**  
**Белгородский государственный национальный исследовательский университет**

## ГИПСОМАГНЕТИТОВЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Klimenko3497@yandex.ru**

*В работе исследованы физико-механические свойства материалов на основе гипсовых вяжущих и железорудного концентрата Лебединского ГОКа, изучена структура материалов, их теплотехнические и радиационно-защитные свойства.*

*Предложены механизмы структурообразования в гипсомагнетитовых системах в зависимости от вида гипсового вяжущего, текстуры и структуры кристаллов гипса, позволяющие проектировать составы композиционных материалов с заранее заданными свойствами.*

*Получен композиционный материал для защиты от рентгеновского излучения.*

**Ключевые слова:** нерастворимый ангидрит, гипс, строительный гипс, железорудный концентрат Лебединского ГОКа, массовый коэффициент ослабления излучения, эффективная теплопроводность, рентгенозащитные материалы.

**Введение.** Воздействие ионизирующего излучения на современного человека, как за счет техногенных, так и за счет естественных источников, постоянно возрастает. Каждый житель РФ за год получает в среднем около 5 мЗв радиации [1]. Наибольшую опасность для человека представляют рентгеновские лучи, гамма-излучение и потоки нейтронов, обладающие большой энергией и высокой проникающей способностью. В связи с этим создание новых видов высокоеффективных материалов для защиты от ионизирующих излучений является актуальной проблемой и заслуживает особого внимания. Представленная работа находится в русле этих проблем и посвящена получению композиционных материалов для защиты от рентгеновского излучения на основе гипсовых вяжущих и железорудного концентрата Лебединского ГОКа, состоящего в основном из магнетита.

**Цель работы.** Разработка эффективных композиционных материалов строительного назначения на основе гипсовых вяжущих и магнетита для защиты от ионизирующего излучения.

**Методология.** В качестве сырья в работе использовали железорудный концентрат (ЖК) Лебединского ГОКа. Химический состав концентрата, масс. %:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – 94–96;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,5–1,0;  $\text{SiO}_2$  – 2,0–4,0. Магнетит (МГ), являющийся основной частью концентрата, – слабоокисленная железная руда с размером частиц не более 35 мкм. Модальный диаметр частиц 11,36 мкм. Фракционный состав, масс. %: 0,2–1,0 мкм – 1,3; 1,0–5,0 мкм – 31,0; 5,0–10,0 мкм – 33,0; 10,0–35,0 мкм –

34,0. Твердость – 6. Плотность – 5800 кг/м<sup>3</sup>. Цвет – черный. Удельная поверхность магнетита 404–412 м<sup>2</sup>/кг. Электрокинетический потенциал магнетита (–40 мВ), а гипса 8 мВ. Величина pH водных суспензий  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (B/T=12,5) равна 8,1. На ДТА ЖК имеется два экзоэффекта: первый – при 250...375 °C (окисление до маггемита) и второй при 580...1000 °C (окисление до гематита). На РФА магнетиту соответствуют рефлексы при межплоскостных расстояниях, нм: 0,4848; 0,3909; 0,3345; 0,3126; 0,2974; 0,2536; 0,2426; 0,2099; 0,1799; 0,1720; 0,1612; 0,1479.

В качестве строительного гипса использован гипс Г–4 (СГ) ООО «Унистром–Трейдинг», Московская область, г. Жуковский. Характеристики гипса:  $R_{\text{сж.}} = 4–5 \text{ МПа}$ ,  $R_{\text{изг.}} = 2,0 – 2,5 \text{ МПа}$ , сроки схватывания 8–13 мин. Величина pH водных суспензий строительного гипса (B/T=12,5) равна 7,4. Термический нерастворимый ангидрит (AnII) получали обжигом природного гипса при температуре 650 °C в течение 3 часов. Величина pH его водных суспензий равна 11,2. Измельчили сырьевые материалы в вибромельнице.

Прочностные характеристики материалов определяли на образцах размером 2×2×2 см. Испытания проводились через 2 и 7 суток после их заливки в формы, а также после сушки в сушильном шкафу в течение 2 часов при 60 °C. Для достаточной достоверности полученных результатов в одной серии экспериментов использовали не менее 6 шт. образцов. В качестве активаторов твердения ангидрита использовали  $\text{K}_2\text{SO}_4$  и

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Количество добавки активатора твердения – 2 мас. %. Теплопроводность материалов определяли согласно ГОСТ 7076-99 при стационарном тепловом режиме [2], радиационно-защитные свойства – по линейному и массовому коэффициентам ослабления  $\gamma$ -излучения с помощью дозиметра-радиометра ДКС-96.

**Основная часть.** На основе двуводного гипса можно получить несколько вяжущих веществ: строительный гипс  $\beta\text{-CaSO}_4\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ; медицинский и формовочный гипс  $\alpha\text{-CaSO}_4\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ;

ангибиторный цемент; эстрихгипс. Вначале, при получении композиционных материалов, в качестве вяжущего нами исследован строительный гипс марки Г-4. Составы композиций представлены в табл. 1. При приготовлении композиций исходные компоненты тщательно перемешивались в фарфоровой ступке и затем в полиэтиленовых емкостях. Нормальная густота теста определялась по ГОСТ 23789–79.

Состав композиций на основе СГ

Таблица 1

Материал	Количество добавки ЖК; %	Состав композиции; г			В/Т
		СГ	ЖК	$\text{H}_2\text{O}$	
СГ	–	50	–	27,5	0,55
СГМ-10	10	45	5	26,0	0,52
СГМ-20	20	40	10	24,5	0,49
СГМ-30	30	35	15	23,0	0,46
СГМ-40	40	36	24	25,8	0,43
СГМ-50	50	30	30	24,0	0,40
СГМ-60	60	28	42	25,9	0,37
СГМ-80	80	14	56	21,7	0,36

В/Т для СГ – 0,55; для ЖК – 0,25

Количество воды затворения рассчитывалось отдельно для СГ и ЖК. Как следует из таблицы 1 с увеличением количества добавки ЖК в смеси В/Т уменьшается с 0,55 до 0,36.

Согласно полученным результатам (рис. 1а) в строительный гипс можно вводить 10–40 мас.% ЖК. В этом интервале количества добавки ЖК  $R_{\text{сж}}$  вяжущего стабилизируется, находясь на уровне 12–13 МПа. Прочность проб чистого строительного гипса при таких же условиях

тврдения составляет 17 МПа, а плотность 1367 кг/м<sup>3</sup> (рис. 1 б). У наполненных ЖК проб плотность увеличивается до 1700 кг/м<sup>3</sup>. Небольшие добавки ЖК (до 5 %) несколько снижают прочность СГ. Аналогичное изменение прочности строительного гипса мы наблюдали для композиционных материалов на основе тонкомолотых отходов стекла [3].

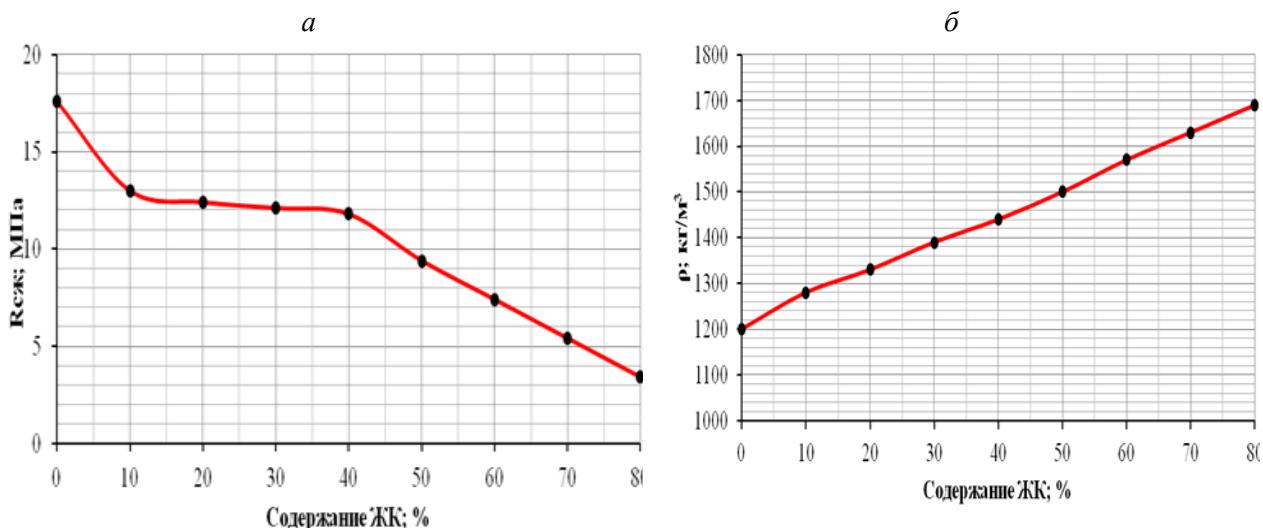


Рис. 1. Влияние добавок ЖК на свойства СГ:  
а – механическая прочность на сжатие; б – плотность

Ход кривой  $R_{сж}$  в интервале количества добавки 10–40 мас. % позволяет предположить, что ведущую роль в стабилизации прочности играет структура материала – тип упаковки структурных единиц, размер и форма кристаллов.

Кроме строительного гипса при получении композиционных материалов в качестве вяжущего был исследован ангидритовый цемент.

Твердение материалов на основе ангидритового цемента проводилось в паровоздушной среде. Количество добавки ЖК изменялось от 10 до 80 мас. % (табл. 2). Как и в случае со строительным гипсом В/Т смеси с увеличением добавки ЖК уменьшается.

**Состав композиций на основе AnII**

**Таблица 2**

Материал	Количество добавки ЖК; %	Состав композиции; г				В/Т
		An	ЖК	H <sub>2</sub> O	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
An	–	70	–	28,0	1,40	0,40
AM-10	10	72	8	30,1	1,44	0,37
AM-20	20	64	16	29,6	1,28	0,37
AM-30	30	56	24	28,4	1,12	0,35
AM-40	40	48	32	27,2	0,96	0,34
AM-50	50	40	40	26,0	0,80	0,32
AM-60	60	32	48	24,8	0,64	0,31
AM-70	70	27	63	26,5	0,54	0,29
AM-80	80	18	72	25,2	0,36	0,28

В/Т для An II – 0,4

Из полученных данных (рис. 2) следует, что материалы на ангидритовом вяжущем имеют более высокие прочностные характеристики, чем аналогичные материалы на строительном гипсе. Зависимость  $R_{сж}$  от количества добавки ЖК близка к линейной. В связи с чем, можно предположить, что ведущую роль в увеличении прочности также играет структура материала.

Микроструктура композиции СГ-50 (рис. 3 а), представленная тонкими, мелкими призматическими кристаллами удлиненной формы, отличается от микроструктуры композиции AM-50 (рис. 3 б).

В композициях на основе СГ происходит быстрая гидратация и твердение вяжущего. При этом, образуются мелкие удлиненные призматические кристаллы длиной до 8 мкм и толщиной 0,4-0,8 мкм (рис. 3 в, д), которые, переплетаясь, создают первичную структуру материала за счет кристаллизационных контактов. В пустоты между кристаллами гипса захватываются частицы магнетита. Такой механизм структурообразования объясняет ход кривой изменения прочности материалов на строительном гипсе (рис. 1 а). В пустоты между кристаллами СГ можно ввести до 40 мас. % ЖК, не нарушая кристаллизационных контактов. Дальнейшее увеличение количества добавки ЖК будет приводить к нарушению кристаллизационных контактов и падению прочности материала. Гипсовые кристаллы обволакивают частицы магнетита. Это подтверждается и цветом материала. Материал имеет серый цвет. В противоположность этому,

материал на основе ангидритового вяжущего имеет четный цвет.

Ангидритовые вяжущие гидратируются по-другому. Прежде всего, ангидрит даже в присутствии активаторов твердения гидратируется медленно. Сначала кристаллы ангидрита покрываются сеткой трещин и распадаются на мелкие частицы. Далее из этой массы, начинают расти, пластинчатые кристаллы. При этом образуются крупные кристаллы слоисто-пакетной структуры (рис. 3 б). Размеры кристаллов гипса, образующегося при гидратации нерастворимого ангидрита в присутствии сульфата аммония, соизмеримы с размерами кристаллов ЖК. Частички магнетита располагаются между и на кристаллах гипса и ухудшают условия образования кристаллизационных контактов (рис. 3 г, е). По этой причине прочность композиционных материалов на основе ангидритового вяжущего с увеличением добавки ЖК монотонно уменьшается. Цвет таких материалов черный.

Показатель идентичности ( $K_i$ ), зависящий от размеров микроблоков структуры гипса [4], больше у материала AM-30 (0,37), чем у материала СГМ-30 (0,27). Материал СГМ-30 имеет более мелкокристаллическую структуру, чем материал AM-30. Площадь и интенсивность рефлексов  $Fe_3O_4$  на рентгенограммах при межплоскостных расстояниях 0,2974 и 0,2536 нм у материала СГМ-30 несколько больше, чем у материала AM-30. Это является подтверждением изменения параметров кристаллической решетки магнетита в гипсомагнетитовых композициях.

Основным недостатком бетонов, используемых для защиты от ионизирующего излучения, является их низкая теплопроводность, что создает дополнительные трудности при отводе тепла. В связи с этим нами были выполнены теплотехнические исследования полученных материалов. Для исследований выбраны составы АМ–50 и СГ–50. Теплопроводность полученных

материалов измеряли методом стационарного теплового потока по ГОСТ 7076–99. Материал формовали в виде плиток размером  $15 \times 15 \times 2$  см. Эффективная теплопроводность строительного гипса и ангидритового вяжущего соответственно равна 0,2333 и 0,2399 Вт/м·К. Материал СГ–50 имеет теплопроводность 0,2378 Вт/м·К, а материал АМ–50 – 0,3052 Вт/м·К. (табл. 3)

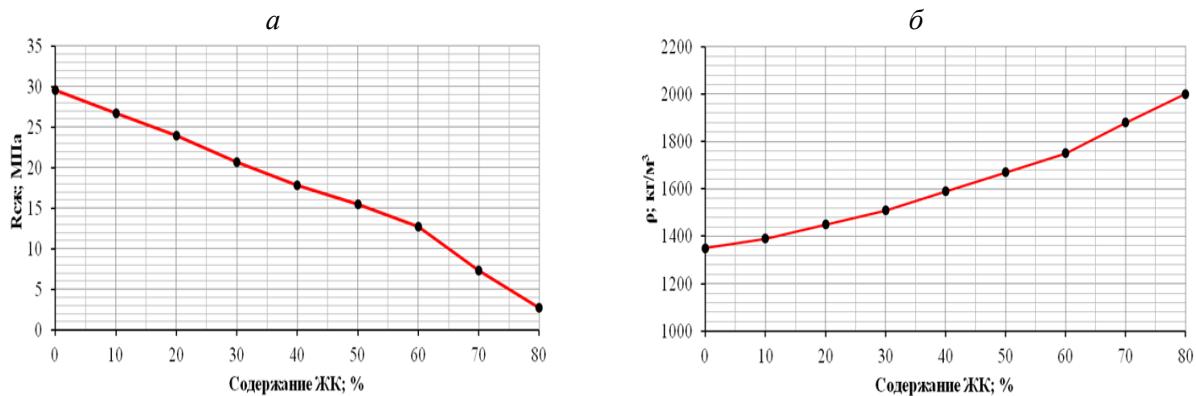


Рис. 2. Влияние добавок ЖК на свойства ангидритового вяжущего:  
а) механическая прочность на сжатие; б) плотность

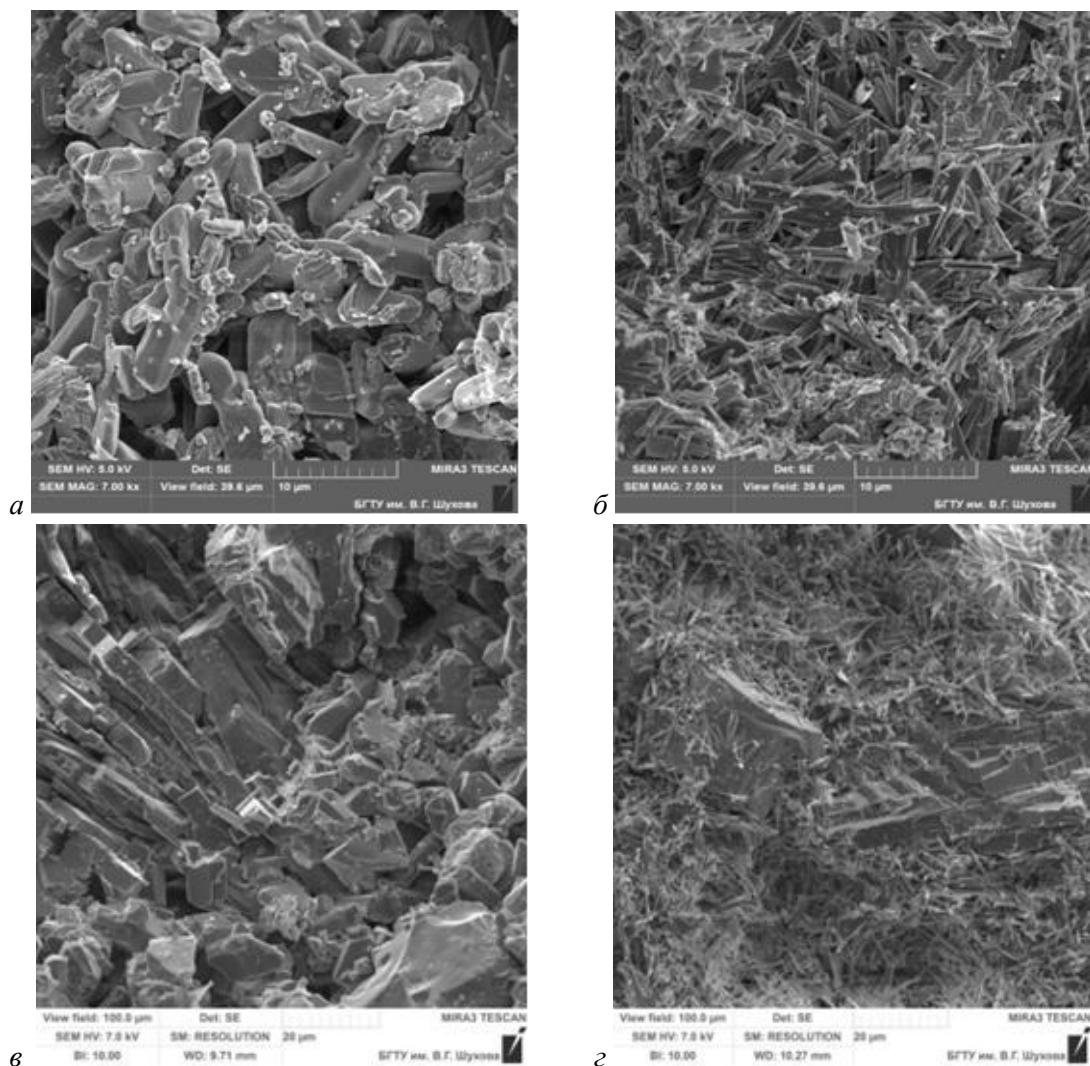


Рис. 3. Микрофотографии композиционных материалов:  
а – СГМ–50; б – АМ–50; в – СГ; г – АМ

## Физико-механические свойства материалов

№. п/п	Состав исходных композиций	Характеристики полученных материала			
		R <sub>сж</sub> ; МПа	ρ; кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности; Вт/м·К	μ <sub>m</sub> ; см <sup>2</sup> /г
1.	СГ*	17,6	1200	0,2333	0,0626
2.	AnII **	29,6	1350	0,2399	0,0626
3.	АМ-50**	16,1	1670	0,3052	0,0714
4.	СГМ-50*	9,4	1500	0,2378	0,0662

\* – R<sub>сж</sub> через 2 сут; \*\* – R<sub>сж</sub> через 7 сут

Введение ЖК в строительный гипс незначительно увеличивает теплопроводность гипса, что можно объяснить его структурой, при которой частицы магнетита изолируются друг от друга кристаллами гипса. Наоборот, в материалах на основе ангидрита магнетит находится между кристаллами гипса и частично на их поверхности, что увеличивает теплопроводность материала. Со временем в гипсомагнетитовых системах происходит кольматация пор гипсового камня за счет продуктов гидратации и окисления Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, состоящих из основных солей железа.

**Выводы.** Таким образом, физико-механические характеристики композиционных материалов зависят от вида гипсового вяжущего и его структуры. У материалов на основе СГ структура мелкокристаллическая и представлена вытянутыми тонкими призматическими кристаллами, образующими рыхлую структуру со значительным количеством пор. Материал на основе ангидритового вяжущего состоит из крупных кристаллов слоисто-пакетной структуры, позволяющих получить более плотную упаковку кристаллов.

По значению массового коэффициента ослабления, полученный материал соответствует защитным свойствам тяжелых флинтов. Магнетитовый заполнитель увеличивает на 25–30%

теплопроводность гипсобетонов на ангидритовом вяжущем и практически не влияет на теплопроводность бетонов на основе строительного гипса. Гипсомагнетитовые композиционные материалы предлагаются использовать для получения пазогребневых плит и штукатурных смесей при оборудовании рентгенографических кабинетов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Соколов П.Э., Сидельников О.П., Козлов Ю.Д. Необходимость контроля радиоактивности строительных материалов // Строительные материалы. 1995. № 9. С. 18–19.
- ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Изд. офиц. М.: Изд-во стандартов, 1999.
- Клименко В.Г., Павленко В.И., Гасанов С.К. Модифицирование многофазовых гипсовых вяжущих отходами тарного стеклобоя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 35–39.
- Клименко В.Г. Многофазовые гипсовые вяжущие. Белгород: Изд-во БГТУ. 2010. 198 с.

**Klimenko V.G., Gasanov S.K., Kashin G.A., Mamin S.N.**

**PLASTER-MAGNETITE COMPOSITES FOR PROTECTION AGAINST IONIZING RADIATION**

*The work investigates physical and mechanical properties of materials based on plaster binders and iron ore concentrate of Lebedinsky GOK (Mining and Processing Plant) as well as the structure of materials, their heat engineering and radiation-protective properties.*

*Mechanisms of structure formation in plaster magnetite systems enabling to design mixtures of composite materials with predetermined properties are offered depending on the type of plaster binder, texture and structure of gypsum crystals.*

*Composite material for protection from x-radiation has been obtained.*

**Keywords:** iron ore concentrate of Lebedinsky GOK, cement plaster, insoluble anhydrite, linear and mass attenuation coefficients, effective heat conductivity, X-ray protection materials.

**Клименко Василий Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: Klimenko3497@yandex.ru

**Гасанов Суфиомар Курбанович**, аспирант.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: sufiomar\_b1@mail.ru

**Кашин Григорий Анатольевич**, студент.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Мамин Сергей Николаевич**, кандидат технических наук.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Адрес: Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85.

Кудеярова Н.П., канд. техн. наук, проф.,

Бушуева Н.П., канд. техн. наук, доц.,

Старичкова Е.Д. студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## АКТИВНОСТЬ БЕЛИТОВЫХ ФАЗ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ В АВТОКЛАВНЫХ УСЛОВИЯХ

kudeyarova@intbel.ru

*В работе исследовались процессы гидратации белитовой фазы сталеплавильных шлаков Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМКа), в частности,  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  и  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ . Результаты экспериментов показали активизирующее воздействие гидротермальных условий на процессы твердения двухкальциевого силиката, а также ускорение гидратации модификаций  $\text{C}_2\text{S}$  при изменении концентрации  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в жидкой фазе.*

**Ключевые слова:** белит, модификация белита, гидратация, вяжущее, автоклавная обработка, гидросиликаты кальция, тепловыделение, прочность вяжущего.

**Введение.** Среди многообразия побочных продуктов широкое распространение в производстве вяжущих материалов получили металлургические шлаки. Выбор вида шлака зависит от его фазового состава [1]. Основными минералами электросталеплавильных шлаков являются силикаты кальция –  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  и  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , каждый из которых имеет особенности при твердении. Медленное охлаждение шлаков приводит к силикатному распаду в следствии полиморфного превращения  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , процесс сопровождается саморассыпанием. Модификация  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  твердеет медленно и набирает прочность в длительные сроки. Модификация  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  практически инертна и не может обеспечить необходимой прочности изделий при нормальных условиях твердения [2]. Одним из факторов ускорения гидратации белитовых фаз является автоклавная обработка, характерная для силикатных автоклавных материалов из извести и кварцевого песка [3]. Рассматривая сталеплавильный шлак как компонент автоклавного вяжущего в работе исследованы процессы гидратации белитовых фаз в водной среде, а также в известковом и кремнеземистом растворах.

**Методика.** При выполнении работы использовались современные методы исследования – химический и рентгенофазовый анализы, рН-метрия, дифференциальная микрокалориметрия, физико-механические испытания.

**Основная часть.** Технологический процесс сталеплавильного производства направлен на обеспечение качества основного продукта – стали. Шлаки являются отходом и направляются в отвалы. Считается, что металлургические шлаки уносят более 1200 кДж тепла на каждый килограмм шлака. Огромные средства расходуются на содержание отвалов, земная поверхность

под которыми не используется. Тонкодисперсные частицы шлаков ветром переносятся на большие расстояния, загрязняя атмосферу, реки и земли. Все это свидетельствует о необходимости использования шлаков.

Сталеплавильные шлаки Оскольского электрометаллургического комбината по минералогическому составу, в основном, представлены силикатами и алюмосиликатами кальция (рис.1) -  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  (5,644, 4,343, 3,85, 2,751, 2,442, 2,327, 1,812 Å),  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  (2,751, 2,79, 2,62 Å), кварц (3,326), вюстит (2,151 Å), периклаз (4,796, 2,106 Å),  $\text{CaFe}_2\text{O}$  (2,495 Å) и другие.

По химическому составу шлак представлен основными оксидами, характерными для вяжущих систем (табл. 1).

Активность шлака характеризуется количеством связанного гидроксида кальция из насыщенного известкового раствора и скоростью этого процесса. Шлак считается тем активнее, чем больше извести поглощает 1 г шлака за 3 часа. Активность шлака удельной поверхностью 450 м<sup>2</sup>/кг и его отдельных фракций (табл. 2) свидетельствуют о большей активности мелкой фракции шлака с размером частиц менее 0,08 мкм, которая отличается большим количеством кремнеземистой составляющей. Кроме этого, при охлаждении шлака часть  $\text{SiO}_2$  остается в аморфном состоянии, что повышает его химическую активность. Силикаты кальция (белитовая фаза) шлака в процессе эксперимента остаются без изменения.

Рассматривая шлак как компонент автоклавного вяжущего, была исследована гидратационная активность белитовых фаз в автоклавных условиях как в водном растворе, так и в растворах извести и кремнезема. Синтез модификаций белита  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  проводился при 1450 °C из

химически чистых реагентов до полного связывания оксида кальция. Для получения модификации  $\gamma$ - $C_2S$  продукт обжига медленно охлаждался в печи до 1300 °С с последующим охлаждением на воздухе. Синтез  $\beta$ - $C_2S$  проводился двойным

обжигом с добавкой борного ангидрида и охлаждением на воздухе. Качество полученных фаз контролировалось рентгенофазовым и химическим анализом.

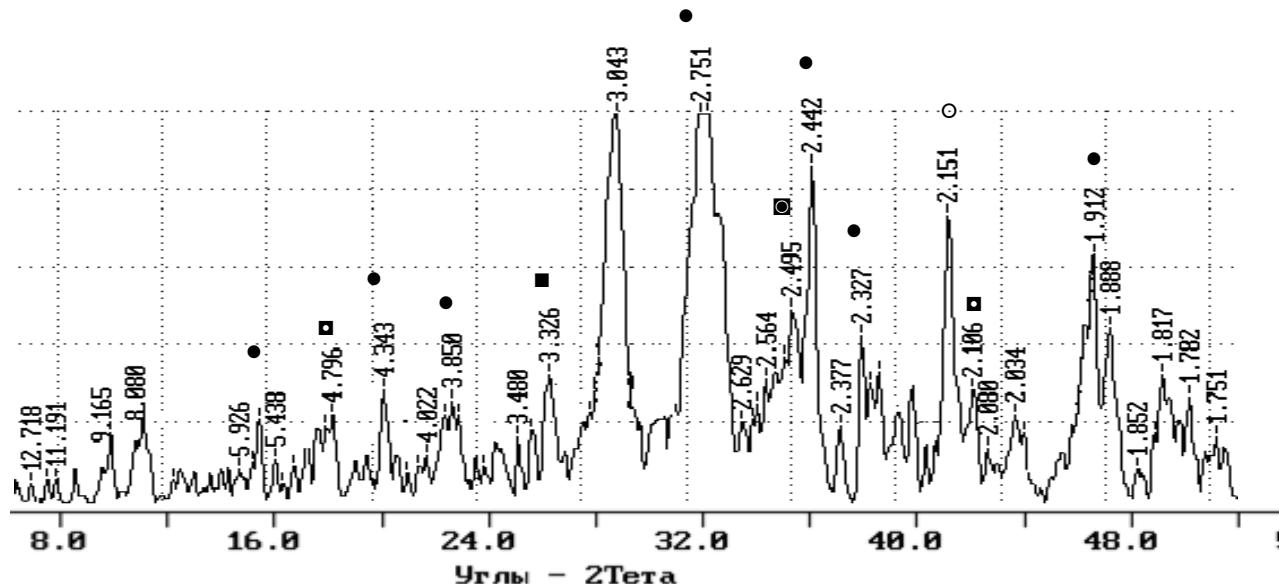


Рис. 1. Рентгенограмма шлака ОЭМКа

Таблица 1

**Химический состав шлака ОЭМКа**

Компонент	Содержание оксидов, масс. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ.</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Шлак	20,4	3,90	14,06	39,38	9,35	0,70	0,19	0,26

Таблица 2

**Активность отдельных фракций сталеплавильного шлака**

Компонент	Время поглощения, мин					
	30	60	90	120	150	180
Исходный шлак	13,2	14,0	14,8	15,0	15,1	15,1
Фракция шлака более 0,2 мкм	14,0	14,8	16,2	16,3	17,0	17,5
Фракция шлака менее 0,08 мкм	15,0	16,1	17,3	18,5	19,1	20,3

При использовании вяжущих материалов большое практическое значение имеет скорость их схватывания [4, 5]. Исследования синтезированных белитовых фаз показали следующие сроки схватывания:  $\beta$ - $C_2S$  – начало 50 мин, конец 1час 35 мин;  $\gamma$ - $C_2S$  – начало 55 мин, конец 1час 55 мин. Прочность синтезируемых белитовых фаз

(образцы пластиичной консистенции) в естественных условиях твердения невысока (табл.3), что подтверждается теоретическими данными. Характерно, что с увеличением срока твердения прочность на сжатие образцов пластической консистенции для обеих модификаций возрастает, и на всех этапах твердения прочность образцов  $\beta$ - $C_2S$  до 1,5 раз превышает показатели для  $\gamma$ - $C_2S$ .

Таблица 3

**Прочность на сжатие белитовых фаз (МПа) в естественных условиях твердения**

Белитовая фаза	Сроки твердения			
	3 суток	7 суток	28 суток	3 месяца
$\beta$ - $C_2S$	1,0	2,6	4,1	14,0
$\gamma$ - $C_2S$	0	0,9	2,9	9,1

Обработка образцов водяным насыщенным паром под давлением 10 атм ускоряет процесс гидратации белита, и через 6 часов изотермической выдержки при 183 °С прочность на сжатие образцов повышается для образцов  $\beta$ - $C_2S$  до 11,0 МПа и для образцов  $\gamma$ - $C_2S$  - до 3,1 МПа, что выше показателей твердения 28-ми суточного возраста в естественных условиях.

Протекание процесса гидратации вяжущего можно оценивать методом тепловыделения. Тепловыделение – результат комплекса физико-химических процессов взаимодействия дисперсного порошка с дисперсионной жидкостью средой [6, 7]. Понятие тепловыделения характеризует важнейшие свойства вяжущего, а именно, способность к гидратации и скорость этого процесса. Из литературных данных известно, что кинетика тепловыделения характеризуется сложной зависимостью. В течение первых нескольких минут гидратации скорость тепловыделения оказывается очень высокой, но затем ее величина быстро снижается практически до нуля. Интенсивное выделение тепла в начальный период связано с проявлением теплового эффекта смачивания. Уменьшение скорости гидратации и возникновение периода, в течение которого происходит выделение лишь небольшого количества тепла (индукционный период), обусловлено образованием на поверхности частиц вяжущего плотных оболочек из продуктов гидратации. Вода, необходимая для гидратации, в этот период диффундирует через названные пленки, и скорость химической реакции лимитируется скоростью диффузии молекул воды. Повышение температуры реакции по-

вышает скорость диффузии. Молекулы воды более легко достигают негидратированной поверхности частиц и скорость тепловыделения резко увеличивается.

В настоящее время отсутствуют надежные данные о термокинетике взаимодействия в системе  $C_2S$  –  $H_2O$ . В данной работе исследования скорости тепловыделения  $\beta$ - $C_2Si$   $\gamma$ - $C_2S$  в воде и растворах извести и кремнезема проводились в течение суток. Соотношение твердой и жидкой фазы составляло 1:3. В течение эксперимента зафиксирован эффект интенсивного выделения тепла в первые 2 минуты гидратации белитовой фазы (рис. 2, 3). Вероятно, первый эффект связан с адсорбционным и химическим взаимодействием в системе. В течение двух минут с момента затворения отмечается быстрый рост концентрации иона  $Ca^{2+}$  в жидкой фазе, затем достигается пересыщение и выщелачивание кальция резко замедляется [7]. Затем наступает индукционный период, характеризующий этап зародышевого образования.

По величине первого экзотермического эффекта можно судить об интенсивности начального взаимодействия вяжущего с раствором. Скорость тепловыделения при гидратации  $\gamma$ - $C_2S$ , затворенного кремнеземистым раствором, достигает 68 мВ/с, что значительно превышает скорость его гидратации в воде или в известковом растворе. Скорость тепловыделения при гидратации  $\beta$ - $C_2S$ , затворенного известковым раствором, достигает 46 мВ/с, что превышает скорость тепловыделения при гидратации  $\beta$ - $C_2S$  в воде и в растворе  $SiO_2$ .

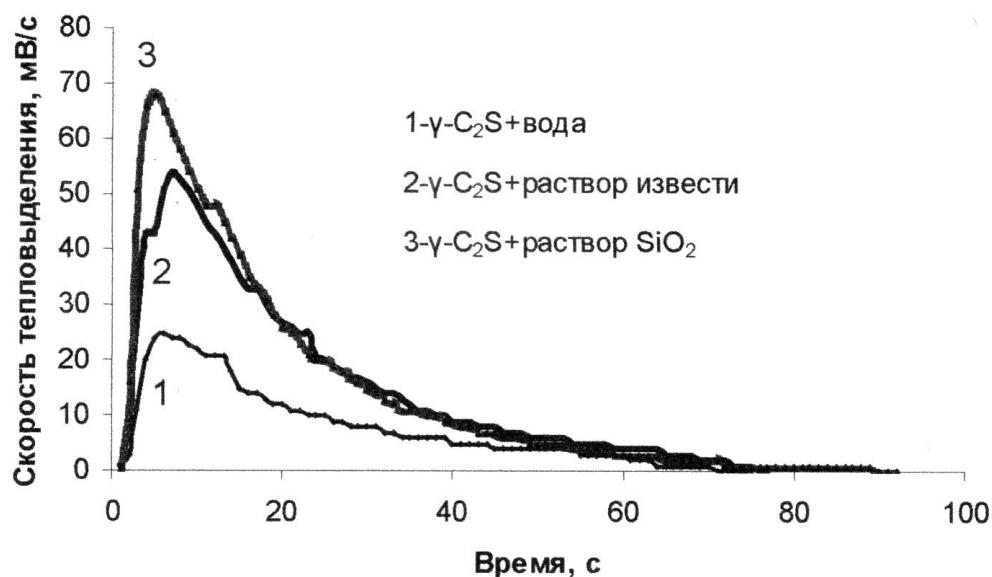
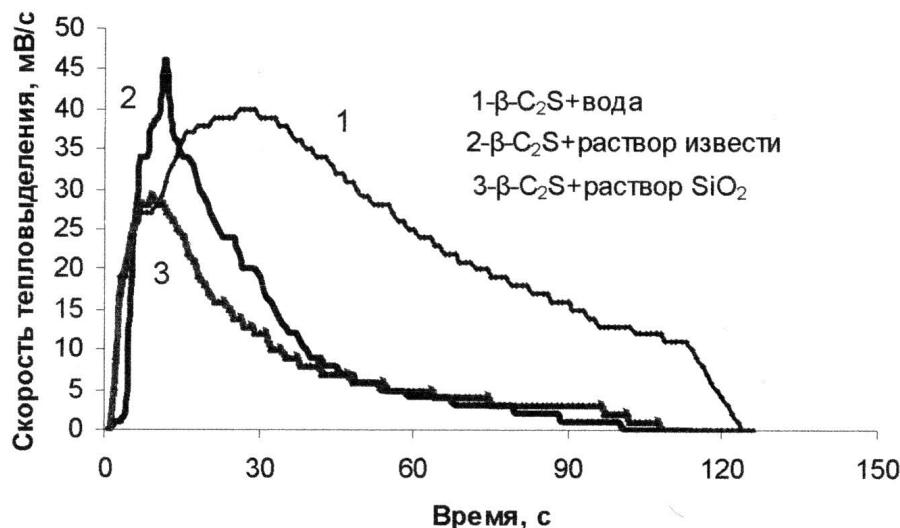


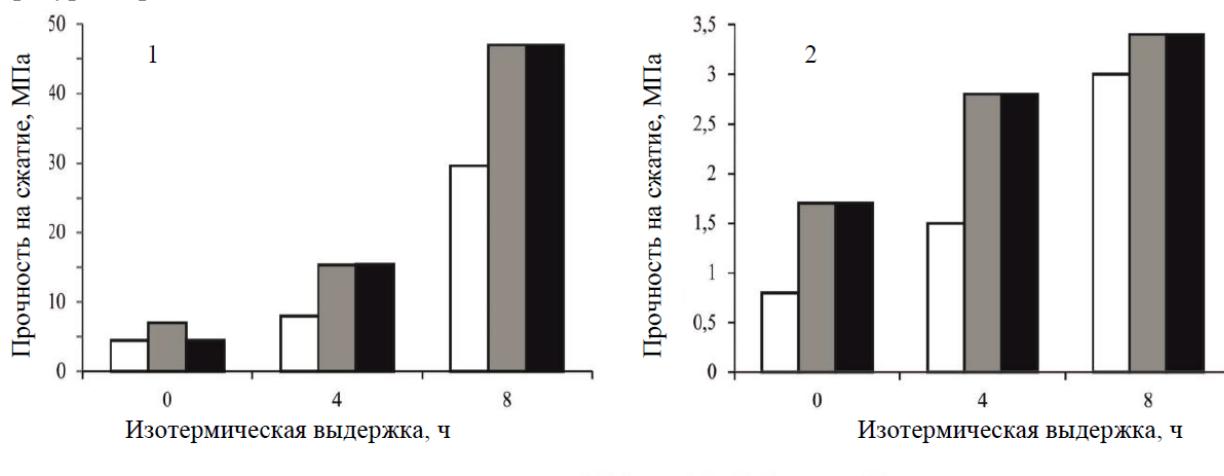
Рис. 2. Скорость тепловыделения при гидратации  $\gamma$ - $C_2S$

Рис. 3. Скорость тепловыделения при гидратации  $\beta$ - $C_2S$ 

Снижение интенсивности начального взаимодействия, оцениваемого по величине первого экзотермического эффекта, можно отнести за счет колматации пор гидросиликатного геля труднорастворимыми гидроксидами. С другой стороны, пониженная критическая концентрация  $Ca(OH)_2$  создает условия для более ранней кристаллизации, что сопровождается сокращением длительности индукционного периода. Следовательно, первоначально выделение  $Ca(OH)_2$  при гидратации  $\gamma$ - $C_2S$  в естественных условиях замедляет процесс роста гидратных новообразований. В автоклавных условиях растворимость гидроксида кальция падает [8], образование и кристаллизация гидросиликатов кальция увеличивается, что повышает прочность гидратируемой фазы.

В гидротермальных условиях реакции образования гидросиликатов кальция из известково-песчаных смесей протекают в растворах, концентрация  $Ca(OH)_2$  и  $SiO_2$  в которых зависит от температуры процесса и соотношения исходных

компонентов. Разный характер изменения растворимости  $Ca(OH)_2$  и кремнезема при повышении температуры приводит к тому, что взаимодействие начинается в насыщенном относительно извести растворе, так как растворимость  $Ca(OH)_2$  при низких температурах значительно выше растворимости кварца [9]. С целью моделирования автоклавного твердения измельченные белитовые фазы  $\beta$ - $C_2S$  и  $\gamma$ - $C_2S$  затворялись насыщенным раствором извести и кремнеземистым раствором, полученным растворением чистого кварцевого песка удельной поверхности 700 м<sup>2</sup>/кг при нагревании до 100 °C. Сформованные образцы пластической консистенции подвергались автоклавной обработке при 183 °C. Кинетика нарастания прочности на сжатие образцов представлена на рис. 4. Из графика видно, что прочность образцов белитовых фаз с увеличением времени твердения возрастает при использовании разных затворителей.

Рис. 4. Прочность на сжатие белитовых фаз в автоклавных условиях  
(1 -  $\beta$ - $C_2S$ , 2 -  $\gamma$ - $C_2S$ )

Прочность на сжатие образцов  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , гидратированных в воде, значительно превышает прочность образцов  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  и через 8 часов изотермической выдержки достигает 29,6 МПа. Образцам  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  за этот период твердения характерна относительно невысокая прочность (3,0 МПа за 8 часов изотермической выдержки). Однако необходимо выделить факт активизации процесса гидратации этой фазы по сравнению с гидратацией в нормальных условиях.

При гидратации образцов  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в насыщенном растворе извести наблюдается повышение прочности автоклавированных образцов до 47 МПа. Фаза  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  с первых этапов автоклавного твердения интенсивно набирает прочность, и при достижении температуры автоклавной обработки прочность образцов увеличивается в 2 раза в сравнении с естественными условиями твердения. Процесс твердения фазы  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  при автоклавной обработке в кремнеземистом растворе подобен твердению в известковом растворе. На всех этапах твердения наблюдается рост прочности по сравнению с прочностью фазы, затворенной водой, и через 8 часов выдержки при постоянной температуре показатели прочности выравниваются. Следует отметить, что концентрация  $\text{SiO}_2$  в растворе невысока.

Результаты химического анализа процесса гидратации белитовых фаз в воде свидетельствуют о незначительном выделении гидроксида

кальция, количества которого увеличивается во времени автоклавной обработки. Так при гидратации  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  содержание  $\text{CaO}_{\text{своб}}$  увеличивается от 0,14 до 0,63 %, при гидратации  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  – от 0,21 до 0,81 %, что еще раз подтверждает более высокую интенсивность процесса гидратации  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в сравнении с  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ . Выделение  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при гидратации белитовых фаз в известковом растворе повышает pH раствора. Наличие  $\text{SiO}_2$  в растворе уменьшает показатель pH, что отражается на процессе гидратации в начале автоклавного твердения. В результате в начале автоклавной обработки влияние щелочности раствора оказывает большее влияние на гидратацию фаз. В последующем показатели pH раствора почти не изменяются, что отражается на прочности гидратных фаз. Образцы  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  в период достижения температуры автоклавной обработки (1,5 часа) набирают прочность в 2 раза выше образцов, гидратация которых протекала в воде. Прочность образцов  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  за этот период твердения увеличивается в 1,5 раза в растворе повышенной щелочности по сравнению с образцами, твердевшими в воде и растворе кремнезема, и по сравнению с гидратной фазой  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ .

Активизирующее воздействие автоклавной обработки на процесс гидратации белитовых фаз подтверждается результатами рентгенофазового анализа образцов, гидратированных в различных условиях (табл.4).

Таблица 4

#### Сравнение данных рентгенофазового анализа гидратных фаз $\beta\text{-C}_2\text{S}$ и $\gamma\text{-C}_2\text{S}$

Параметры дифракционных отражений	Гидратация белитовых фаз в естественных условиях	Гидратация белитовых фаз в автоклавных условиях		
		Гидратация в воде	Гидратация в известковом растворе	Гидратация в растворе кремнезема
Гидратация $\beta\text{-C}_2\text{S}$				
Межплоскостное расстояние, Å	2,793	2,796	2,784	2,796
Отношение площади пика к его интенсивности	0,220	0,267	0,317	0,403
Межплоскостное расстояние, Å °	2,622	2,611	2,614	2,618
Отношение площади пика к его интенсивности	0,199	0,210	0,376	0,235
Гидратация $\gamma\text{-C}_2\text{S}$				
Межплоскостное расстояние, Å	2,755	2,763	2,755	2,755
Отношение площади пика к его интенсивности	0,25	0,26	0,267	0,31
Межплоскостное расстояние, Å	1,816	1,817	1,814	1,811
Отношение площади пика к его интенсивности	0,395	0,496	2,769	3,610

После автоклавной обработки по данным рентгенофазового анализа интенсивность дифракционных отражений  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  и  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  снижается, что отражается на отношении площади пика к его интенсивности, что еще раз свидетель-

ствует об ускорении процесса гидратации в автоклавных условиях. Гидратация  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в автоклаве более интенсивно протекает в известковом растворе. Наименьшей интенсивностью характеризуются дифракционные отражения фазы  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , затворенные кремнеземистым раствором. Можно

предположить, что в смеси этой фазы с тонко измельченным песком и взаимодействием в автоклавных условиях вяжущее будет характеризоваться более высокими прочностными показателями.

Продуктами гидратации белитовых фаз являются гидросиликаты кальция [9]. Гидратная фаза  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  представлена гидросиликатом кальция типа  $\text{C}_2\text{SH(A)}$ , которому характерна невысокая прочность [10]. На рентгенограмме фазы присутствуют отражения непрореагированного  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , что свидетельствует о незавершенности процесса его гидратации. На рентгенограммах гидратированного  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  представлены гидросиликаты кальция различного состава  $\text{C}_2\text{SH(B)}$ ,  $\text{C}_2\text{SH(A)}$ ,  $\text{C}_2\text{SH(C)}$ , что обеспечивает этой фазе более высокие прочностные показатели [11].

**Выводы.** Гидратация белитовых фаз  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  и  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  в среде водяного насыщенного пара высокого давления протекает более интенсивно за счет изменения химического состава жидкой фазы и сопровождается выделением гидроксида кальция. Активизирующее воздействие на гидратацию  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  оказывает щелочная среда, на гидратацию  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  – кислая среда. С увеличением режима автоклавной обработки, как времени, так и температуры повышение концентрации  $\text{SiO}_2$  в жидкой фазе будет ускорять гидратацию  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , что обеспечит высокие прочностные показатели вяжущего с использованием отходов, содержащих эту фазу.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гридчин А.М., Лесовик В.С., Глаголов С.Н. Решение проблемы утилизации техноген-

ного сырья КМА // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. № 4. С. 7–11.

2. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцемент. М.: Стройиздат, 1982. 328 с.

3.. Кудеярова Н.П., Цыпченко Н.В., Бушуева Н.П Гидратация различных модификаций  $\text{C}_2\text{S}$  в автоклавных условиях // Сборник материалов II Международного совещания по химии и технологии цемента, М: Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2000, № 3. С.73–76.

4. Bensted J. Hydration of Portland cement. // Adv. Cem. Technol. – Crit., Rev. and Stud. Manuf. Qual. Contr., Optimizate and Oxford e. a., 1983. Pp. 307–347.

5. Kondo R., Ueda S. Kinetics and Mechanisms of the Hydration of Cements. Tokyo, vol. 2, 1968. Pp. 203–248.

6. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г.. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М., Высшая школа, 1981. 335 с.

7. Сердюкова А.А., Рахимбаев Ш.М. Кинетика тепловыделения смесей клинкерных минералов / Традиции и инновации в строительстве и архитектуре.: сб. материалов 69 Всероссийской научно-технической конференции // Самара.: 2012. Ч.4. С.17–23.

8. Кудеярова Н.П., Бушуева Н.П., Бушуев Д.А. Ионные равновесия в системе  $\text{CaO} - \text{H}_2\text{O}$  / Инновационные материалы и технологии: сб. материалов международной научно-практической конференции (XX научные чтения). Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. Ч.3. С. 70–73.

9. Бутт Ю.М., Рашкович Л.Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. М.: Стройиздат, 1965. 223 с.

10. Teaylor H. F. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1996. 560 с.

**Kudeyarova N.P., Bushueva N.P., Starichkova E.D.**

## ACTIVITY OF BELIT PHASES OF STEEL-FUEL SLAGS IN AUTO-CLASS CONDITIONS

*The processes of hydration of the belite phase of steel-smelting slags of the Oskol electrometallurgical Combine (OEMK), in particular,  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  and  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , were studied. The results of the experiments have shown the activating effect of hydrothermal conditions on the hardening of dicalcium silicate, and the acceleration of the hydration of  $\text{C}_2\text{S}$  modifications with a change in the concentration of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Ca(OH)}_2$  in the liquid phase.*

**Keywords:** Belit, Belita modification, hydration, astringent, autoclave treatment, calcium hydrosilicates, heat release, binder strength.

**Кудеярова Нина Петровна**, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

E-mail: kudeyarova@intbel.ru

**Бушуева Наталья Петровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Старичкова Елена Дмитриевна**, студентка  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

## ОБРАБОТКА ФИБРОВОЛОКНА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФИБРОСДЕРЖАЩИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

alex.zadiraka@mail.ru

*Проведены эксперименты по введению базальтовой фибры с различной плотностью и длиной нарезки в состав композиционной дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси, выполнены лабораторные испытания образцов асфальтобетонов, установлены оптимальные плотность и длина нарезки базальтовой фибры для введения в асфальтобетонные смеси*

**Ключевые слова:** технология производства композиционного материала, базальтовая фибра, плотность базальтовой фибры, длина нарезки базальтовой фибры, лабораторные испытания образцов асфальтобетонов, введение базальтовой фибры в асфальтобетонную смесь.

**Введение.** В транспортном строительстве широко используется такой композиционный материал, как асфальтобетон. Введение в смесь небольших по размеру (дискретных) элементов позволяет добиться их равномерного распределения (дисперсии) в смеси, и получить «композитный» материал с более высокими физико-механическими показателями в готовом конструктивном элементе [1], что позволяет избежать появления колейности, продлить в несколько раз межремонтные сроки и срок службы дорожных покрытий. В настоящее время в России действуют методические рекомендации по технологии армирования асфальтобетонных покрытий добавками базальтовых волокон (фиброй) [2]. Однако широкого применения базальтовая фибра не получила. Основной проблемой использования фибры из различных волокон в асфальтобетонных смесях, по результатам проведённых исследований, а также зарубежным литературным источникам [3, 4], является отработка технологии ведения фибры в состав смеси. В России широкого опыта изготовления на асфальтобетонных заводах смесей с фиброй на сегодняшний момент нет. Это связано с трудностями обеспечения однородного распределения волокон в составе асфальтобетонной смеси.

**Основная часть.** Для обеспечения однородности распределения фиброволокна в объёме дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей в Поволжском учебно-исследовательском центре «ВОЛГОДОРТРАНС» СГТУ разработан комплекс устройств для обработки фиброволокна при производстве композиционных фибродержащих асфальтобетонных смесей [1, 2].

В состав комплекса входит устройство для вспушения (расщепления) фиброволокна и устройство для его вдувания (ввода) в смеситель асфальтобетонного завода. Устройства могут

применяться в едином комплексе или по отдельности в зависимости от вида и состояния фиброволокна. При использовании устройств в комплексе в составе технологической линии асфальтобетонного завода предусматривается вначале применение устройства для вспушения (расщепления) фиброволокна, а затем поступление вспущенного фиброволокна в устройство для его вдувания (ввода) в смеситель асфальтобетонного завода.

Схема входящего в состав комплекса устройства для вспушения (расщепления) фиброволокна показана на рисунке 1, схема устройства для вдувания фиброволокна в смеситель асфальтобетонного завода показана на рисунке 2 [6].

Устройство для вспушения (расщепления) фиброволокна устанавливается вблизи смесителя асфальтобетонного завода. Труба – воздуховод для отведения готовой фибровоздушной смеси 6 с шиберной заслонкой выводится в смесительную установку асфальтобетонного завода. Через трубу подачи фиброволокна 5 с шиберной заслонкой подаётся фибра. После выхода из трубы подачи фибра захватывается зубцами звёздочек 3. При вращении звёздочек через трубу воздуховод 4 подаётся воздух, способствующий эффективности вспушения фиброволокна. При механическом воздействии зубцов вращающихся звёздочек 3 и воздушного потока происходит равномерное вспушение фибры без образования комков. Звёздочки 3 установлены на валах 2. Вращение звёздочек 3 осуществляется с различной скоростью за счёт электродвигателя 1 с редуктором 7 (в зависимости от требуемого состояния фибры для выпуска асфальтобетонных смесей). За счёт воздушного потока и воздействия зубцов звёздочек вспущенная фибра через трубу – воздуховод 6 выносится из устройства и поступает непосредственно в смеситель асфальтобетонного завода

или в устройство для вдувания (ввода) фиброволокна в смеситель асфальтобетонного завода [4].

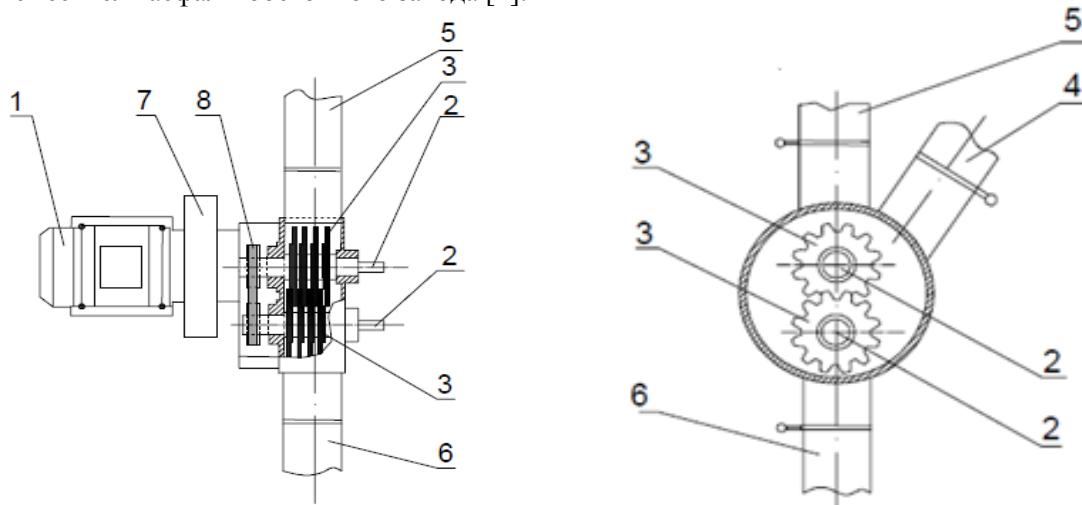
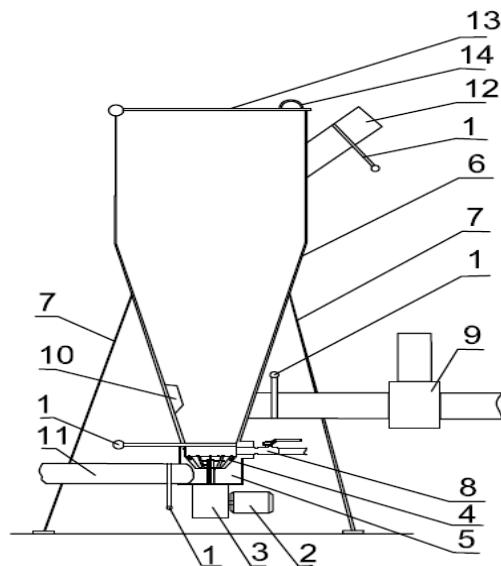


Рис. 1. Схема устройства для вспущения (расщепления) фиброволокна

1 – электродвигатель; 2 – вал; 3 – звездочка с зубцами; 4 – труба-воздуховод с шиберной заслонкой;  
5 – труба для подачи фиброволокна с шиберной заслонкой; 6 – труба для отведения готовой  
фибровоздушной смеси; 7 – реуктор; 8 – клиноременная передача



заслонка в нижней части бункера 6 и фибра под действием гравитационных сил поступает на врашающуюся крыльчатку 4. Вращение крыльчатки 4 осуществляется с различной скоростью (в зависимости от требуемого состояния фибры для выпуска асфальтобетонных смесей) за счёт электродвигателя 2 с редуктором 3. В нижней части бункера 6 перед крыльчаткой 4 установлен кран 8 для подачи воздушного потока. При механическом воздействии лопастей крыльчатки 4 и воздушного потока происходит равномерное вспушение фибры без образования комков. За счёт воздушного потока и воздействия крыльчатки вспущенная фибра попадает в вихревую камеру 5, откуда потоком воздуха при открытой шиберной заслонке через трубу выхода фибровоздушной смеси 11 подаётся в смеситель асфальтобетонного завода. Устройство подачи фибровоздушной смеси в смеситель асфальтобетонного завода снабжено нагревательным элементом с вентилятором 9 подающим в бункер 6 разогретый воздух для просушки и нагрева фибры перед введением в смеситель с целью улучшения качества композиционной асфальтобетонной смеси с добавкой фибры. Устройство подачи фибровоздушной смеси в смеситель асфальтобетонного завода снабжено четырьмя шиберными заслонками 1 позволяющими регулировать производительность, скорость дозирования, содержание фибры в фибровоздушной смеси, температуру и влажность фибры (фибровоздушной смеси). В нижней части бункера 6 имеется смотровое окно 10, позволяющее визуально контролировать количество фибры в бункере 6 [7, 8].

Комплекс устройств для обработки фиброволокна при производстве композиционных фибродержащих асфальтобетонных смесей реали-

зован в виде опытных образцов и прошёл апробацию в Поволжском учебно-исследовательском центре «ВОЛГОДОРТРАНС» СГТУ [3].

Выполнялись исследования по определению однородности распределения фиброволокна в составе композиционных фибродержащих асфальтобетонных смесей. Критерием оценки однородности являлось визуальное определение однородности распределения фиброволокна (наличие комков и сгустков), а также комплекс показателей физико-механических свойств фибродержащих композиционных асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов. Исследовались композиционные фибродержащие асфальтобетонные смеси, где фиброволокно вводилось в виде дозированной навески непосредственно в смеситель асфальтобетонного завода через технологическое отверстие и композиционные смеси, фиброволокно в которые вводилось с применением комплекса устройств для обработки фиброволокна [5, 6].

Для исследований применялась базальтовая фибра длиной 15 мм в количестве 0,4 % (по массе готовой смеси), добавка которой вносилась в подобранный состав асфальтобетонной смеси марки I типа Б по ГОСТ 9128–2013 [5]. Из готовой композиционной дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси в соответствии с методикой ГОСТ 12801–98 [6] изготавливались контрольные образцы. Уплотнение образцов, производилось прессованием на гидравлическом прессе в форме с внутренним диаметром 71,4 мм в течение 3 минут под давлением (40,0±0,5) МПа [9, 10].

Основные физико-механические показатели свойств композиционных фибродержащих асфальтобетонных смесей, приготовленных с использованием комплекса устройств для подготовки фиброволокна и без приведены в таблице.

Таблица 2

#### Основные показатели физико-механических свойств композиционного фибродержащего асфальтобетона марки I, типа Б

Наименование показателя	Ед. изм.	Требования ГОСТ 9128-2013 для марки I типа Б	Фактические показатели физико-механических свойств	
			При введении фиброволокна в смеситель без обработки	При введении фиброволокна в смеситель после обработки с применением комплекса устройств
Предел прочности при сжатии при температуре 50 °C, не менее	МПа	1,3	2,45	3,35
Сдвигостойчивость по коэффициенту внутреннего трения, не менее	-	0,83	0,90	0,95
Сдвигостойчивость по сцеплению при сдвиге при температуре 50 °C, не менее	МПа	0,38	0,59	0,74

В результате выполненных исследований установлена высокая степень однородности распределения фиброволокна в составе композиционных фибродержащих асфальтобетонных смесей, что позволяет получить увеличение показателей физико-механических свойств композиционных дисперсно-армированных асфальтобетонов примерно до 30 % в сравнении с технологическими режимами без предварительной обработки фиброволокна. В настоящее время поданы заявки о выдаче патента Российской Федерации на изобретение и полезную модель.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технологическое обеспечение качества строительства асфальтобетонных покрытий. Методические рекомендации. Омск: СибАДИ. 2004.
2. Методические рекомендации по технологии армирования асфальтобетонных покрытий добавками базальтовых волокон (фиброй) при строительстве и ремонте автомобильных дорог (Утверждено распоряжением Росавтодора № ОС-12-р от 11.01.2002).
3. ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия.

4. ГОСТ 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний

5. Челпанов И.Б., Евтеева С.М., Талалай В.В., Кочетков А.В., Юшков Б.С. Стандартизация испытаний строительных, дорожных материалов и изделий // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2011. № 2. С. 57–68.

6. А.с. 1216012 СССР, МКИЗ В 28 В 13/02. Устройство для уплотнения строительных смесей в форме / А.Ф. Иванов, А.В. Потапов, Н.А. Горнаев, И.В. Михайлов (СССР). № 3834339 ; заявл. 30.12.84 ; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9. 3 с.

7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.

8. Кирюхин Г.Н., Смирнов Е.А. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона. М. ООО «Издательство «Элит». 2009. 176 с.

9. Ляпина А.И., Плотникова И.А. Анализ со-поставления графического и расчётного методов определения показателей дисперсности битумных эмульсий // Тр. СоюздорНИИ. 1977. № 100. С. 120–130.

10. Пат. № 2351703 Российская Федерация. Способ приготовления холодной органоминеральной смеси для дорожных покрытий / Н.А. Горнаев, В.Е. Никишин, С.М. Евтеева, С.Ю. Андронов, А.С. Пыжов. Опубл. 10.04.09.

**Andronov S.Yu., Zadiraka A.A.**

## INFLUENCE OF DENSITY AND LENGTH OF CUTTING OF BASALT FIBER ON PHYSICAL AND MECHANICAL INDICATORS OF COMPOSITE DISPERSION-REINFORCED ASPHALT-CONCRETE MIXTURE

*Experiments on the introduction of basalt fiber with various density and length of cutting into the composition of the dispersed-reinforced asphalt mixture were carried out, laboratory tests of asphalt concrete samples were carried out, the optimal density and length of cutting basalt fiber for introduction into asphalt concrete mixtures.*

**Keywords:** composite material production technology, basalt fiber, density of basalt fiber, basalt fiber cutting length, laboratory tests of asphalt concrete samples, introduction of basalt fiber into the asphalt concrete mixture.

**Андронов Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент.

Саратовский Государственный технический университете им. Гагарина Ю.А.

Адрес: Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

E-mail: atomic@yandex.ru

**Задираха Алексей Анатольевич**, аспирант.

Саратовский Государственный технический университете им. Гагарина Ю.А.

Адрес: Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

E-mail: alex.zadiraka@mail.ru

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article\_59a93b0a7e3265.22687906

Апачанов А.С., канд. техн. наук,

Евстратов В.А., д-р техн. наук, проф.

Южно-Российский государственный политехнический университет  
(НПИ) им. М. И. Платова

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ШНЕКОВОЙ ЛОПАСТИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВИНТОВОГО ПРЕССА\*

aasprof@yandex.ru

*Высокие темпы современного жилищного, гражданского и промышленного строительства должны обеспечиваться соответствующими темпами роста производства строительных материалов, вообще, и керамического кирпича, в частности. В последние годы после спада объемов выпуска керамического кирпича начал проявляться повышенный интерес к нему со стороны архитекторов, строителей и других потребителей. Этот интерес продиктован, прежде всего, уникальными свойствами керамического кирпича: прочностью, низкой теплопроводностью, архитектурным изяществом, экологической чистотой. Вопрос роста объемов производства и улучшения качества выпускаемых изделий при одновременном снижении энергозатрат стал особенно актуальным в настоящее время. Особое место в ряду машин и оборудования для производства керамического кирпича занимает прессовое оборудование, в частности - шнековый вакуумный пресс (далее пресс).*

**Ключевые слова:** шнековый пресс, шнековый вал, образующая лопасти шнекового вала, коэффициент подачи шнека.

**Введение.** Несмотря на то, что вопросам исследования, разработки и проектирования прессов посвящается большая часть работ по глиноперерабатывающим машинам [1, 2, 3, 4], их конструкции остаются весьма консервативными, и каждый раз дают повод для очередных исследований и попыток их дальнейшего совершенствования. Если учесть, что на шнековых прессах во всем мире формуется 90–95 % керамического кирпича, то эти попытки являются вполне оправданными.

**Методология.** Обоснованность выводов и рекомендаций основываются на применении комплекса современных апробированных методов исследований, включая: анализ и научное обобщение выполненных к настоящему времени работ по рассматриваемому вопросу; методы сопротивления материалов, теоретической механики, теории упругости.

**Основная часть.** Производительность шнековых прессов [5] для формования глиняного

кирпича определяется как произведение площади сечения шнека на проекцию скорости материала на ось шнека (рис.1)

$$Q = \pi(R^2 - r^2)v_x. \quad (1)$$

Максимально возможная (теоретическая) производительность будет иметь место, если абсолютная скорость движения материала будет направлена вдоль оси шнека

$$Q_{meop.} = \pi(R^2 - r^2)v_{meop.}, \quad (2)$$

где  $v_{meop.} = \omega_0 R t g \alpha$  – максимально возможная (теоретическая) скорость движения формуемой массы.

Отношение фактической производительности  $Q$  к теоретической  $Q_{meop.}$  характеризует эффективность работы пресса и называется коэффициентом подачи шнека [6]

$$k_\beta = \frac{Q}{Q_{meop.}} = \frac{v_x}{v_{meop.}} = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)} = \frac{1}{1 + \tan \alpha \tan \beta}. \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол между направлением движения формуемой массы и осью шнека (рис.1).

Тогда

$$Q = k_\beta Q_{meop.} = \frac{Q_{meop.}}{1 + \tan \alpha \tan \beta} \quad (4)$$

В шнековых прессах пластического формования угол отклонения движения глиняной

массы от оси шнека составляет 75–80 градусов [7], вследствие чего коэффициент подачи шнека низок  $k_\beta = 0,33 \div 0,42$ .

Применение различных конструкторских решений [8, 9, 10], направленных на увеличение трения глиняной массы о внутреннюю поверх-

ность корпуса шнекового пресса или уменьшение трения глины о шнек, может значительно повысить производительность пресса. Сила трения глиняной массы о внутреннюю поверхность корпуса шнекового пресса зависит от коэффициента трения глины об эту поверхность и от силы нормального давления.

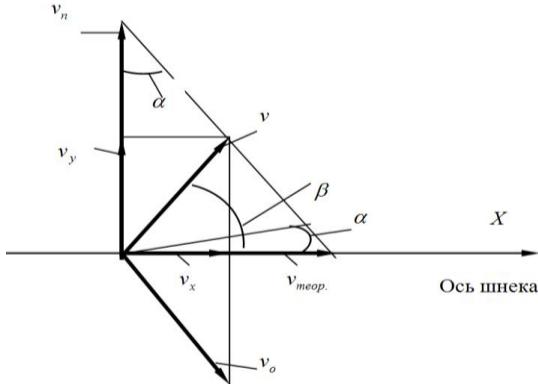


Рис. 1. План скоростей

Увеличить силу нормального давления формируемой массы на внутреннюю поверхность корпуса пресса можно, изменив геометрию шнековой лопасти [11, 12] таким образом, чтобы образующие лопасти были направлены не по нормали

к оси шнека, а имели наклон в сторону, противоположную направлению движения материала, от оси шнека к периферии, т.е. располагались под углом  $\theta$  к нормали оси шнека (рис. 2).

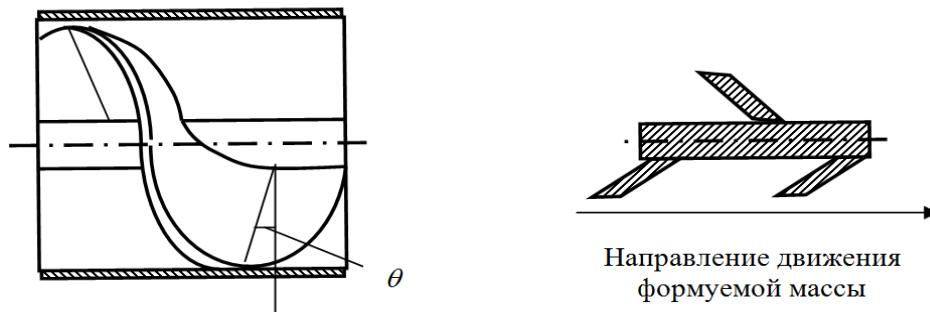


Рис. 2. Шнековый вал, образующие лопасти которого расположены под углом к нормали оси вала

Рассмотрим равновесие элементарного объема материала, вырезанного из канала, образованного внутренней поверхностью корпуса пресса, валом и лопастью шнека (рис. 3). На элементарный объем материала действуют те же

силы, что и в шнеке с лопастью, образующие которой направлены по нормали к оси шнека [13, 14, 15] и имеющие следующие значения.

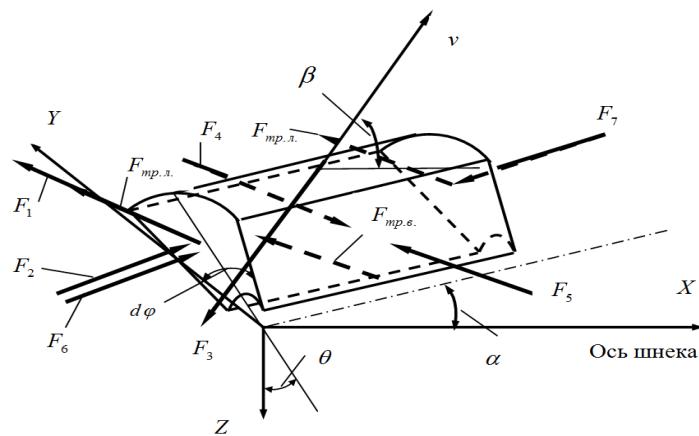


Рис. 3. Схема сил, действующих на элементарный объем материала в шнековом канале пресса

Разность сил противодавления и подпора

$$F_5 - F_4 = \Delta P(R-r)2\pi Rtg\alpha. \quad (5)$$

Сила трения материала о внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса шнекового пресса

$$F_3 = \frac{2\pi R^2 d\varphi tg\alpha \mu Pf_u}{1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta}. \quad (6)$$

Сила нормального давления на лопасть шнека от силы  $F_3$

$$F_2 = \frac{2\pi R^2 d\varphi tg\alpha \mu Pf_u \cos(\beta-\alpha)}{[1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta] \cos\theta}. \quad (7)$$

Составляющая силы трения материала о лопасть шнека от действия силы  $F_3$ ;

$$\begin{aligned} & \sum X_i = 0; \\ & -R(R-r) \frac{dP}{\mu} \sin\alpha - \frac{Pf_u f_w R^2 \sin\alpha \cos(\beta-\alpha) d\varphi}{[1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta] \cos\theta} + \\ & \frac{Pf_u R^2 \cos\alpha \cos(\beta-\alpha) d\varphi}{1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta} - Pf_w R r \sin\alpha d\varphi - \frac{Pf_w (R^2 - r^2) d\varphi}{\pi \cos\theta} - \frac{Pf_u R^2 \cos\beta d\varphi}{1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta} = 0; \end{aligned} \quad (11)$$

Проинтегрировав (11) по  $d\varphi$  в интервале от 0 до  $2\pi n$ , где  $n$  – число витков шнека, имеем

$$\begin{aligned} & -\frac{R(R-r)}{\mu} \sin\alpha \ln \left| \frac{P_0 + 2\pi n a}{P_0} \right| - \frac{2\pi n f_u f_w R^2 \sin\alpha \cos(\beta-\alpha)}{[1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta] \cos\theta} + \\ & \frac{2\pi n f_u R^2 \cos\alpha \cos(\beta-\alpha)}{1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta} - 2\pi n f_w R r \sin\alpha - \frac{2\pi n f_w (R^2 - r^2)}{\cos\theta} - \frac{2\pi n f_u R^2 \cos\beta}{1-f_u \cos(\beta-\alpha) \operatorname{tg}\theta} = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

Решение уравнения (12) с применением вычислительной техники позволяет определить влияние угла наклона образующих шнековой лопасти на направление движения формируемой

массы, а, следовательно, и на производительность шнекового пресса.

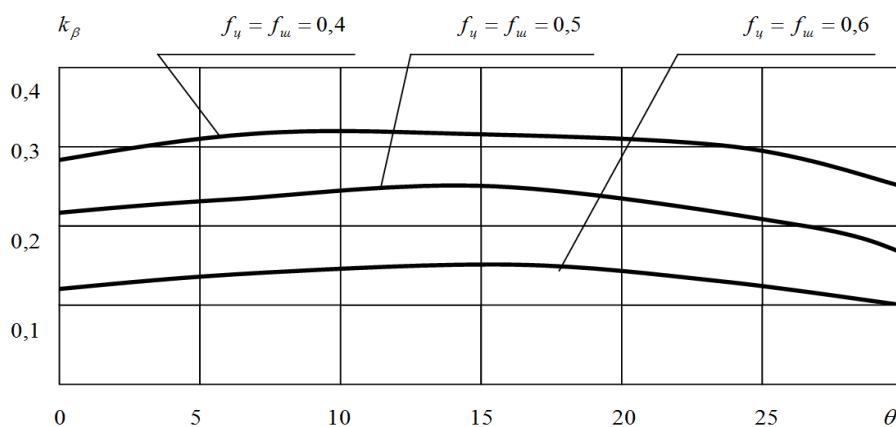


Рис. 4. Зависимость коэффициента подачи шнека от угла наклона образующих шнековой лопасти

На рис.4 представлена зависимость коэффициента подачи шнека  $k_\beta = \frac{Q_{\text{факт.}}}{Q_{\text{теор.}}} = \frac{1}{1 + \tan \alpha \tan \beta}$ , характеризующего эффективность работы шнекового пресса, от угла наклона образующих лопасти шнека при различных значениях коэффициента трения формируемой массы о металл шнека и корпуса пресса и следующих значениях геометрических параметров рабочих органов пресса: радиус лопасти шнека  $R = 0,2\text{м}$ ; радиус вала шнека  $r = 0,05\text{м}$ ; угол подъема винтовой линии шнека  $\alpha = 20^\circ$ .

**Выводы.** Количественные результаты показывают, что производительность шнекового пресса с лопастью, имеющей наклон от оси шнека к периферии, выше, чем у пресса с лопастью, образующие которой направлены по нормали к оси шнекового вала, на 10 – 30 % при подаче пластичных глиняных масс за счет увеличения поступательной составляющей движения формируемой массы в направлении продольной оси шнека. Анализ полученных результатов показывает, что рациональное значение угла наклона образующих шнековой лопасти зависит от свойств формируемой массы и составляет  $10 \div 20^\circ$ .

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-38-00287 мол\_а.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Герасимов М.Д. Теоретические и технические основы совершенствования шнековых прессов для формования керамических строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 160 с.
- Бауман В.А. Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1981. 324 с.
- Чаус К.В. Чистов Ю.Д., Лабзина Ю.В. Технология производства строительных материалов, изделий и конструкций: Учеб. для вузов. М.: Стройиздат, 1988. 448 с.
- Евстратова Н.Н. Самоочищающийся ленточный шнековый пресс // А.с. 1201168 СССР, МКИ В 30 В (/14.-373 5 903/25-27; Заявл. 08.05.84; Опубл. 30.12.85. Бюл.№48. 1985.
- Apachanov A.S., Rud A.V., Belousov K.Y. Modeling of the Motion Clay Mass in the Screw Channel of the Screw Press // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 906–910
- Силенок С.Г., Борщевский А.А., Горбовец М.Н. и др. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 388 с.
- Борщевский А.А., Ильин А.С. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1987. 376 с.
- Апачанов А.С., Григорьев В.И., Евстратова Н.Н. Влияние формы внутренней поверхности корпуса шнекового пресса на направление движения формируемой массы глины // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 14(127), серія гірниче-електромеханічна. Донецьк ДВНЗ «ДонНТУ», 2007. С. 128–132.
- Григорьев В.И., Белоусов К.Ю. Проектирование функциональных модулей шнековых прессов робототехнических комплексов // Вестник Саратовского государственного технического университета: 2013. №2(71). Выпуск 2. С. 239–244.
- Богданов В.С., Федоров Г.Д. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов. Учебник для студентов вузов по специальности «Механическое оборудование и технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов». Белгород, «Везелица», 2007. 446 с.
- Апачанов А.С., Усолкина А.Р., Носачев Н.И. Моделирование процесса движения глиняной массы в винтовом канале пресса и оптимизация параметров рабочих органов шнековых прессов // Перспектива – 2017: материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. III. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2017. С. 11–18.
- Евстратова Н.Н., Загороднюк В.Т. Оптимизация геометрических параметров рабочих органов шнекового питателя // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 1999. № 2. С. 109–111.
- Туренко А.В. Расчет глиноперерабатывающего оборудования и прессов пластического формования для производства керамических строительных изделий. М.: МИСИ, 1985. 86 с.
- Евстратова Н.Н., Линник Ю.Н., Юрченко В.И. Закономерности движения пластичного материала в шнековом канале винтового пресса // Современные технологии в машиностроении - 2003: Сб. статей VI Всерос. науч. - практич. конф. 26-27 февраля 2003 г. Пенза, 2003. С. 216–219.
- Евстратова Н.Н., Юрченко В.И. Расчет и проектирование шнековых прессов для формования глиняного кирпича. Новочеркасск. ЮРГТУ (НПИ) 2007 102 с.

---

**Apachanov A.S., Evstratov V.A.**

**INFLUENCE OF THE SCREW GEOMETRY ON THE PRODUCTION OF SCREW PRESS**

*High rates of modern housing, civil and industrial construction should be ensured by the corresponding rates of growth in the production of building materials, in general, and ceramic bricks in particular. In recent years, after the decline in the output of ceramic bricks, there has been a growing interest in it from architects, builders and other consumers. This interest is dictated, first of all, by the unique properties of ceramic bricks: strength, low thermal conductivity, architectural elegance, ecological purity. The issue of increasing production volumes and improving the quality of manufactured products while reducing energy costs has become especially relevant at the present time. A special place in the row of machinery and equipment for the production of ceramic bricks is press equipment, in particular, a screw vacuum press (hereinafter press).*

**Keywords:** a screw press, the screw shaft, forming the blade of the screw shaft, the screw feed ratio.

---

**Апачанов Антон Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Сервис и эксплуатация инженерной инфраструктуры в сфере ЖКХ.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова.

Адрес: Россия, 346500, Шахты, пл. Ленина, 1.

E-mail: aasprof@yandex.ru

**Евстратов Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры Фундаментальные инженерные дисциплины.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова.

Адрес: Россия, 346500, Шахты, пл. Ленина, 1.

E-mail: vae602@yandex.ru

<sup>1</sup>*Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.,*<sup>2</sup>*Качаев А.Е., канд. техн. наук,*<sup>1</sup>*Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.,*<sup>1</sup>*Кузнецова И.А., канд. эконом. наук, доц.*<sup>1</sup>*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*<sup>2</sup>*ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель»*

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ИЗМЕЛЬЧАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

igor\_boichuk@mail.ru

*В работе предложен подход к расчету энергозатрат при механическом предразрушении частиц с реализацией объемно-сдвигового деформирования с наложение на указанные процессы акустического воздействия*

**Ключевые слова:** микроразрушение полидисперсных частиц, расчет энергозатрат

**Введение.** Одним из перспективных направлений развития техники и технологий для получения востребованных в различных отраслях промышленности высокодисперсных материалов и композиционных смесей является использование широкой комбинаторики физико-механических способов и технических приемов микроразрушения полидисперсных частиц [1–4].

К числу таких технологических приемов относится механическое предразрушение частиц с реализацией их объемно-сдвигового деформирования при различных скоростных режимах, а также наложение на указанные процессы акустического или вихреакустического воздействия [5–7].

Данный принцип микроразрушения полидисперсных частиц может быть реализован в разработанной нами патентнозащищенной роторной мельнице [8].

**Определение энергозатрат процесса измельчения материалов в помольной камере мельницы.** Роторная мельница (рис.1) содержит корпус с установленными в нем узлами: загрузки, предварительного измельчения (ударное воздействие), основного ударно – акустического измельчения, истирающего измельчения и вихреакустического воздействия на материал (для дезагломерации частиц) [6]. Благодаря комбинированной конструкции, на измельчаемый материал оказывается комплексное воздействие.

На стадии предварительного измельчения используется принцип ударно – сдвиговых деформаций кусков материала, протекающего в пространстве образованного насадками 9, 10 и направляющим кольцом 7. Этот процесс возможен благодаря представленной конструкции ротора (рис.2).

На стадии основного измельчения материалов используется принцип ударно - истирающего воздействия: с отражательным эффектом о стенки ступенчатого статора 5, резонаторы 14 которого создают акустические волновые колебания частиц в среде воздуха, и скоростного удара о роторную нижнюю насадку 10. Дополнительное динамическое истирание частиц материала происходит при его движении между поверхностями внутренней 12 и наружной 20 гарнитур, которые на своих поверхностях имеют истирающие лопасти с противоположным вращению ротора направлением спирали. Такое конструктивное исполнение гарнитур роторной мельницы позволяет возвратить измельчаемый материал с периферии к центру помольной камеры и транспортировать его на следующую стадию обработки - вихре-акустическое диспергирование (дезагломерацию) частиц.

За счет такого сочетания принципов измельчения на различных этапах диспергирования достигается эффект сверхтонкого измельчения материалов в данной мельнице.

Оригинальная и компактная конструкция, возможность реализации комбинированного воздействия на материал обеспечивают следующие преимущества:

- тонкое и сверхтонкое диспергирование прочных горных пород (до 8 единиц по шкале Мооса);

- гомогенизация гетерогенных материалов композиционных смесей при измельчении частиц в воздушно-материальных потоках, в том числе с возможностью протекания механохимических реакций между смешиваемыми и измельчаемыми компонентами;

- дезагломерация коагулируемых в процессе измельчения частиц.

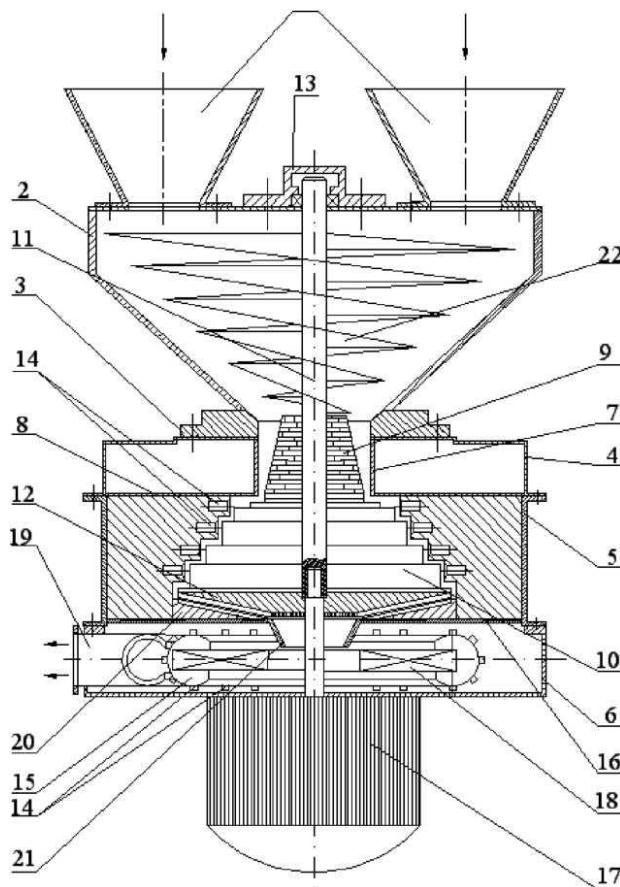


Рис. 1. Роторно-центробежная мельница

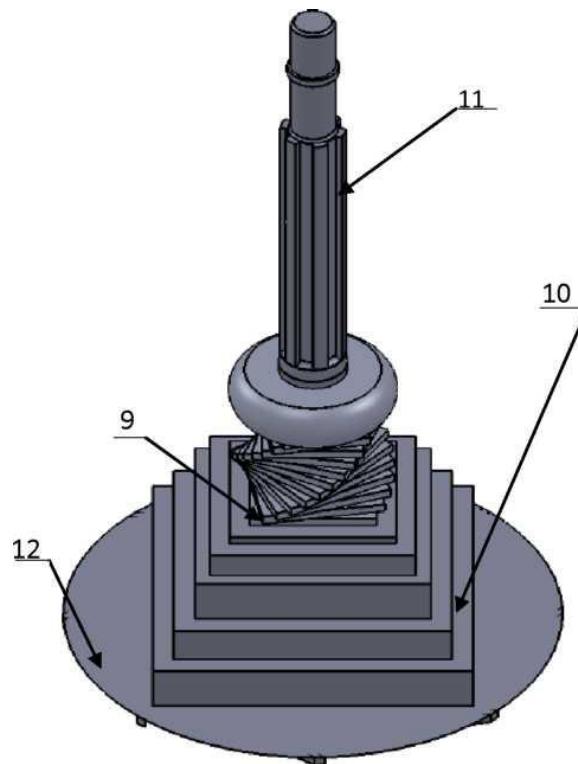


Рис. 2. Ротор

Обозначения: 1 – загрузочные воронки; 2 – загрузочный бункер; 3 – фланец крепления загрузочного бункера; 4 – верхняя часть корпуса; 5 – ступенчатый статор; 6 – днище; 7 – направляющее кольцо; 8 – верхний разделительный диск; 9 – роторная верхняя насадка; 10 – роторная нижняя насадка; 11 – вал; 12 – внутренняя гарнитура; 13 – подшипниковая опора; 14 – трубные резонаторы; 15 – эксцентричная торообразная камера; 16 – нижний разделительный диск; 17 – электродвигатель; 18 – крыльчатка; 19 – разгрузочный патрубок; 20 – наружная гарнитура; 21 – направляющий конус; 22 – винтовой шнек

При рассмотрении процесса измельчения материалов в роторной мельнице представим полезную работу, затрачиваемую на измельчение, в качестве суммы следующих составляющих работ:  $A_{yo}$  – работа ударного воздействия, Н · м;  $A_{ust}$  – работа истирания (трения), Н · м;  $A_{ak}$  – работа разрушения тонких частиц под воздействием колебаний акустических волн, Н · м. При этом на различных стадиях помола материала в мельнице величины каждой из составляющих полной работы измельчения будут представлены различными аналитическими выражениями. Общее выражение полной работы измельчения можно представить в виде:

$$A_{\text{полезн}} = A_{yo} + A_{ust} + A_{ak} \quad (1)$$

Механизм ударного воздействия, реализуемый в роторной мельнице, может быть описан для всех стадий измельчения общим аналитическим выражением. Ударное разрушение частиц материала в мельнице происходит, когда энергия упругой деформации, накопленная в частице,

трансформируется в энергию образования новой поверхности [9]:

$$A_{yo} = \frac{\sigma_c^2 \cdot V_u}{2E} \quad (2)$$

где  $\sigma_c$  – предел прочности частицы материала на сжатие, Па;  $V_u$  – объем частицы измельчаемого материала, м<sup>3</sup>;  $E$  – модуль упругости измельчаемого материала, Па.

В различных математических моделях определения энергетических затрат на измельчение используется допущение о сферической форме частиц [10]. С одной стороны, данное допущение упрощает математические преобразования выражений для вычисления работы ударных деформаций и расчеты энергозатрат при ударном нагружении частиц материала; с другой стороны, такой подход к моделированию ударного разрушения частиц более идеализирован, что не позволяет в полной мере использовать существующие теории прочности материалов и с большей точ-

ностью приблизиться к результатам экспериментальных исследований процесса измельчения.

В виду того, что в мельнице при ударном нагружении частицы силовое воздействие приводится к точке контакта самой частицы и ударного элемента, то можно предположить, что геометрическая форма частицы не играет важной роли при определении работы, расходуемой на ударное измельчение материала. Однако необходимо учитывать, что форма частиц измельчаемого материала, особенно геометрия частиц осколочной конфигурации, оказывает существенное влияние на процесс движения двухфазного потока в помольной камере мельницы (сказывается на сопротивлении двухфазного потока вращающемуся ротору), а так же на процесс агрегации частиц в воздушном потоке.

В соответствии с исследованиями [11, 12] при определении работы, затрачиваемой на ударное разрушение частиц в мельнице, необходимо использовать соотношение начальной скорости частицы до удара к значению ее скорости после удара (теорема Карно) в качестве энергетического параметра  $\delta$ :

$$\delta = \frac{v_H}{v_K}, \quad (3)$$

где  $v_H$  – начальная скорость частицы измельчаемого материала при движении его в вертикальном направлении до удара (в момент соударения частицы с ударным элементом мельницы ее значение превращается в нуль),  $м/с$ ;  $v_K$  – конечная скорость частицы измельчаемого материала в момент соударения с ударным элементом мельницы,  $м/с$ .

Величина  $v_K$  определяет характер деформации частицы измельчаемого материала и значительно (на несколько порядков) превышает величину  $v_H$ .

Энергетический параметр  $\delta$  характеризует долю энергии, которая расходуется на ударное измельчение материала. Известно [10], что прочность материала значительно возрастает с достижением частицей определенного критического размера  $d_{kp}$ , который определяется в зависимости от физико-механических свойств материала. Следовательно, в процессе измельчения от воздействия ударной нагрузки происходит разрушение частиц на две фракционные группы: частицы с докритическими геометрическими размерами и частицы с размерами, меньшими чем критический.

В первой части процесса ударного измельчения влиянием масштабного коэффициента обычно пренебрегают ввиду малого проявления, а, следовательно, возможно принять значе-

ние прочности материала на сжатие (раздавливание) постоянным. Предположим, что первая часть процесса измельчения – от начального размера куска (частицы)  $d_0$  до критического размера  $d_{kp}$  – реализуется на протяжении  $p_1$  этапов. Значит, величина энергии, которая необходима для разрушения ударом одной частицы материала в первой части процесса измельчения, будет определяться соотношением:

$$A_{yol} = \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i \frac{\sigma_c^2 \cdot V_q}{2E} = \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i \frac{\sigma_c^2 \cdot \pi \cdot d^3}{12E} \cong \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i \frac{0.25\sigma_c^2 \cdot k \cdot d^3}{E}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр частицы,  $м$ ;  $k$  – коэффициент формы частицы измельчаемого материала.

Во второй части процесса ударного измельчения предел прочности начинает расти, потому что его величина будет зависеть от размера частицы (степени измельчения или технологического этапа обработки в мельнице). Согласно результатам работы [9], на втором этапе процесса ударного измельчения становится возможным проявление масштабного фактора, начиная с размера частицы, равного  $d_{kp}$ , в виде экспоненциальной зависимости предела прочности от размера частиц. Поэтому выражение для определения предела прочности будет иметь вид:

$$\sigma_i = \sigma_c + \sigma_{meop}(1 - e^{-ai}), \quad (5)$$

где  $\sigma_i$  – граничное значение прочности на сжатие при ударе на  $i$ -том этапе измельчения,  $Па$ ;  $\sigma_c$  – предел прочности частицы материала на сжатие для частиц более чем  $d_{kp}$ ,  $Па$ ;  $\sigma_{meop}$  – теоретическое значение предела прочности материала на сжатие при ударе,  $Па$ ;  $a$  – коэффициент масштабного эффекта, который определяется эмпирически для каждого конкретного материала;  $i$  – этап измельчения.

Для второй части процесса значение энергии, расходуемой на измельчение одной частицы материала от начального размера  $d_{kp}$  до заданного, можно определить из следующего выражения:

$$A_{yol2} = \frac{0.25k \cdot d_{kp}^3}{E} \sum_{i=0}^{p_2} \delta_i (\sigma_c + \sigma_{meop}(1 - e^{-ai}))^2, \quad (6)$$

где  $p_2$  – количество этапов измельчения второй части процесса.

Теоретическое значение предела прочности материала на сжатие при ударе  $\sigma_{teor}$ . в работах [9,10] определяют с помощью уравнения Орована - Келли:

$$\sigma_{meop} = \sqrt{\frac{E \cdot \mathcal{E}_{nov}}{r_0}}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}_{nov}$  – поверхностная энергия твердого тела на  $1 \text{ см}^2$ ;  $r_0$  – равновесное межатомное расстояние (в

среднем  $2 \cdot 10^{-8}$  см).

Теоретическая прочность однородного материала характеризуется напряжением, необходимым для разделения двух примыкающих друг к другу слоев атомов. Для многих твердых тел со сложной структурой при известной прочности связи двух изолированных атомов переход от энергии парного взаимодействия к энергии атомов в твердом теле затруднителен. Поэтому проведение достаточно строгих расчетов теоретической прочности с помощью уравнения Орована-Келли пока невозможно. Однако теория прочности Мора позволяет определить теоретическую величину предела прочности материала с учетом нормальных напряжений, возникающих при соударении частицы с ударным элементом мельницы.

Рассмотрим процесс соударения частицы материала с ударным элементом (рис. 3).

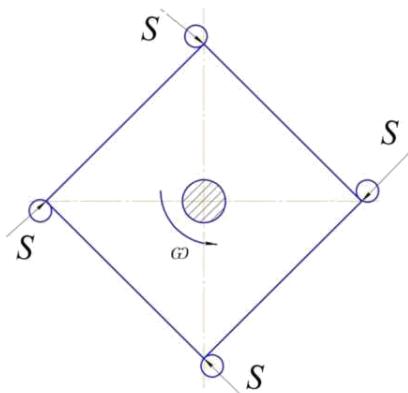


Рис. 3 Ударное воздействие пластины ротора на частицу материала

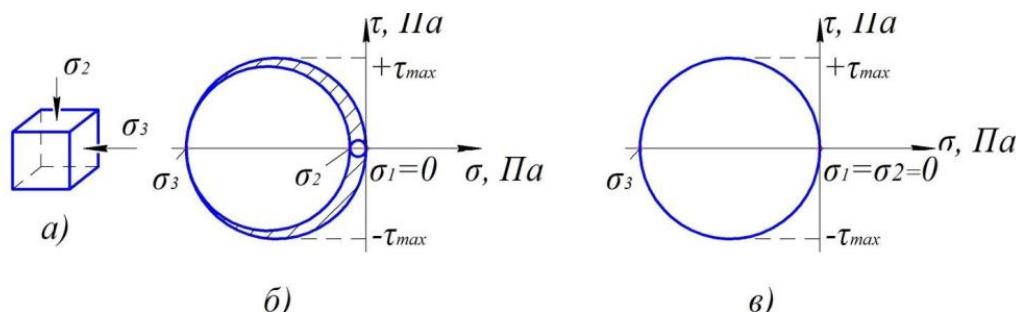


Рис. 5. Условия напряжений сжатия по Мору при ударном воздействии пластин ротора на частицы материала

Обозначим нормальные напряжения от ударного импульса  $S_u$  через  $\sigma_3$ , а от действия силы подпора  $F_{nod}$  через  $\sigma_2$ , как показано на рис. 5 а. При этом следует отметить, что величина  $\sigma_1$  - напряжения от взаимодействия с другими частицами в потоке - будут малы, а энергии для их измельчения не будет достаточно для получения частиц с размером менее  $d_{kp}$  (приравняем их к нулю –  $\sigma_1 = 0$ ), как показано на рис. 5 б.

Под действием вращения ротора, состоящего из пластин, с угловой скоростью  $\omega$  происходит ударное воздействие на частицы измельчаемого материала с импульсом  $S_{yo}$ . В результате чего на частицу оказывается давление  $P_{yo}$ , причем величина данного давления равна напряжению сжатия под действием ударного импульса  $S_{yo}$ .

На интенсивность процесса измельчения в мельнице немаловажно значение оказывает скорость загрузки материала в помольную камеру. Данный технологический параметр будет определять силу подпора  $F_{nod}$  материала в помольной камере и определять скорость его движения вдоль вертикальной оси мельницы. Таким образом, на частицу во время ударного взаимодействия пластины будет оказывать воздействие давление, вызываемое силой подпора материала  $F_{nod}$ .

Используя теорию прочности материалов Мора, можно проанализировать не только физику процесса измельчения в помольной установке, но и аналитически определить величину предела прочности материала с учетом касательных напряжений, вызванных нормальным давлением ударного импульса  $S_{yo}$ , чего не позволяет сделать уравнение Орована - Келли. Графическая интерпретация теории Мора для определения теоретического предела прочности измельчаемого материала, а, следовательно, и нормальных напряжений для эффективного ударного разрушения частиц в мельнице, представлена на рис. 5.

Из выражения (3) следует, что конечная скорость частицы в момент соударения с вращающимся ударным элементом ротора будет на несколько порядков превышать значение начальной скорости частицы до удара. Следовательно, скорость деформации частицы под действием ударного импульса  $S_{yo}$  будет также на несколько порядков больше скорости деформации частицы от силы подпора материала  $F_{nod}$ . Поэтому можно

утверждать, что  $\sigma_2 < \sigma_3$ . На основании этого отнесем ее к нулевым параметрам  $\sigma_2 = 0$ . (рис. 5 в). Таким образом, получаем линейное напряженное состояние элементарного объема  $dV_q$  частицы, с помощью которого по теории Мора определяем значения нормальных напряжений от сжимающего импульса  $S_{y\delta}$  ударной силы (под действием удара происходит одностороннее сжатие  $\sigma_3 < 0$ ).

Тогда нормальные напряжения  $\sigma_3$  от ударного импульса  $S_{y\delta}$  пластины по частице измельчаемого материала в соответствии с диаграммой, показанной в виде кругов Мора на рис. 5 в, можно определить из критерия разрушения (измельчения):

$$|\sigma_3| = [\sigma]_c, \quad (8)$$

где  $[\sigma]_c$  – допускаемые напряжения сжатия измельчаемого материала, Па, определяемые из равенства:

$$[\sigma]_c = \sigma_{meop}. \quad (9)$$

На основании выражений (8) и (9) можно получить, что:

$$\sigma_3 = \sigma_{meop}. \quad (10)$$

Основываясь на физическом смысле нормальных напряжений сжатия, вызванных ударным импульсом  $S_{y\delta}$ , запишем:

$$\sigma_3 = \frac{F_{y\delta}}{S_{y\delta}}, \quad (11)$$

где  $F_{y\delta}$  – сила удара пластины ротора по частице измельчаемого материала, Н;  $S_{y\delta}$  – площадь контакта частицы с ударным элементом во время взаимодействия,  $m^2$ .

В виду различных геометрических форм частицы и ее размеров импульс  $S_{y\delta}$  от ударной силы  $F_{y\delta}$  будет передаваться самой частице через бесконечно малое значение (контакт в точке), тогда:

$$\sigma_3 = \lim_{S_{y\delta} \rightarrow 0} \frac{F_{y\delta}}{S_{y\delta}} = sign(F_{y\delta}), \quad (12)$$

С учетом (12) выражение (5) примет вид:

$$\sigma_i = \sigma_c + sign(F_{y\delta}) (1 - e^{-ai}), \quad (13)$$

Полученное аналитическим путем выражение (13) позволяет численно определить граничное значение прочности на сжатие при ударе на  $i$ -том этапе измельчения в косвенной (опосредованной через  $F_{y\delta}$ ) зависимости от геометрических размеров ударных элементов мельницы и их линейной скорости во время удара. Выражение для определения линейной скорости ударного элемента будет получено ниже.

Как видно из диаграммы Мора, показанной

на рис. 5 б и в, нормальные напряжения сжатия при ударе способствуют появлению касательных напряжений  $\tau$  в частице, которые можно определить из выражения:

$$\tau_{min}^{max} = \pm \frac{\sigma_{meop}}{2}. \quad (14)$$

Половинное значение  $\tau$ , действующих на частицу при ударном воздействии, от величины  $\sigma_{meop}$  не влияет на процесс ударного измельчения в мельнице, но сказывается на эффективности разрушения материала при дальнейшем циклическом нагружении (согласно теории разрушения Гриффитса) [9].

На данном этапе теоретических исследований можно сделать вывод, что в процессе ударного измельчения материала происходят ударно-сдвиговые деформации частиц, которые приводят не только к образованию новых поверхностей измельчаемого материала, но и способствуют более легкому разрушению тонких частиц на последующих стадиях измельчения.

С учетом (13) выражение (6) примет вид

$$A_{y\delta 2} = \frac{0.25k \cdot d_{kp}^3}{E} \sum_{i=0}^{p_2} \delta_i (\sigma_c + sign(F_{y\delta}) (1 - e^{-ai}))^2. \quad (15)$$

В процессе измельчения в момент ударного воздействия в бесконечно малом промежутке времени частицы материала могут разрушаться от истирания ввиду того, что трение частицы по поверхности ударного элемента ротора способствует накоплению разрушительных напряжений в бесконечно тонких слоях. Каждый этап разрушения, когда за счет истирания увеличивается количество дисперсных частиц (обозначим  $(1 - \delta)$ ), содержит в себе множество последовательностей истирания сверхтонких слоев материала, суммарный объем которых составляет  $k \cdot d_{kp}^3 (1 - \delta^n)$ .

Поскольку процесс истирания протекает поэтапно с накоплением разрушающего напряжения в сверхтонких слоях частиц материала, то предел прочности для этого процесса стремится к теоретическому значению за счет малых объемов накопления и разрушения. Это вызвано минимально возможным количеством дефектов структуры для бесконечно малого объема материала. Поэтому можно записать, что работа сил трения, которая расходуется на истирание  $(1 - \delta)$  части материала для частиц с исходным размером  $d$ , равна:

$$A_{u1} = \frac{0.25\sigma_{meop}^2}{E} k \cdot d^3 (1 - \delta^{p_1}) \quad (16)$$

для первой части процесса измельчения;

$$A_{u2} = \frac{0.25\sigma_{meop}^2}{E} k \cdot d_x^3 (1 - \delta^{p_2}) \quad (17)$$

для второй части.

Аналитическое выражение, определяющее работу, которая расходуется на измельчение частицы материала от начального размера  $d$  до размера начала появления масштабного эффекта  $d_{kp}$  за  $p_1$  этапов, определяется суммой уравнений (4) и (16):

$$A_{y02} + A_{u2} = \frac{0.25k \cdot d_{kp}^3}{E} \left( \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i (\sigma_C + sign(F_{y0}) (1 - e^{-\alpha i}))^2 + \sigma_{meop}^2 (1 - \delta^{p_2}) \right). \quad (18)$$

Если рассматривать измельчение частицы от начального размера  $d$ , большего чем  $d_{kp}$ , к конечному размеру  $d_k$ , который меньше чем  $d_{kp}$ , работа, затрачиваемая на измельчение, выражается в виде суммы уравнений (18) и (19). При этом необходимо учитывать, что в начале второй части

$$A_{y0} + A_u = \frac{0.25k}{E} \cdot \left[ d^3 \left( \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i \sigma_C^2 + \sigma_{meop}^2 (1 - \delta^{p_1}) \right) + 2^{p_1} d_{kp}^3 \left( \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i (\sigma_C + sign(F_{y0}) (1 - e^{-\alpha i}))^2 + \sigma_{meop}^2 (1 - \delta^{p_2}) \right) \right]. \quad (20)$$

Сумма работ ударного и истирающего воздействия на частицы определяется условиями их измельчения на каждом этапе, т.е. характером воздействия различных ударных элементов ро-

$$A_{y0} + A_u = \frac{M_M}{E \rho_q} \cdot \left[ \left( \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i \sigma_C^2 + \sigma_{meop}^2 (1 - \delta^{p_1}) \right) + 2^{p_1} \frac{d_{kp}^3}{d^3} \left( \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i (\sigma_C + sign(F_{y0}) (1 - e^{-\alpha i}))^2 + \sigma_{meop}^2 (1 - \delta^{p_2}) \right) \right]. \quad (21)$$

где  $\rho_q$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для того чтобы выразить значение энергии, необходимой для измельчения материала, в зависимости от геометрических размеров частиц материала, необходимо определить количество этапов измельчения в каждой части этого процесса. Максимально возможная степень измельчения материала  $i_i = d/d_k$  – равна отношению начального размера частицы  $d_k$  ее конечному размеру  $d_k$ . С каждым последующим этапом частица разрушается на  $c$  микрочастиц. Следовательно, можно записать:

$$c^p = \frac{d^3}{d_k^3} = i_i^3. \quad (22)$$

$$A_{y0} + A_u = \frac{M_M}{E \rho_q} \cdot \left[ \left( \sum_{i=0}^{10 \lg \frac{d}{d_k}} \delta_i \sigma_C^2 + \sigma_{meop}^2 \left( 1 - \delta^{10 \lg \frac{d}{d_k}} \right) \right) + 2^{10 \lg \frac{d_{kp}}{d_k}} \frac{d_{kp}^3}{d^3} \left( \sum_{i=0}^{10 \lg \frac{d}{d_k}} \delta_i (\sigma_C + sign(F_{y0}) (1 - e^{-\alpha i}))^2 + \sigma_{meop}^2 \left( 1 - \delta^{10 \lg \frac{d_{kp}}{d_k}} \right) \right) \right]. \quad (24)$$

Для определения третьего составляющего уравнения (1) работы разрушения частиц под воздействием колебаний акустических квазиу-

После суммирования уравнений (15) и (17) получаем выражение для определения работы, которая расходуется на измельчение частицы материала от размера начала проявления масштабного эффекта  $d_{kp}$  до конечного размера  $d_k$  в  $p_2$  этапов:

$$A_{y02} + A_{u2} = \frac{0.25k \cdot d^3}{E} \left( \sum_{i=0}^{p_1} \delta_i (\sigma_C + sign(F_{y0}) (1 - e^{-\alpha i}))^2 + \sigma_{meop}^2 (1 - \delta^{p_2}) \right). \quad (19)$$

процесса измельчения участвует  $c^{p_1}$  частиц размером  $d_{kp}$ , которые были получены в результате измельчения начальной частицы за  $p_1$  этапов. Условно принимаем значение количества частиц, образующихся в результате раскалывания под влиянием ударной силы  $F_y c_{min} = 2$ . Отсюда сумма первых двух членов уравнения (1) равна:

тора мельницы. Чтобы получить аналогичную зависимость для измельчения материала массой  $M_M$ , необходимо выражение (20) домножить на количество частиц  $N$ , содержащихся в материале массой  $M_M$ :

В виду того, что было принято выше  $c_{min} = 2$ , определим количество этапов для получения определенного размера доли измельчаемого материала:

$$p = \frac{3 \lg i_i}{\lg 2} \approx 10 \lg \frac{d}{d_k}. \quad (23)$$

Из выражения (23) можно получить количество этапов первой и второй частей процесса измельчения.

Таким образом, работа, затрачиваемая на измельчение частиц объемной массой  $M_M$  при совмещении способа ударного и истирающего воздействия от начальных  $d$  до конечных размеров  $d_k$ , определяется выражением:

$$A_{ak} = P_{ak} d_x^3, \quad (25)$$

пругих волн, генерируемых резонаторами,  $A_{ak}$  используем следующее выражение:

$$127$$

где  $P_{ак}$  – звуковое или акустическое давление в среде, представляет собой разность между мгновенным значением давления в данной точке среды при наличии звуковых колебаний и статического давления в той же точке при их отсутствии,  $Pa$ ;  $d_x^3$  – объем частицы, подвергшейся воздействию акустического давления,  $m^3$ .

Звуковое давление есть переменное давление в среде, обусловленное акустическими колебаниями. Максимальное значение переменного акустического давления (амплитуда давления)

$$A_{нолезн} = P_{ак}d_x^3 + \frac{M_M}{E\rho_q} \cdot \left[ \left( \sum_{i=0}^{10\lg \frac{d}{d_k}} \delta_i \sigma_C^2 + \sigma_{meop}^2 \left( 1 - \delta^{10\lg \frac{d}{d_k}} \right) \right) + 2 \right]$$

Выражение (27) может быть использовано для определения энергозатрат процесса сверхтонкого измельчения в роторной вихре-акустической мельнице предложенной конструкции. Данное выражение свидетельствует о том, что в процессе помола, когда размер частиц конечного продукта больше критического размера частицы, более рационально использовать процесс ударно-истирающего воздействия. Для получения супер тонких частиц с конечным размером меньше критического целесообразно использовать процесс акустического воздействия с квазиупругими волнами. Подтверждением данного утверждения являются результаты теоретических и экспериментальных исследований вихре-акустических диспергаторов различного конструктивно-технологического исполнения [11, 12].

Таким образом, в работе предложен подход расчета энергозатрат для процесса получения высокодисперсных материалов и композиционных смесей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
- Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. М.: Наука, 1985. 440с.
- Севостьянов В.С. Энергосберегающие помольные агрегаты. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 436с.
- Евтушенко Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2003. 209с.

может быть рассчитано через амплитуду колебания частиц в воздушной среде по формуле [10]:

$$P_{ак} = 2\pi \cdot f \cdot \rho_c \cdot C \cdot A_u, \quad (26)$$

где  $f$  – частота колебания разрушающей частицу волны,  $\Gamma\psi$ ;  $\rho_c$  – плотность несущей среды (или двухфазного потока),  $kg/m^3$ ;  $C$  – скорость распространения ультразвука в среде,  $m/s$ ;  $A_u$  – амплитуда колебания частиц,  $m$ .

С учетом выражений (24) и (25), для определения полезной работы в соответствии с уравнением (1) получим:

$$A_{нолезн} = P_{ак}d_x^3 + \frac{M_M}{E\rho_q} \cdot \left[ \left( \sum_{i=0}^{10\lg \frac{d}{d_k}} \delta_i \left( \sigma_C + sign(F_{y\vartheta}) (1 - e^{-ai})^2 \right) + \sigma_{meop}^2 \left( 1 - \delta^{10\lg \frac{d}{d_k}} \right) \right) + 2 \right] \quad (27)$$

5. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Синицына Е.И., Уральский А.В. Центробежные измельчители. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 141 с.

6. Патент 2250138 РФ. Вихреакустический диспергатор. А.М. Гридин, В.С. Севостьянов, В.С. Лесовик, А.С. Горлов, Д.Н. Перельгин и др. Опубл. в Б.И. №11 2005г.

7. Севостьянов В.С., Перельгин Д.Н., Уральский В.И., Горлов А.С., Глаголев Е.С., Барабаевский А.Н. Разработка и исследование энергосберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С.76–80.

8. Патент 2444407 РФ. Роторная мельница. С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридин, А.Е. Качаев и др. Опубл. в Б.И. №7 2010г.

9. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.

10. Стрэтт Дж. В. (Лорд Рэлей) Теория звука. пер. с англ. в 2-х томах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1940. Т. 1. 500 с. Т. 2. 476 с.

11. Бойчук И.П., Перельгин Д.Н. Комплексные исследования акустического воздействия на газопылевой поток в вихре-акустическом диспергаторе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2017. № 1. С. 155–161

12. Перельгин Д.Н., Севостьянов В.С., Бойчук И.П., Кузнецова И.А. Исследование ударного контакта абразивных частиц с футеровкой вихре-акустического диспергатора // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 122–125.

---

**Sevostyanov V.S., Kachaev A.E., Boychuk I.P., Kuznetsova I.A.**

**THEORETICAL STUDIES OF PROCESSES IN A ROTARY MILL WITH COMBINED  
EFFECTS ON A REDUCED MATERIAL**

*The paper suggests an approach to the calculation of energy costs in the mechanical pre-destruction of particles with the implementation of volume-shear deformation with the imposition of acoustic effects on these processes*

**Keywords:** microdispersion of polydisperse particles, calculation of energy costs.

---

**Севостьянов Владимир Семенович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: tkmm\_bstu@mail.ru

**Качаев Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук.

ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель» ПАО «Горнпромышленная финансовая компания».

Адрес: Россия, 140200, Московская область, г. Воскресенск, ул. Гаражная, 1.

E-mail: doctor\_cement@mail.ru

**Бойчук Игорь Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: igor\_boichuk@mail.ru

**Кузнецова Ирина Анатольевна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и организации производства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Федоренко М.А., д-р техн. наук, проф.,  
Погонин А.А., д-р техн. наук, проф.,  
Бондаренко Ю.А., д-р техн. наук, проф.**

**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ИЗНОСА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ

kdsm2002@mail.ru

*В настоящее время все большую актуальность приобретают проблемы повышения надежности и долговечность оборудования и оптимизация существующих технологий производства. Эффективному решению этой проблемы будет способствовать восстановление работоспособности изношенных крупногабаритных узлов и деталей оборудования цементной промышленности на месте их эксплуатации без демонтажа с потерявших надежность агрегатов.*

**Ключевые слова:** станок, помольные мельницы, восстановление, крупногабаритные детали, износ.

**Введение.** Поверхности крупногабаритных узлов, которые обрабатывают на нестационарных станках, имеют различное функциональное назначение в агрегате, поэтому станки должны производить чистовую и черновую обработку при выполнении различных технологических операций.

Особенностью выполнения восстановительных работ нестационарными станками на крупногабаритном оборудовании является то, что станок может устанавливаться на детали, под или рядом с изношенной деталью. Так как обрабатываемые изделия по размерам превосходят размеры станка, то станок может быть установлен под деталью, при использовании для базирования вспомогательной базы. Если станок устанавливается на деталь, то необходимы базы, на которых он базируется относительно обрабатываемой поверхности и базы для его закрепления [1–4].

Следует учитывать то, что обрабатываемая деталь базируется не по тем технологическим базам, которые использовались на заводе-изготовителе, а приходится применять конструкторские базы, определяющие положение восстанавливаемой детали в узле и относительно других деталей. Таким образом, смена баз и использование в технологических размерных цепях новых составляющих звеньев или их уменьшение вызывает изменение размера замыкающего звена.

Формообразование при обработке поверхностей приставными станками имеет свои особенности, основная из которых – неопределенность базирования, что особенно характерно для восстановления валов.

**Основная часть.** Разработанный станок можно устанавливать на любой удобной для закрепления станка поверхности так, чтобы траектория продольной подачи, была параллельна оси вращения восстанавливаемой детали. Кроме того, необходимо, чтобы ось вращения и траектория движения резца находились в одной плоскости. Конфигурация поверхности обрабатываемого изделия представляет собой поверхность вращения, образующей которой является траектория продольной или поперечной подач, или их сочетание. Поэтому формообразование следует показать как вращение отрезков кривой вокруг оси поверхности, подлежащей обработке. Это дает возможность рассмотреть процесс формообразования различных тел вращения.

Для нахождения угловой погрешности установки станка относительно крупногабаритной детали, надо учитывать, что она может иметь поверхность вращения любой формы. Рассмотрим некоторые варианты.

Однополостной гиперболоид, его поверхность представляет собой дважды линейчатую поверхность, эти линии являются траекторией движения инструмента при восстановлении.

Уравнение однополостного гиперболоида:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1. \quad (1)$$

После преобразования имеем:

$$\left( \frac{x}{a} + \frac{z}{c} \right) \left( \frac{x}{a} - \frac{z}{c} \right) = \left( 1 + \frac{y}{b} \right) \left( 1 - \frac{y}{b} \right). \quad (2)$$

Получим системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x}{a} + \frac{z}{c} = k_1 \left( 1 + \frac{y}{b} \right), \\ \frac{x}{a} - \frac{z}{c} = \frac{1}{k_1} \left( 1 - \frac{y}{b} \right) \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{x}{a} + \frac{z}{c} = k_2 \left( 1 - \frac{y}{b} \right), \\ \frac{x}{a} - \frac{z}{c} = \frac{1}{k_2} \left( 1 + \frac{y}{b} \right) \end{cases} \quad (3)$$

где  $K_1, K_2$  – произвольные параметры, изменяя которые получим совокупность прямых на поверхности гиперболоида. Представим уравнение (3):

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\frac{x}{a} + \frac{z}{c}}{1 + \frac{y}{b}} \\ k_2 = \frac{\frac{x}{a} + \frac{z}{c}}{1 - \frac{y}{b}} \end{cases} . \quad (4)$$

$$\begin{cases} n_1 \left( \frac{1}{a}; \frac{k_1}{b}; \frac{1}{c} \right) \\ n_2 \left( \frac{1}{a}; \frac{1}{k_1 b}; \frac{1}{c} \right) \\ n_3 \left( \frac{1}{a}; \frac{k_2}{b}; \frac{1}{c} \right) \\ n_4 \left( \frac{1}{a}; \frac{1}{k_2 b}; \frac{1}{c} \right) \end{cases} \quad (5)$$

$$l_1 = \overline{n_1} \times \overline{n_2} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{1}{a} & -\frac{k_1}{b} & \frac{1}{c} \\ \frac{1}{a} & \frac{1}{k_1 b} & -\frac{1}{c} \end{vmatrix} \quad l_2 = \overline{n_3} \times \overline{n_4} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{1}{a} & \frac{k_1}{b} & \frac{1}{c} \\ \frac{1}{a} & -\frac{1}{k_1 b} & -\frac{1}{c} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

$$\overline{l}_1 \times \overline{l}_2 = |l_1| \times |l_2| \times \cos \psi. \quad (7)$$

После преобразования получили угол установки станка в вертикальной плоскости:

$$\cos \psi = \frac{\frac{1}{b^2 c^2} (k_1 - \frac{1}{k_1}) (\frac{1}{k_2} - k_2 + \frac{4}{a^2 c^2} - \frac{1}{a^2 b^2} (k_1 + \frac{1}{k_1}) (k_2 + \frac{1}{k_2}))}{\sqrt{\left[ \frac{1}{b^2 c^2} (k_1 - \frac{1}{k_1})^2 + \frac{4}{a^2 c^2} + \frac{1}{a^2 b^2} (k_1 + \frac{1}{k_1})^2 \right] \left[ \frac{1}{b^2 c^2} (\frac{1}{k_2} - k_2)^2 + \frac{4}{a^2 c^2} + \frac{1}{a^2 b^2} (k_2 - \frac{1}{k_2})^2 \right]}}$$

Окончательно:

$$\cos \psi = \frac{y_0^2 + x_0^2 - c}{y_0^2 + x_0^2 + c} = \frac{a^2 - c^2}{a^2 + c^2}. \quad (9)$$

Угол установки станка в вертикальной плоскости  $\psi$  определяется положением пары образующих в плоскости, которая перпендикулярна образованной продольной и поперечной подачами

плоскости. Погрешность установки станка будет:  $a = \pm \frac{\psi}{2}$ .

Для определения траектории движения точки по изношенной поверхности детали, имеющей форму катеноида, с целью обеспечения получения цилиндрической формы запишем в векторной форме:

$$\left. \begin{array}{l} y = r \cos \varphi \sin t \\ z = r \cos \varphi \cos t \\ x = r \sin \varphi \end{array} \right\}. \quad (10)$$

т.е.

$$r = r \left[ (\cos \varphi \sin t) \hat{i} + (\cos \varphi \cos t) \hat{j} + (\sin \varphi) \hat{k} \right] \quad (11)$$

Выбираем произвольно  $y_i$  и при фиксированных  $x, \theta, \alpha$  определяем  $z_i$ , где  $x_i, y_i, z_i$  - координаты точек катеноида. Далее подставляя для каждого фиксированного  $x_i^*$  множество значений  $y_i^*$ , определяем  $z_i^*$ . Для каждого  $z_i$  определим  $y_i^*$ . Определим параметры кривой, по которой будет перемещаться резец. При угловой скорости  $\omega = \omega_0 = const$  в каждый момент времени  $t$  фиксируем угол  $\alpha$ . Зная координаты  $z, x$  определяем  $y, y^*$ , и  $\Delta y = |y - y^*|$  для конкретной точки. Скорость движения резца  $V = V(t)$ , тогда:

$$x = \int_0^{t_0} V(t) dt. \quad (12)$$

Проведем преобразования и определим:

$$V(t) = \sqrt{\left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dx}{dt} \right)^2}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = 2 \left( \sum_{n=1}^k |y - (y \cos \omega t + z \sin \omega t)| \right) * (y \omega \sin \omega t - z \omega \cos \omega t) = 0,$$

$$y \omega \sin \omega t = z \omega \cos \omega t, \quad \frac{x}{z} = \operatorname{tg} \omega t,$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^k |ytg \omega t - (-y \sin \omega t + ytg \omega t \cos \omega t) - a - \delta(\omega t) + \Delta_\alpha t|^2 = \sum_{n=1}^k |ytg \omega t - a - \delta(\omega t) + \Delta_\alpha t|^2 \rightarrow \min$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = 2 \left( \sum_{n=1}^k |ytg \omega t - (-y \sin \omega t + ytg \omega t \cos \omega t) - a - \delta(\omega t) + \Delta_\alpha t| \right) * \left( \frac{y \omega}{\cos^2 \omega t} - \omega \delta'(\omega t) + (\Delta_\alpha t)' = 0 \right),$$

$$\frac{y \omega}{\cos^2 \omega t} = \omega \delta'(\omega t) - (\Delta_\alpha t)' \quad (15)$$

Таким образом, найдём угол установки станка  $y = \psi(t)$ .

Система уравнений позволяет получить траекторию движения резца при обработке катеноида:

$$\left. \begin{array}{l} S_1 = \sum_{n=1}^k |y - y^*|^2 \\ S_2 = \sum_{n=1}^k |z - z^*|^2 \\ S_3 = \sum_{n=1}^k |x - x^*|^2 \end{array} \right\} \rightarrow \min \quad (13)$$

С учетом:

$$\Delta x = \int_0^{\Delta t} V(t) dt = \int_0^{\alpha / n \omega} V(t) dt, \\ h = \int_0^{\alpha_0 / n \omega} V(t) dt = F\left(\frac{\alpha_0}{n \omega}\right) - F(0) = F\left(\frac{\alpha_0}{n \omega}\right). \quad (14)$$

Находим:

$$S_3 = \sum_{n=1}^k \left| \left( \int_0^t V(t) dt \right) - ht \right|^2 \rightarrow \min, \\ \frac{\partial S_3}{\partial t} = 2 \left( \sum_{n=1}^k \left| \left( \int_0^t V(t) dt \right) - ht \right| \right) * (V(t) - h) = 0, \\ S_1 = \sum_{n=1}^k |y - (y \cos \omega t + z \sin \omega t)|^2 \rightarrow \min,$$

$$\Delta y = |y_i - y^*| \\ \Delta z = |z_{ij} - z^*|. \quad (16) \\ \Delta x = |x_{ijk} - x^*|$$

При применении ротационной обработки для восстановления работоспособности деталей, имеющих форму катеноида и конуса, рассмотрим площадь среза.

Общее уравнение конуса имеет вид:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} + \frac{(z - z_0)^2}{c^2} = 0$$

После преобразования уравнение конуса имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{\left[ x - r \cdot \cos \varphi - (m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \cos \omega - t) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2}{r^2} + \\ & \frac{\left[ z + m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \sin \omega + r \cdot \cos arctg \operatorname{tg} \omega / \sin \varphi \right]^2}{r^2} \\ & - \frac{\left[ y + r \cdot \sin \varphi - m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \cos \omega + t - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2}{c^2} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Составляем уравнение обрабатываемой поверхности:

Система (17) и (18) устанавливает уравнение кривой пересечения этих тел:

$$y^2 + z^2 = m^2 \cdot ch^2\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \quad (18)$$

$$\begin{cases} & \frac{\left[ x - r \cdot \cos \varphi - (m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \cos \omega - t) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2}{r^2} + \\ & \frac{\left[ z + m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \sin \omega + r \cdot \cos arctg \operatorname{tg} \omega / \sin \varphi \right]^2}{r^2} - \\ & - \frac{\left[ y + r \cdot \sin \varphi - m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \cos \omega + t - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2}{c^2} = 0 \\ & y^2 + z^2 = m^2 \cdot ch^2\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \end{cases}$$

Имеем

Далее:

$$y = \pm \sqrt{m^2 \cdot ch^2\left(\frac{x-l/2}{d}\right) - z^2} \quad (19)$$

$$y = \pm \frac{\sqrt{m^2 ch^2\left(\frac{x-l/2}{d}\right) - (y \cdot \sin \alpha + z \cdot \cos \alpha - \delta(\alpha))^2 - z \cdot \sin \alpha}}{\cos \alpha} \quad (20)$$

$$\frac{\left[ x - r \cdot \cos \varphi - (m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \cos \omega - t) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot ctg \gamma \cdot \sin \varphi \right]^2}{r^2} +$$

$$+\frac{\left[m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \sin \omega + r \cdot \cos arctg(tg \omega / \sin \varphi)\right]^2}{r^2} -$$

$$-\frac{\left[m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) + r \cdot \sin \varphi - m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cdot \cos \omega + t - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi\right]^2}{c^2} = 0$$

Уравнение для нахождения площади среза:

$$z = \left\{ r^2 [y + r \cdot \sin \varphi - R \cdot \cos \omega + t - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi]^2 - c^2 [x - r \cos \varphi - (R \cos \omega - t) tg \varphi - r ctg \gamma \sin \varphi]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} c^{-1} - H \quad (21)$$

Далее:

$$\frac{\partial z}{\partial y} = c^{-1} \left\{ r^2 [y \cdot \sin \varphi - R \cdot \cos \omega + t - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi]^2 - c^2 [x - r \cos \varphi - (R \cos \omega - t) tg \varphi - r \cdot ctg \gamma \cdot \sin \varphi]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot$$

$$\cdot r^2 [y + r \sin \varphi - R \cos \omega + t - r ctg \gamma \cos \varphi]$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = (cr^2)^{-1} \left\{ r^2 \left[ y \cdot \sin \varphi - \left( \frac{m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega - t}{\cos \varphi} + r \cdot ctg \gamma \right) \cdot \cos \varphi \right]^2 - c^2 \left[ x - r \cos \varphi - (m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega - t) tg \varphi - r \cdot ctg \gamma \cdot \sin \varphi \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\left\{ r^2 \left[ y + r \sin \varphi - (m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega - t) - r \cdot ctg \gamma \cdot \cos \varphi \right] \cdot \left[ -\frac{m}{d} sh\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega \right] - c^2 \left[ x - r \cos \varphi - (m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega - t) tg \varphi - r \cdot ctg \gamma \cdot \sin \varphi \right] \cdot \left[ 1 - \frac{m}{d} sh\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega \cdot tg \varphi \right] \right\} \quad (23)$$

где

$$R = m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \quad R' = \frac{m \cdot ch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega - t}{\cos \varphi}$$

Тогда:

$$P = \int_{R_1 = mch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega - t}^{R_B = mch\left(\frac{x-l/2}{d}\right) \cos \omega} dy \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx \quad (24)$$

Уравнение конической поверхности восстанавливаемой детали в выбранной системе координат будет иметь вид:

$$\frac{y^2}{R_0^2} + \frac{z^2}{R_0^2} - \frac{(x+L+l)^2}{(L+l)^2} = 0. \quad (25)$$

После преобразований:

$$\frac{y^2}{R_0^2} + \frac{z^2}{R_0^2} = \frac{(x + \frac{LR_0}{R_0 - r_0})^2}{(\frac{LR_0}{R_0 - r_0})^2}. \quad (26)$$

Уравнение ротационного резца:

$$\frac{(x-x_0)^2}{r^2} + \frac{(z-z_0)^2}{r^2} - \frac{(y-y_0)^2}{l_k^2} = 0. \quad (27)$$

Далее:

$$\begin{aligned} & \left[ x - r \cdot \cos \varphi - \left( \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \cos \omega - t \right) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \sin \varphi \right]^2 + \left[ z + \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \sin \omega + r \cdot \cos \psi \right]^2 = \\ & = \left[ y + r \cdot \sin \varphi - \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \cos \omega + t - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2 \operatorname{tg}^2 \gamma = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

После преобразований:

$$\begin{aligned} & \left[ x - r \cdot \cos \varphi - \left( \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \cos \omega - t \right) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot \operatorname{ctg} \varphi \cdot \sin \varphi \right]^2 \\ & + \left[ z + \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \sin \omega + \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \omega}{\sin^2 \varphi}}} \right]^2 = \\ & = \left[ y + r \cdot \sin \varphi - \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \cos \omega + t - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2 \operatorname{tg}^2 \gamma . \end{aligned} \quad (29)$$

Пересечение поверхностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y^2}{R_0^2} + \frac{z^2}{R_0^2} = \frac{\left( x + \frac{L \cdot R_0}{R_0 - r_0} \right)^2}{\left( \frac{L \cdot R_0}{R_0 - r_0} \right)^2}; \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ x - r \cdot \cos \varphi - \left( \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \cos \omega - t \right) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \sin \varphi \right]^2 + \\ + \left[ z + \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \sin \omega + \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \omega}{\sin^2 \varphi}}} \right]^2 = \\ = \left[ y + r \cdot \sin \varphi - \left( R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \xi \right) \cos \omega + t - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \cos \varphi \right]^2 \operatorname{tg}^2 \gamma \end{array} \right. \quad (31)$$

После преобразований площадь среза при обработке детали в форме конуса:

$$S = \int_{R_0}^{r_0} dy \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \frac{B_1(x) + B_2(y) \operatorname{tg}^2 \gamma}{B_2(y) - B_1(x)}} dx. \quad (32)$$

**Вывод.** Внедрение в производство бездемонтажного восстановления деталей с применением переносных станков и оборудования, а также с применением ротационной обработки, которая значительно сокращает объем ремонтных работ и сроки проведения ремонтов, позволяет оптимизировать технологию восстановления и обеспечить заданные технологической документацией параметры качества и точности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко Ю.А., Федоренко М.А., Санина Т.М. Применение ротационного резания при восстановлении цилиндричности цапфы. В сборнике: Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения сборник научных трудов по итогам международной

научно-практической конференции. 2017. С. 14-16.

2. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М. Технологическое направление разработки приставных станков для восстановления геометрической точности деталей // В сборнике: Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2016. С. 29-31.

3. Бондаренко Ю.А., Федоренко М.А. Бездемонтажное восстановление цапф трубных мельниц // Строительные материалы. 2003. № 8. С. 16.

4. Федоренко Т.М., Погонин А.А., Федоренко М.А. Анализ потери работоспособности цапф шаровых мельниц // Технология машиностроения. 2009. № 1. С. 30-31.

5. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Федоренко Т.М. Станок для обработки цапф помольных мельниц. патент на полезную модель RUS 75339 07.02.2008

6. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М., Маркова О.В. Приставной станок для

обработки крупногабаритных внутренних поверхностей цилиндрического типа. Технология машиностроения. 2015. № 11. С. 27–28.

---

**Fedorenko M.A., Bondarenko Y.A., Pogonin A.A.**

**RESTORE THE CYLINDRICAL SHAPE WITH DIFFERENT TYPES OF WEAR OF LARGE ROTATING PARTS**

*Currently, it is becoming increasingly urgent problem of improving the reliability and durability of the equipment and optimization of existing production technologies. Effective solution of this problem will contribute to the recovery of large worn units and parts of equipment of cement industry in the place of their operation without dismantling the lost reliability of the units.*

**Keywords:** machine, grinding mill, recovery, large items, wear.

---

**Федоренко Михаил Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: kdsm2002@mail.ru

**Бондаренко Юлия Анатольевна**, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: kdsm2002@mail.ru

**Погонин Анатолий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: kdsm2002@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МЕЛЬНИЦЕ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИСТЕМЫ «МКАД»

ostanovskiy51@mail.ru

Приведён баланс энергозатрат при измельчении материалов и актуальность решения задачи по снижению энергопотребления. Для решения этой задачи предложено использовать мельницу динамического самоизмельчения, структура которой имеет замкнутый контур, в которой для разрушения частиц кроме кинетической энергии используется так называемая «циркулирующая» мощность. Приведены полученные экспериментальным путём диаграммы замера мощности в замкнутом контуре и потреблённой из сети, показывающие энергоэффективность мельниц системы «МКАД»

**Ключевые слова:** энергопотребление, мельница, самоизмельчение, структура механизма, конструктивная схема, замкнутый контур, кинематические несоответствия, крутящий момент, мощность.

Поиск новых направлений в области создания измельчительного оборудования, отвечающим современным требованиям производства является актуальной задачей развития передовых развитых стран на ближайшую перспективу.

Это задача в полной мере относится к производству строительных материалов. Здесь с целью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции в ближайшее время необходимо провести переоснащение производств измельчительным оборудованием с улучшенными техническими характеристиками, созданных на основе передовых научных исследований в области теории измельчения [1].

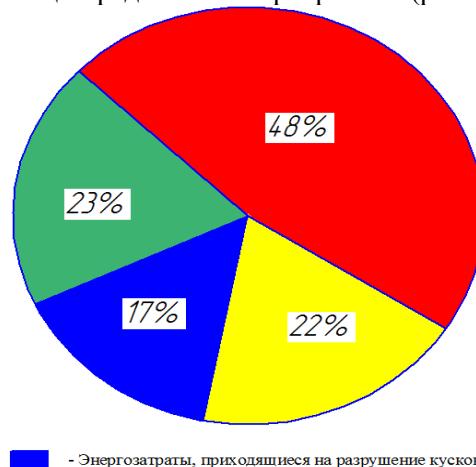
В последнее время достигнуты определенные успехи в понимании теории измельчения. Исследования показывают, что расход энергии в дробильно-размольных машинах на фракционирование колеблется в пределах 1–17 % от общего расхода [2, 3]. Остальная, т. е. большая часть энергии тратится на деформацию приводных и рабочих элементов машин, трение между движущимися кусками и частицами, а также на отделение частичек металла от поверхности рабочих элементов измельчительного оборудования (рис. 1).

Несмотря на сложности при создании принципиально нового измельчительного оборудования в настоящее время многими научными школами ведутся исследования по снижению на них энергопотребления.

Важнейшая роль в достижении этой задачи принадлежит широко известной Северо-Кавказской научной школе, где были разработаны новые способы измельчения и созданные на его основе целая серия вертикальных мельниц динамиче-

ского самоизмельчения системы «МАЯ». Как известно, в них реализуется способ самоизмельчения, заключающийся в том, что нижнюю столбу, находящуюся в неподвижном цилиндрическом барабане, врачают с окружной скоростью 10–70 м/с, а давление материала на нижнюю часть столба со стороны верхних слоёв поддерживают равным 0,05÷0,15 МПа [4–6].

Сущность работы мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ» заключается в следующем. В неподвижном цилиндрическом корпусе *K* формируется слой измельчаемого материала над чашеобразным полым ротором *P*, внутреннее пространство которого разделено на секции радиальными ребрами *R* (рис. 2, а).



- – Энергозатраты, приходящиеся на разрушение кусков и частиц
- – Энергозатраты, затраченные на деформацию деталей и узлов
- – Энергозатраты, приходящиеся на трение между кусками и частицами внутри корпуса
- – Энергозатраты, связанные с износом и отделением частиц от рабочих элементов измельчительного устройства

Рис. 1. Диаграмма баланса энергозатрат при измельчении материала

Ребра предназначены для разгона измельчаемых кусков и частиц материала и сообщения им кинетической энергии, достаточной для преодоления сопротивления вышележащих слоев. Куски материала вытесняются из ротора в зону активного измельчения ЗАИ, расположенную непосредственно над рабочим органом. В зоне активного измельчения ЗАИ происходит разрушение частиц материала за счет скальвания и истирания в стесненных условиях при непрерывной

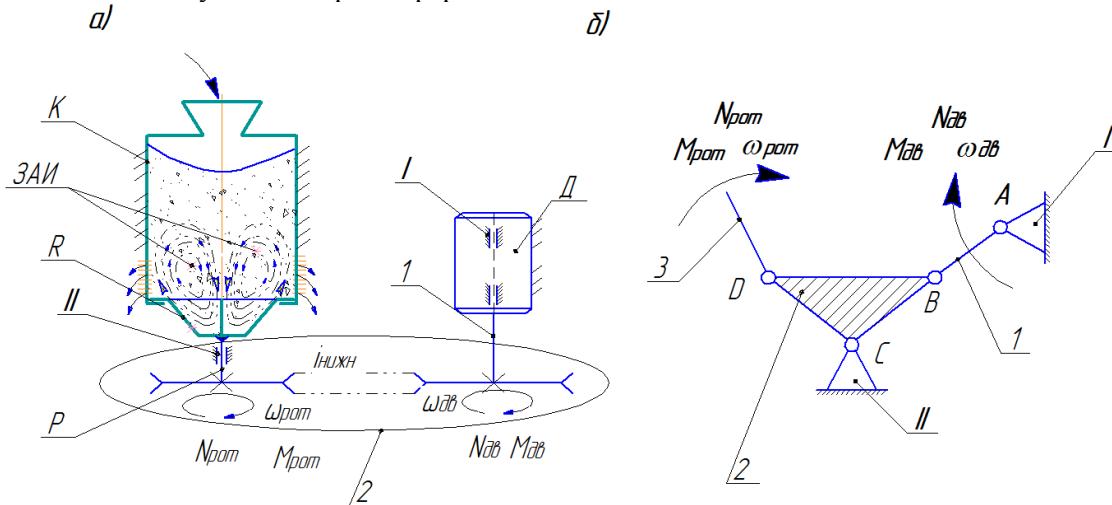


Рис. 2. Конструктивная и структурная схема мельницы системы «МАЯ»:

а) конструктивная схема:  $D$  – электродвигатель;  $K$  – корпус;  $P$  – ротор;  $R$  – ребро;

$ЗАИ$  – зона активного измельчения; 1 – вал электродвигателя; 2 – кинематическая передача; 3 – вал ротора;

б) структурная схема: I – стойка двигателя; II – стойка ротора; 1 – ведущее звено (вал электродвигателя);

2 – трехвершинное ведомое звено (кинематическая передача); 3 – ведомое звено (ротор)

Вместе с тем, опыт эксплуатации мельниц системы «МАЯ» показал, что они достигли предельных значений по производительности и энергопотреблению. Это объясняется тем, что в основе их конструкций используется кинетическая энергия вращающегося ротора, зависящая в основном от её угловой скорости, которая не может превышать некоторого критического значения [7].

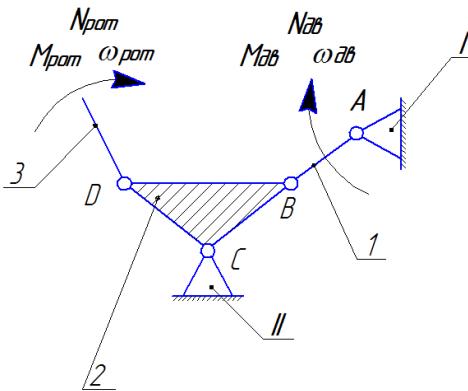
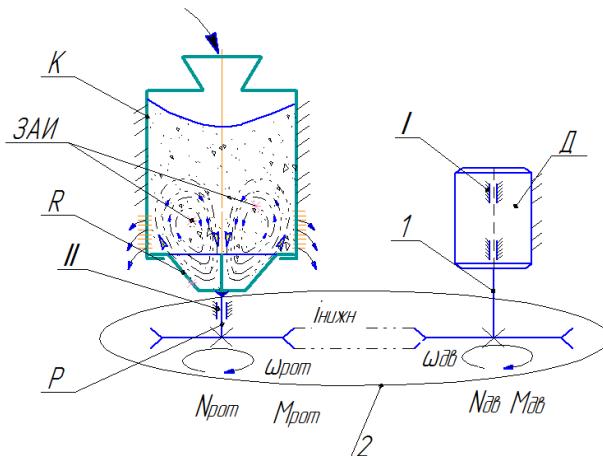
Поэтому в настоящее время исследования мельниц системы «МАЯ» проводятся в направлении повышения их надёжности, работоспособности и ремонтопригодности [8, 9].

Одним из альтернативных технических решений, позволяющих снизить энергопотребление при измельчении материала, могут стать мельницы системы «МКАД», кинематическая цепь которых имеет замкнутый контур [10–13].

Построение на этой основе структурной схемы мельниц позволяет за счёт выполнения верхней и нижней ветви замкнутого с кинематическим несоответствием, возникновению так называемой «циркулирующей» энергии [14]. Это позволяет для разрушения кусков и частиц, циркулирующих внутри цилиндрического барабана, использовать не только кинетическую энергию

циркуляции материала в вертикальном направлении, что обеспечивает постоянное его обновление в зоне ЗАИ. Продукты размола могут разгружаться либо через кольцевой зазор, либо через колосниковые решетки, которые могут быть установлены либо в стенки боковой поверхности ротора  $P$ , либо в стенки неподвижного корпуса  $K$ .

а)



вращающегося ротора, но и мощность замкнутого контура.

Эта особенность выдвигают задачу в анализе причин, приводящих к снижению энергозатрат при одной и той же установленной мощности приводного двигателя и её отличие от аналогичного процесса измельчения в мельницах системы «МАЯ».

Проведём анализ и структурных схем мельниц системы «МАЯ» и «МКАД» (рис. 2, 3).

Структурная схема мельницы системы «МАЯ» (рис. 2.1, б) включает ведущее звено 1, связанное с помощью гибкой кинематической передачи 2 (проводком) с ведомым исполнительным звеном 3 – ротором, приводящем в движение по торOIDальной траектории измельчаемый материал.

Передача крутящего момента  $M_{дв}$  от ведущего звена (вала) электродвигателя  $D$  производится по нижней ветви кинематической передачи 2 на ведомое (исполнительное) звено 3, которым является ротор  $P$ .

Степень подвижности мельницы системы «МАЯ», при трёх подвижных звеньях 1, 2 и 3 и четырёх одноподвижных парах А, В, С и Д определяется по формуле П. В. Чебышева, как

$$W = 3n - 2p_5 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 = +1 \quad (1)$$

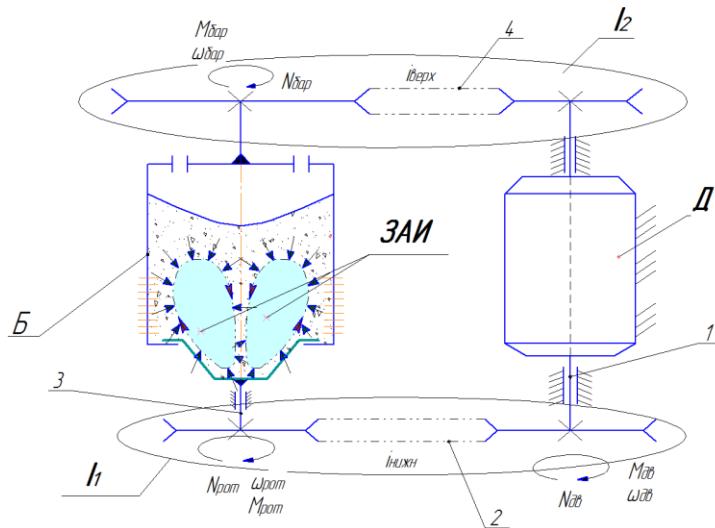
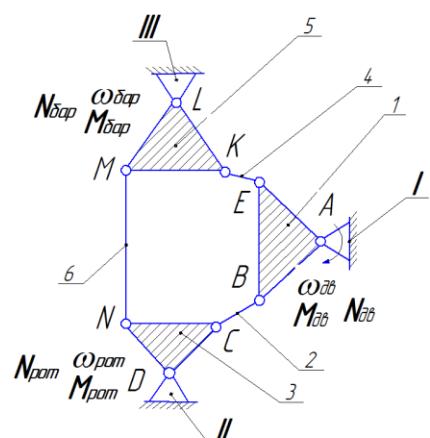
*a**b*

Рис. 3. Конструктивная и структурная схема мельницы системы «МКАД»:

- а) конструктивная схема:  $\mathcal{D}$  – электродвигатель;  $P$  – ротор;  $\mathcal{B}$  – барабан;  $HB$  – нижняя ветвь замкнутого контура;  $BB$  – верхняя ветвь замкнутого контура;  
 б) структурная схема: 1 – ведущее звено (вал электродвигателя); 2 – нижнее гибкое звено; 3 – ведомое звено (ротор); 4 – верхнее гибкое звено; 5 – ведомое звено (барабан);  
 6 – ведомое звено (столб сыпучего материала в мельнице)

Мощность на ведомом звене 3 (роторе  $P$ ), передаваемая от ведущего звена 1 (вала электродвигателя), определится из выражения

$$N_{\text{рот}} = M_{\text{рот}} \cdot \omega_{\text{рот}} \cdot i_{\text{нижн}}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{рот}}$  – крутящий момент на ведомом звене 1;  $\omega_{\text{рот}}$  – угловая скорость ведомого звена 1 (ротора);  $i_{\text{нижн}}$  – передаточное отношение кинематической передачи от ведущего звена 1 к ведомому звену 3.

Анализ зависимости (2) показывает, что интенсификацию процесса измельчения при установленной мощности электродвигателя можно обеспечить в мельнице системы «МАЯ» за счёт увеличения угловой скорости ведомого звена 3, которое является адаптивным по отношению к ведущему звулу 1.

Как известно, процесс самоизмельчения оптимально может протекать только при установлении определенных режимных параметрах мельницы этой системы – угловой скорости ротора 3 [4]. Её превышение, хотя и приведет к увеличению мощности на роторе 3, то на производительность мельницы это существенно не повлияет из-за неудовлетворительного протекания процесса самоизмельчения при превышении критического значения угловой скорости –  $\omega_{\text{крит}}$ .

Поэтому в структурной схеме вертикальной мельницы системы «МАЯ» не имеется источника дополнительной энергии для обеспечения интенсификации процесса.

где  $n = 3$  – число подвижных звеньев;  $p_5 = 4$  – количество одноподвижных пар в механизме.

Отличительной особенностью вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МКАД» является то, что её кинематическая цепь имеет замкнутый контур.

Конструктивная схема вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД», представленная на рис. 4, а, включает в себя электродвигатель  $\mathcal{D}$ , имеющий два выходных конца вала, которые с помощью кинематических передач нижней  $I_1$  и верхней  $I_2$  ветви связаны с ротором  $P$  подвижным барабаном  $\mathcal{B}$ . Его конструктивная схема выполнена таким образом, что передаточные отношения верхней и нижней ветви не равны между собой, т. е.  $i_{\text{нижн}} \neq i_{\text{верх}}$ , а угловая скорость ротора  $P$  превышает угловую скорость барабана  $\mathcal{B}$ , т. е.  $\omega_{\text{рот}} > \omega_{\text{бар}}$ .

Кинематическая цепь мельницы этой системы имеет замкнутый контур, образуемый нижним концом вала электродвигателя 1 (ведущее звено), гибкой связью 2 (клиновременной, цепной или другого типа передачей), ведомым звеном 3 (ротором), ведомым звеном 6 (сыпучим материалом), ведомым звеном 5 (цилиндрическим барабаном), гибкой связью 4 (клиновременной, цепной или другого типа передачей) и верхним концом вала ведущего звена 1 (приводного двигателя).

При этом ведомое звено 6 одновременно связано с ведомыми звеньями 3 и 5, т. е. с ротором и барабаном. Это приводит к тому, что при пере-

даче потока мощности от вала приводного двигателя 1 к ведомому звену 6 (столбу сыпучему материалу) по ветвям замкнутого контура будет происходить разъединение и вновь их соединение (замыкание) на столбе измельчаемого материала.

Таким образом, в нашем случае имеет место приложение к звену 6 определённых усилий, передаваемых к нему по верхней и нижней ветви замкнутого контура разных по величине крутящих моментов, создающих в этом звене деформацию (скручивание).

Следовательно, избыточное звено 6 позволяет образовывать замкнутый контур в мельнице этой системы.

Для анализа структурной схемы мельницы системы «МКАД» согласно [15] разобьём её на группы Ассура. Согласно Ассуру – Артоболевскому любой механизм можно образовать путём последовательного присоединения к ведущему звену (или ведущим звеньям) и к стойке кинематических цепей с нулевой степенью подвижности. На рис. 4 представлена структурная схема мельницы системы «МКАД», которая разбита на группы Ассура.

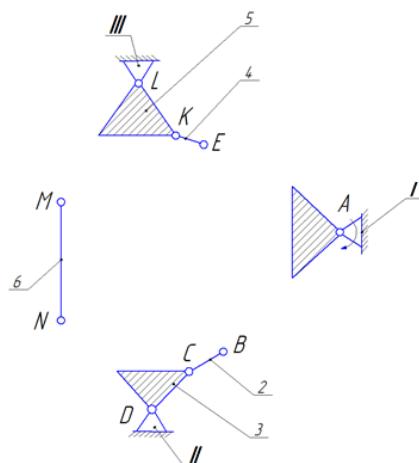


Рис. 4. Разбивка структурной схемы мельницы системы «МКАД» на группы Ассура

Для ведущего звена 1(А), имеющего один поводок и одну одноподвижную связь 5-го класса его подвижность определился по формуле П. В. Чебышева

$$W_{BCD} = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = +1$$

Для ассуровой группы звеньев В-С-Д (группы ротора), имеющей два подвижных звена 1 и 2, а также три одноподвижные связи 5-го класса

$$W_{DCD} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$$

Для ассуровой группы звеньев В-С-Д (группы барабана), имеющей также два подвижных звена 4, 5, а также три одноподвижные связи 5-го класса группы барабана

$$W_{BCD} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$$

Для ассуровой группы - звена М-Н (столб материала, связывающего подвижные звенья 3 и 5), имеющей одно подвижное звено 6, а также две одноподвижные связи 5-го класса М и Н

$$W_{MN} = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 2 = -1$$

Общая степень подвижности мельницы системы «МКАД», имеющей один замкнутый контур, будет определяться суммой степени подвижности ведущего звена и группы звеньев, образующих группы Ассура и составит

$$W_{MKAD} = +1 + 0 + 0 + (-1) = 0$$

Таким образом, мельница системы «МКАД» будет иметь нулевую подвижность.

Как отмечено ранее, передача потока мощности по ветвям замкнутого контура, которые позволяют производить разъединение и соединение разных по величине потоков мощности, что достигается за счёт выполнения этих ветвей с кинематическим несоответствием, т. е. когда передаточные отношения ветвей не равны между собой  $I_{\text{верх}} \neq I_{\text{ниж}}$ .

Отличие принципа разрушения материала частиц в мельнице системы «МКАД» от мельницы системы «МАЯ» состоит в том, что в ней помимо использования для разрушения их используется не только кинетическая энергия вращающегося ротора, который придаёт им движение по тороидальной траектории, но и потенциальная энергия скрученного на определённую величину вала приводного двигателя в поперечном сечении (рис. 5).

Величина возникающей потенциальной энергии  $E_{\text{пот}}$  при известных значениях диаметра вала приводного двигателя, его длины и упругих свойств будет зависеть от величины угла скручивания вала, которая может быть определена как разность между значениями деформации нижнего и верхнего конца относительно исходного состояния до приложения к нему крутящего момента, подводимого по ветвям замкнутого контура:

$$\Delta\phi_{\text{скр}} = \varphi_{\text{ниж}} - \varphi_{\text{верх}}, \text{рад} \quad (3)$$

где  $\varphi_{\text{ниж}}$  и  $\varphi_{\text{верх}}$  – величины скручивания нижнего и верхнего конца приводного вала в поперечном сечении в  $i$ -й момент времени относительно первоначального (исходного) состояния до передачи крутящего момента, рад.

Мощность, возникающая при скручивании вала приводного двигателя  $N_{скр}$ , можно определить как

$$N_{скр} = \int_0^t M_{скр} \cdot d(t) \cdot \omega_i \cdot Bm \quad (4)$$

где  $M_{скр}$  – момент, возникающий из-за скручивания вала в результате выполнения кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура;  $t$  – период измельчения, с;  $\omega_i$  – угловая скорость вала в  $i$ -й момент времени, рад/с.

При увеличении величины скручивания концов вала будет возрастать его потенциальная энергия, вызванная деформацией кристаллической решётки материала вала (сталь 35ХГСА) и сдвига молекул в ней, приводящей к увеличению межмолекулярных сил, которые существуют в кристаллах. Без приложения внешних усилий, межмолекулярные силы находятся в равновесии, но за счёт скручивания вала, кристаллическая решётка начнёт деформироваться, равновесие сил нарушится, и эти силы начнут проявляться в зависимости от деформации вала [16], обеспечивая дополнительное силовое взаимодействие частиц, которое будет сопровождаться интенсивным их разрушением в единицу времени и снижением энергопотребления.

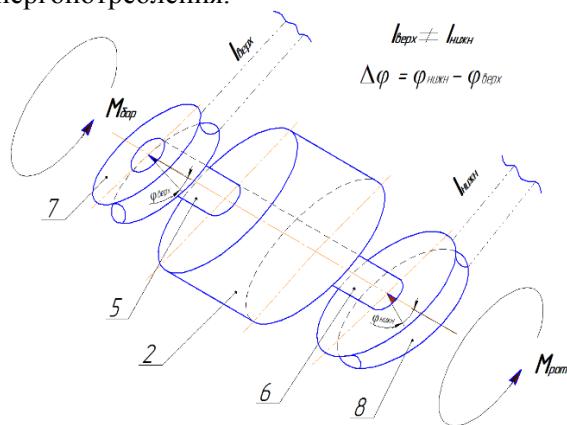


Рис. 5. Скручивание концов вала приводного двигателя в мельнице системы «МКАД» при передаче разных по величине потоков мощности (моментов) по верхней и нижней ветви замкнутого контура: 1 – вал приводного двигателя; 2 – барабан; 3 – верхний конец вала; 4 – нижний конец вала; 5 – приводной шкив верхней ветви клиноременной передачи; 6 – приводной шкив нижней ветви клиноременной передачи

В свою очередь момент, возникающий из-за скручивания концов вала, определяется из соотношения

$$M_i = \frac{\Delta \varphi \cdot [\varepsilon] \cdot J_p}{l}, H \cdot m \quad (5)$$

где  $l$  – длина вала электродвигателя, м;  $[\varepsilon]$  – модуль сдвига для материала вала электродвигателя, МПа/м;  $J_p$  – полярный момент инерции вала электродвигателя,  $m^4$ .

$$J_p = \frac{\Delta \varphi \cdot d_{cp}^2}{32}, m^4 \quad (6)$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр вала приводного двигателя, м.

Таким образом, мощность замкнутого контура  $N_{зк}$  будет равна сумме мощностей, подводимой к ротору  $N_{рот}$  и барабану  $N_{бараб}$  и уравновешенной мощностью, необходимой для скручивания концов вала приводного двигателя на некоторую величину, определяемую их разностью –  $\Delta\varphi$ :

$$N_{рот} + N_{бараб} - N_{скр} = 0, \quad (7)$$

где  $N_{рот}$  – мощность на роторе,  $N_{бараб}$  – мощность на барабане.

Мощность в замкнутом контуре мельницы будет определяться, как

$$N_{зк} = N_{бараб} + N_{рот}, \quad (8)$$

В результате такого способа передачи мощности от приводного двигателя по ветвям замкнутого контура к столбу измельчаемого материала приводится в движение не только нижняя часть столба, но его верхняя часть за счёт вращения барабана. Это приведёт к тому, что внутри барабана в движении будет участвовать значительно большее количество частиц, чем это происходит при неподвижном барабане. За счёт вовлечения в движение частиц верхней части столба будет происходить заполнение перемещающимися частицами всей полости барабана, что позволит снизить объём застойных зон и увеличить их интенсивность взаимодействия между собой. Разность линейных скоростей частиц в верхней и нижней части столба при их соприкосновении приведёт к увеличению доли касательной составляющей от суммарного (дополнительного) напряжения между ними и возникновению дополнительного силового поля, в котором в каждой точке пространства каждая частица будет подвержена дополнительному силовому воздействию (рис. 6).

Поэтому интенсивность разрушения в единицу времени будет возрастать, а энергозатраты будут снижаться в сравнении с мельницами системы «МАЯ», в которых вращается только нижний ротор при тех же режимных и конструктивных параметрах, при которых выполнялись экспериментальные исследования на мельницах системы «МАЯ».

Поэтому с точки зрения энергоэффективности при измельчении материала мельницы системы «МКАД» имеют существенные преимущества с мельницами системы «МАЯ», что выдвигает задачу экспериментальным путём подтвердить этот вывод.

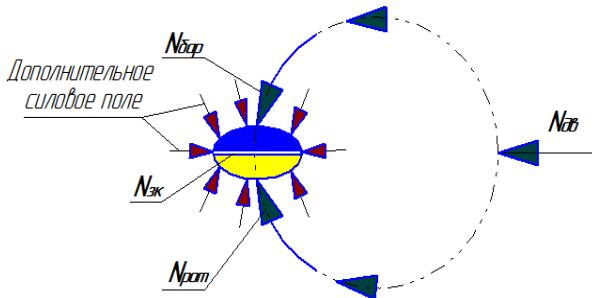


Рис. 6. Передача потока мощности от приводного двигателя к измельчаемому материалу по верхней и нижней ветви замкнутого контура:

$N_{dv}$  – мощность на валу приводного двигателя;  
 $N_{rot}$  – поток мощности, подводимый к нижней части столба;  $N_{bar}$  – поток мощности, подводимая к верхней части столба измельчаемого материала

Для мельницы системы «МКАД» подведение крутящего момента к столбу измельчаемого материала осуществляется путем его подвода по нижней 6 и верхней 5 ветви замкнутого контура. Этим обеспечивается одновременное вращение в одном направлении нижнего ротора и барабана.

Конструктивная схема мельницы с замкнутым контуром выполнена таким образом, что передаточные отношения в верхней и нижней ветви не равны между собой, т. е.  $i_{верх} \neq i_{ниж}$ . При этом вращение барабана происходит в том же направлении, как и у чашеобразного ротора, но угловая

скорость вращения ротора 4 превышает угловую скорость вращения барабана 5, т. е.  $\omega_{рот} > \omega_{бар}$ . При этом разность между частотами вращения чашеобразного ротора и барабана находится в пределах  $\Delta_n = n_{рот} - n_{бар} = 300 \div 400$  об/мин.

Это позволит обеспечить движение частиц в полости барабана по тороидальной траектории, при которой осуществляется режим самоизмельчения, которого разработана соответствующая теория и создан математический аппарат, достаточно точно описывающий массовые и силовые показатели процесса самоизмельчения [17].

В мельнице разработанной конструктивной схемы с помощью специальной программы производится одновременное фиксирование мгновенного числа оборотов верхнего 5 и нижнего 6 конца вала 4, электродвигателя при передаче разных по величине крутящих моментов по нижней и верхней ветвям замкнутого контура. При этом верхний 5 и нижний 6 концы вала электродвигателя будут совершать разное число оборотов за фиксированный период времени  $t_i$ .

На дисплей электронно-вычислительного блока 3 выводится информация о направлении счета первого (нижнего) 1 и второго (верхнего) 2 датчиков угловых перемещений, количество подсчитанных импульсов, разность показаний углов скручивания концов вала электродвигателя  $\Delta\phi$ , число оборотов двигателя –  $n_{dv}$ , также частота вращения нижнего и верхнего конца вала (рис. 7).

В этот же период производится фиксирование силы тока  $I_i$  и напряжения  $U_i$ . Зафиксированные результаты измерения выводятся на экран ЭВМ 32.

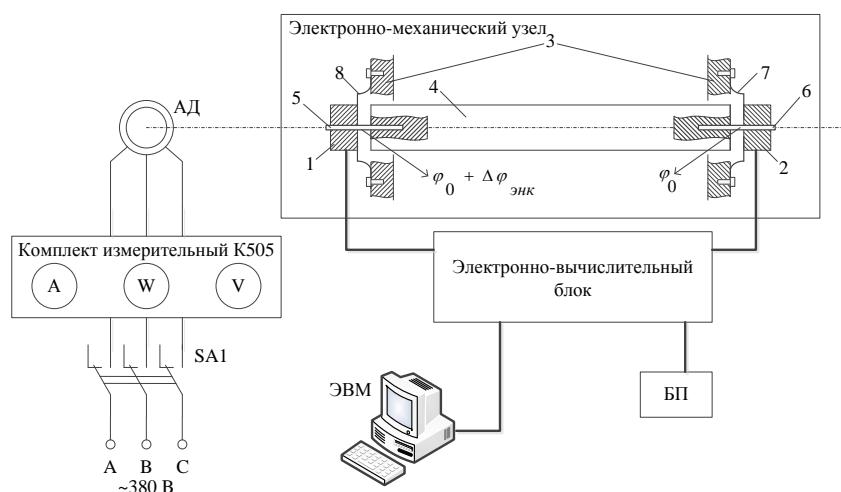


Рис. 7. Структура экспериментальной установки для измерения разности углов скручивания концов вала приводного двигателя  $\Delta\phi$ :

1 – верхний датчик угловых перемещений нижнего конца вала; 2 – нижний датчик угловых перемещений нижнего конца вала; 3 – лапка датчика; 4 – вал приводного двигателя; 5 – верхняя соединительная шпилька; 6 – нижняя соединительная шпилька; 7, 8 – установочные кронштейны

Для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы  $N_{зк}$  используется методика косвенного измерения мощности, основанная на вычислении выражения:

$$N_{зк} = M_{дви} \cdot \Delta\phi_{скр} \cdot k_{тар} \cdot k_{пер} \cdot \omega_{дви}, \quad (9)$$

где  $\Delta\phi$  – разность углов скручивания концов вала электродвигателя, рад;  $k_{тар}$  – коэффициент тарировки, связывающий истинный крутящий момент  $M_{дви}$  и величину разности углов скручивания концов вала электродвигателя –  $\Delta\phi_{скр}$ ;  $k_{пер}$  – коэффициент перехода, связывающий количество фиксированных импульсов датчика угловых перемещений за  $n$  оборотов двигателя;  $\omega_i$  – угловая скорость вала приводного двигателя в  $i$ -й период времени, 1/с.

$$k_{пер} = \frac{360}{10000} = 0,036 \text{ град/дел.}$$

где  $n_{имп} = 10000$  – число импульсов, фиксируемых датчиком угловых перемещений за один оборот вала двигателя.

На рис. 9 и 10 представлены диаграммы измерения мощности в замкнутом контуре мельницы  $N_{зк}$  и мощности, потребляемой из сети  $N_{сети}$  при различных конструктивных и режимных параметрах при исследовании мельницы системы «МКАД» за период времени, равным  $t_i=3$  мин (0,06 час) [18].

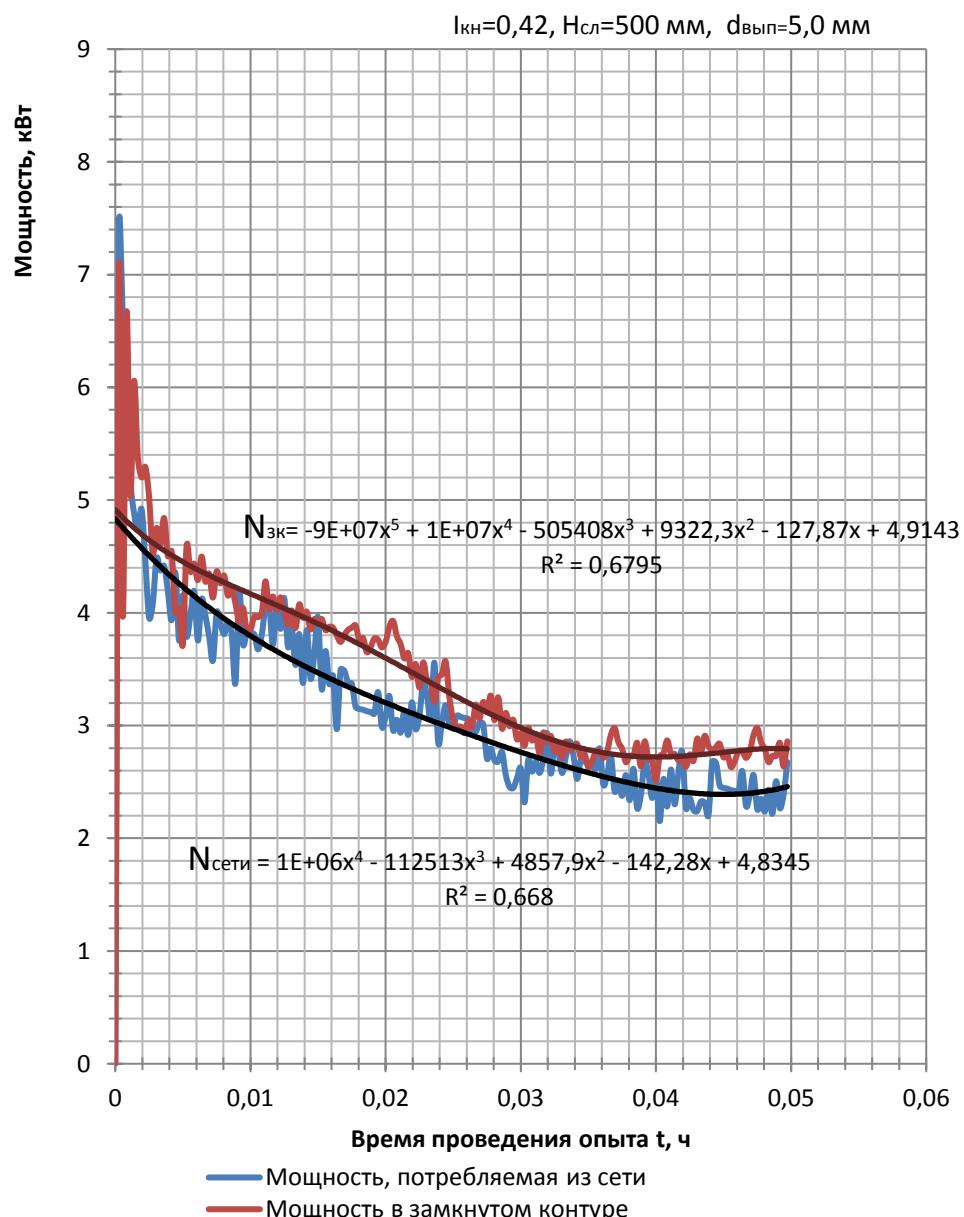


Рис. 8. Диаграмма измерения мощности в замкнутом контуре мельницы  $N_{зк}$  и мощности, потребляемой из сети

$N_{сети}$  при параметрах:

$I_{kh}=0,42; H_{cl}=500 \text{ мм}; d_{вып}=5,0 \text{ мм}$

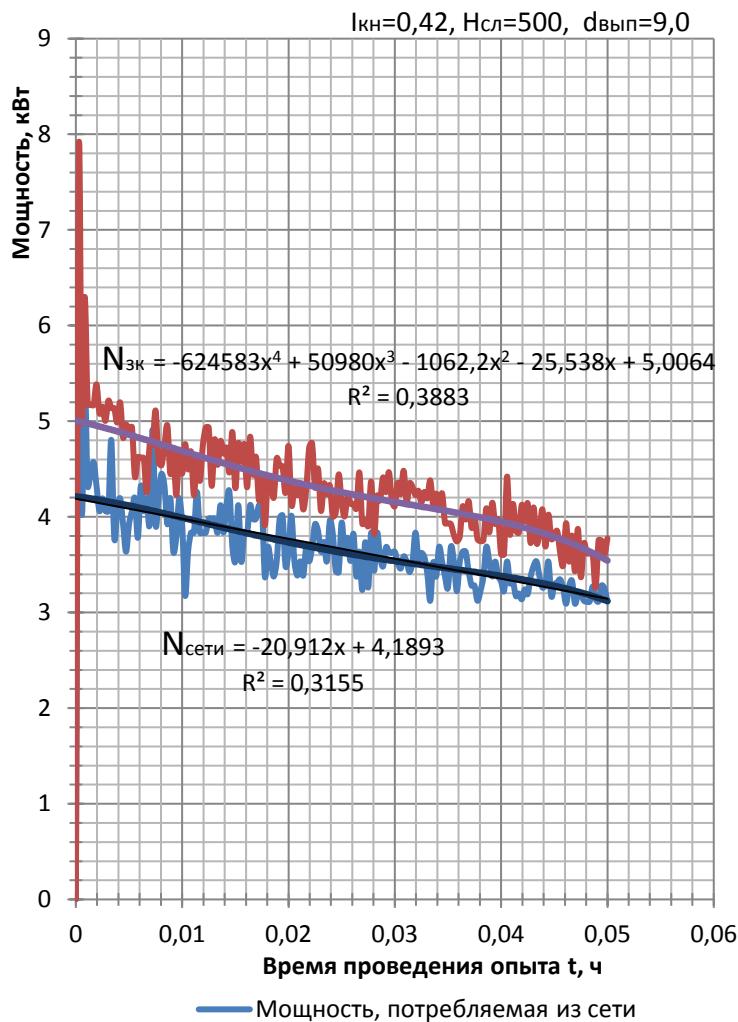


Рис. 9. Диаграмма измерения мощности в замкнутом контуре мельницы  $N_{зк}$  и мощности, потребляемой из сети  $N_{сети}$ , при параметрах:  
 $I_{кн}=0,42$ ;  $H_{сл}=500$  мм;  $d_{вып}=9,0$  мм

Относительная энергоэффективность измельчения мергеля со средней крупностью исходных кусков  $d_{ср}=40$  мм за период помола, равном  $t=0,06$  ч (180 с) определяется из выражения

$$\Delta_3 = \frac{E_{зк} - E_{сети}}{E_{зк}}, \% \quad (10)$$

где  $E_{зк}$  – энергия замкнутого контура за период измельчения, Дж;  $E_{сети}$  – энергия, потреблённая из сети за период измельчения, Дж.

Энергия, возникшая в замкнутом контуре, определится как

$$E_{зк} = \int_0^t f_1(N_{зк}) \cdot d(t), \quad (11)$$

Энергия, потреблённая из сети, будет равна

$$E_{сети} = \int_0^t f_2(N_{сети}) \cdot d(t), \quad (12)$$

Относительная энергоэффективность процесса для двух случаев составила: а) для диаграммы (рис. 9) – 9 %; б) для диаграммы (рис. 10) – 26 %, что доказывает целесообраз-

ность построения структурных схем вертикальных мельниц динамического самоизмельчения с использованием замкнутого контура.

**Выводы.** Из выше изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. Анализ баланса энергозатрат, показал, что только незначительная часть потребленной электроэнергии (до 17 %) используется непосредственно для разрушения измельчаемого материала, что определяет, в конечном счете, определяет низкую энергоэффективность измельчительного оборудования, в том числе и вертикальных мельниц динамического самоизмельчения.

2. Существующие вертикальные мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ» достигли своего предела в возможности снижения энергозатрат, так в их основе для разрушения кусков используется кинетическая энергия вращающегося ротора, зависящая в основном от его угловой и которая имеет определенное критическое значение, выше или ниже ко-

торого процесс самоизмельчения протекает неудовлетворительно и ведет к возрастанию энергозатрат.

3. Перспективным направлением повышения энергоэффективности за счет снижения энергозатрат является использование в конструктивных схемах вертикальных мельниц динамического самоизмельчения замкнутых контуров, в которых за счет выполнения ветвей замкнутого контура с кинематическим несоответствием возникает так называемая «циркулирующая» мощность, что приводит к дополнительному силовому воздействию на кусков и частиц между собой, что способствует снижению энергозатрат.

4. Экспериментальные исследования вертикальной мельниц системы «МКАД» подтвердили, что мощность в замкнутом контуре превышает мощность, потребляемую из сети.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Минрегиона РФ от 30.05.2011 № 262 «Об утверждении Стратегии развития промышленности строительных материалов и индустриального домостроения на период до 2020 года».

2. Технология сырья на перепутье. Проблемы и перспективы. Пер. с англ./Под ред. Б.А. Уилса, Р.В. Барея. М.: Недра, 1992. 272 с.

3. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов В.И. Измельчение. Энергетика и технология. М.: Издательский дом «Руда и Металлы». 2007. 296 с.

4. А. с. № 651845 (СССР), МПК 4 В 02 C13/14. Способ измельчения материала/ Ягупов А.В.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. № 2331562; заявл. 09.06 1976, опубл. 15.03. 1979, Бюл. №11. 3 с.

5. А.с. № 710632 (СССР), МКИ В 02 С 13/00. Мельница динамического самоизмельчения «МАЯ»/ Ягупов А. В.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. заявка № 2325134; заявл. 17.02. 1976, опубл. 25.01.1980, Бюл. №3. 4 с.

6. А. с. №1308382 (СССР), МКП 4 В 02 С 13/14. Мельница динамического самоизмельчения/ Ягупов А.В., Хетагуров В.Н., Гегелашвили М.В., Фридман Е.М.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. заявка № 4000261; заявл. 30.12.1985, опубл. 07.08.87, Бюл. №17. 3 с.

7. Гегелашвили М.В. Определение границ скоростных режимов движения материала в мельнице динамического самоизмельчения «МАЯ»// Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия. Матер, междунар. симп. (Орел 22-24 нояб. 2000 г.) Орел ОПУ. 2000. С. 245–249.

8. Ягупов А. В., Хетагуров В. Н. О повышении эксплуатационной надежности вертикальной мельницы МАЯ. Межведомственный сборник научных трудов «Механобра»: Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции. Л. 1989. С. 55–64.

9. Выскребенец А.С., Хетагуров В.Н., Кибизов С.Г., Маруфова О.А. Защита от износа рабочих органов центробежной мельницы динамического самоизмельчения // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: В 2 ч. Часть 1: Материалы 10-й Международной научно-практической конференции: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та , 2008. 567 с.

10. Пат. на изобретение №2465960 Российская Федерация. МПК B02C13/14. Измельчитель динамического самоизмельчения. Дровников А.Н., Остановский А.А., Никитин Е.В., Павлов И.А., Осипенко Л.А., Агафонов Н.А., заявка: 2011106231/13, 17.02.2011, патентообладатель «Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» Опубл. 10.11. 2012 г. Бюл. №31. 4 с.

11. Пат. на изобретение №2496581 Российская Федерация. МПК B02C13/14. Мельница. Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Бурков Н.В., Романенко Г.Н., заявка № 2012124864/13, 14.06.2012, патентообладатель: «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» (ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС»), Опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.

12. Пат. на изобретение №2526668 Российская Федерация. МПК B02C13/14. Устройство для измельчения материала. Дровников А.Н., Остановский А.А. Заявка: 2012149328/13, 19.11.2012, патентообладатель: «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» (ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС»), Опубл. 27.08.2014. Бюл. №24. 4 с.

13. Пат. на изобретение №. 2558205 Российская Федерация. МПК B02C13/14. Мельница. Дровников А.Н., Исаков В.С., Остановский А.А., Никитин Е. В., Маслов Е. В., Городнянский В.М., Черкесов В.Ю. Заявка: 2014110456/13, 18.03.2014 патентообладатель: «Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), Опубл. 27.07.2015 Бюл. № 21. 4 с.

14. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1987. 560 с.

15. Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин. М., «Машиностроение». 1967.

16. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. Издание пятое, издательство «Наука», М.: 1971. 930 с.

17. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности). М.: Лёгкая индустрия, 1974. 262 с.

18. Остановский А.А., Маслов Е.В. К определению производительности и удельных энергозатрат в вертикальной мельнице динамического самоизмельчения с силовым замкнутым контуром // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2015. № 3. С. 59–67.

**Ostanovskiy A.A.**

## FEATURES OF THE WORKING PROCESS OF GRINDING IN THE MILL DYNAMIC SELF-MILLING OF THE «MKAD» SYSTEM

*The balance of energy costs when grinding materials and the relevance of solving the problem of reducing energy consumption are given. To solve this problem, it is proposed to use a mill of dynamic self-crushing whose structure has a closed circuit in which, in addition to kinetic energy, particles are destroyed by the so-called "circulating" power. The experimental data obtained from the diagram of measuring power in a closed circuit and consumed from the network, showing the energy efficiency of the mills of the «MKAD» system are given.*

**Keywords:** power consumption, mill, self-shredding, structure of the mechanism, design scheme, closed circuit, kinematic mismatch, torque, power.

**Остановский Александр Аркадьевич**, докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические системы ЖКХ и сферы услуг».

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета.

Адрес: Россия, 346500, г. Шахты Ростовской области, ул. Шевченко, 147.

E-mail: Ostanovskiy51@mail.ru

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАШИН ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

**tavaeva\_a\_f@bk.ru**

*Статья касается задачи оптимизации маршрута инструмента применительно к машинам лазерной резки с числовым программным управлением (ЧПУ). В качестве критерия оптимизации рассматривается параметр времени листовой резки  $T_{cut}$ . Для его вычисления необходимо знать значения параметров, одним из которых является скорость листовой резки  $V_{on}$ . Обычно принято, что эта величина постоянна, но проведенные исследования показывают, что она зависит от некоторых параметров, а именно: количества кадров управляющей программы (УП), геометрии деталей. В зависимости от количества кадров УП и конфигурации обрабатываемых контуров значение скорости инструмента в зависимости от количества кадров УП для различных толщин листового материала Amg3M для машины лазерной резки ByStar3015. Проводится их анализ. С помощью формул можно точно вычислить время листовой резки и построить оптимальный маршрут перемещения инструмента.*

**Ключевые слова:** машины термической резки с ЧПУ, машины лазерной резки с ЧПУ, оптимизация маршрута инструмента, время резки, рабочая скорость инструмента.

**Введение.** В машиностроительном производстве и других отраслях промышленности большая часть продукции изготавливается из заготовок, полученных из листового материала на различном технологическом оборудовании. К такому оборудованию относят машины с ЧПУ термической, гидроабразивной резки, гильотинные ножницы и другие типы оборудования. К машинам термической резки относят машины лазерной, плазменной и газовой резки. Применение такого типа оборудования обусловлено возможностью обработки многих видов материалов различной толщины, высокой скоростью резки, возможностью обработки контуров различной сложности, адаптация к постоянным изменениям номенклатуры выпускаемой продукции. Разработка управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ осуществляется с помощью САМ систем. Разработка УП для технологического оборудования листовой резки предполагает предварительное геометрическое моделирование заготовок и получение раскройной карты листового материала, что порождает различные задачи оптимизации раскроя листового материала. К таким задачам относят задачу оптимизация расхода материала, задачу оптимизации маршрута режущего инструмента. Задача оптимизации расхода материала относится к классу задач раскроя-упаковки [1, 2].

Проектирование процессов термической резки, включающее в себя разработку УП и поиск оптимального маршрута перемещения инструмента, является актуальной проблемой на сего-

дняшний день [3, 4, 5, 10–14]. В качестве критерия оптимизации в задаче оптимизации маршрута инструмента можно рассмотреть параметр времени листовой резки  $T_{cut}$  [6, 7]:

$$T_{cut} = L_{on}/V_{on} + L_{off}/V_{off} + N_{pt} \cdot t_{pt} \quad (1)$$

Здесь  $L_{on}$  – длина реза с включенным режущим инструментом (рабочий ход),  $V_{on}$  – скорость рабочего хода инструмента машины с ЧПУ,  $L_{off}$  – длина переходов с выключенным режущим инструментом (холостой ход),  $V_{off}$  – скорость холостого хода,  $N_{pt}$  – количество точек врезки,  $t_{pt}$  – время, затрачиваемое на одну врезку.  $V_{on}$ ,  $t_{pt}$  – параметры, зависящие от конкретного оборудования, технологии резки, толщины и типа материала. Функциональная зависимость этих величин должна определяться научно обоснованными табличными функциями, либо аналитически, однако на практике их значения определяются, чаще всего, приблизительно, что не обеспечивает точность вычисления целевой функции (1) при оптимизации маршрута резки. Алгоритмизация вычисления целевой функции (1) на основе научно-обоснованного определения параметров функций является необходимым условием для разработки алгоритмов оптимизации маршрута инструмента по времени резки. Маршрут инструмента будет оптимальным, если адекватно вычисляется целевая функция, а для этого необходимо знать точные значения параметров, входящих в целевую функцию.

Обычно принято, что скорость резки  $V_{on} = \text{const}$ . Однако ранее проведенные исследования показали, что скорость рабочего хода инструмента зависит от определенных параметров (от количества кадров УП и от геометрии обрабатываемых заготовок) [8, 9, 15]. В этой статье приводятся исследования для определения зависимости рабочей скорости режущего инструмента лазерной машины с ЧПУ ByStar3015 для материала Амг3М различной толщины. На основании полученных результатов можно точно вычислить целевую функцию и построить оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента.

**Основная часть.** Для того чтобы определить, как изменяется скорость рабочего хода инструмента для фигурных заготовок, были рассмотрены конкретные технологические примеры раскроя листового материала на лазерном комплексе ByStar3015 с ЧПУ для материала Амг3М толщиной 1, 2, 3 и 5 мм. Для того чтобы определить, как изменяется рабочая скорость режущего инструмента, были разработаны 150 УП с использованием разных фигурных заготовок. Исследования показали, что рабочая скорость резака не является постоянной величиной, а зависит от количества кадров  $n$ . Причем до порогового значения  $n$  скорость выше заданной, при достижении порогового значения  $n$  скорость становится равной заданной скорости, а после – скорость ниже относительно заданного значения  $V_{on}$ . Для каждой толщины рассматриваемого материала пороговое значение различно. С помощью аппроксимации полученных результатов были построены графики зависимости скорости рабочего хода режущего инструмента от количества кадров  $n$  в УП. Для материала Амг3М толщиной 1мм графики зависимости рабочей скорости инструмента от количества кадров УП приведены на рис. 1, 2. Из рис. 1, 2 видно, что скорость режущего инструмента на рабочем ходе в зависимости от количества кадров УП изменяется по-разному.

Рассмотрим, как изменяется скорость режущего инструмента на рабочем ходе для материала Амг3М толщиной 1мм.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной 1мм при количестве кадров  $0 < n \leq 70$  скорость изменяется согласно формуле (рис.1):

$$V_{on} = -4 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.105, \quad (2)$$

а при количестве кадров  $n > 70$  скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно (рис. 2):

$$V_{on} = 0.2572 \cdot n^{-0.222}. \quad (3)$$

Для того чтобы оценить точность аппроксимации конкретных технологических результатов рассмотрим разницу (в %) реальных результатов и результатов, полученных по формуле (2) и (3).

Для Амг3М толщиной 1 мм была задана скорость  $V_{on} = 0,1$  м/с при разработке УП. Из рассмотренных технологических примеров скорость близкая к заданной достигается при количестве кадров  $n=70$  и равна  $V_{on} = 0,09947$  м/с. Можно сказать, что при  $n=70$  скорость рабочего хода режущего инструмента достигает значения заданной скорости. По формуле (2) значение скорости  $V_{on} = 0,0989$  м/с, отклонение от реальной скорости при  $n=70$  составляет 0,6 %. По формуле (3) значение скорости  $V_{on} = 0,1$  м/с, отклонение от реальной скорости при  $n=70$  составляет 0,6 %.

Рассмотрим изменение скорости рабочего хода режущего инструмента по формуле (2) и сравним с реальными значениями скорости. Для количества кадров  $n=19$  значение скорости, вычисленное по формуле (2)  $V_{on} = 0,1033$  м/с, а реальное значение  $V_{on} = 0,102$  м/с при  $n=19$ . Таким образом, отклонение вычисленной скорости рабочего хода инструмента по формуле (2) от реальной скорости составляет 1 %. При анализе и сравнении реальных значений скорости и значений скорости, вычисленных по формуле (2), выявлено, что максимальное отклонение вычисленных значений от реальных составляет 1,3 %.

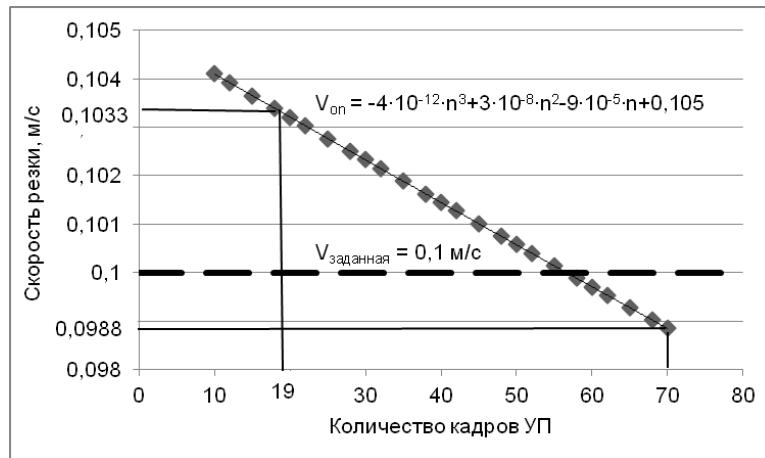


Рис. 1. Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходу для Амг3М,  $\Delta=1\text{мм}$  при количестве кадров  $0 < n < 70$

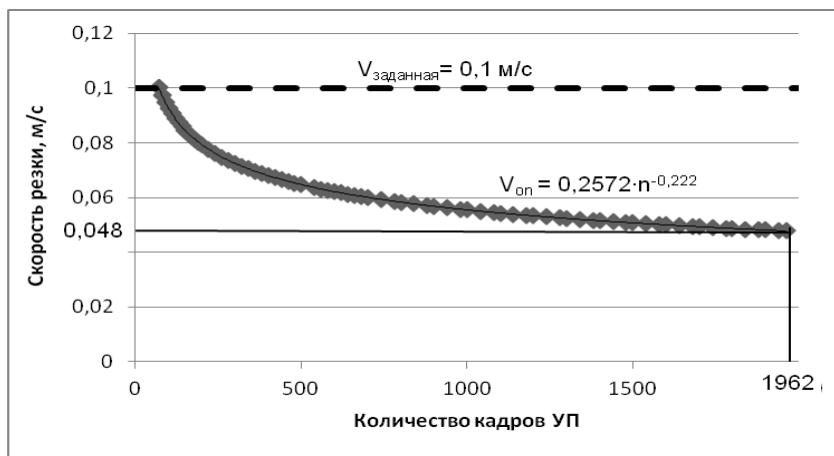


Рис. 2. Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходу для Амг3М,  $\Delta=1\text{мм}$  при количестве кадров  $n>70$

Теперь рассмотрим изменение скорости рабочего хода режущего инструмента по формуле (3) и сравним с реальными значениями скорости. При исследовании зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу были рассмотрены УП с максимальным количеством кадров  $n=1962$ . Реальное значение скорости при этом количестве кадров равно  $V_{\text{он}} = 0,04776 \text{ м/с}$ . Для  $n=1962$  значение скорости, вычисленное по формуле (3)  $V_{\text{он}} = 0,04779 \text{ м/с}$ . Таким образом, отклонение вычисленной скорости рабочего хода инструмента по формуле (3) от реальной скорости составляет 0,039 %.

Из рисунка 1-2 и формул (2)-(3) можно заметить, что скорость режущего инструмента на рабочем ходе при количестве кадров  $0 < n < 70$  может увеличиться почти на 5% от заданной скорости при разработке УП, а при количестве кадров  $n > 70$  скорость падает почти на 50% от заданной.

Аналогичные исследования были проведены для материала Амг3М толщиной  $\Delta=2, 3$  и  $5\text{мм}$ . Приведем основные результаты, которые были получены.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной  $\Delta=2\text{мм}$  при количестве кадров  $0 < n < 70$  скорость изменяется согласно формуле:

$$V_{\text{он}} = -7 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 6 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0494, \quad (4)$$

а при количестве кадров  $n > 70$  скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно:

$$V_{\text{он}} = 0.0734 \cdot n^{-0.1}. \quad (5)$$

Была задана скорость  $V_{\text{он}} = 0,048 \text{ м/с}$  при разработке УП. Как показывают результаты, реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента при количестве кадров  $n < 70$  сначала превышает заданное значение скорости  $V_{\text{он}}$ . При количестве кадров  $n=70$  реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента равно заданному значению  $V_{\text{он}} = 0,048 \text{ м/с}$ . При количестве кадров  $n > 70$  значение скорости  $V_{\text{он}}$  снижается до 33%.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной  $3\text{мм}$  при количестве кадров  $0 < n < 72$  скорость изменяется согласно формуле:

$$V_{\text{он}} = -2 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0254, \quad (6)$$

а при количестве кадров  $n > 72$  скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно:

$$V_{\text{он}} = 0.0346 \cdot n^{-0.075}. \quad (7)$$

Была задана скорость  $V_{\text{он}} = 0,025 \text{ м/с}$  при разработке УП. Результаты показывают, что реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента при количестве кадров  $n < 72$  сначала превышает заданное значение рабочей скорости. При количестве кадров  $n=72$  реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента равно заданному значению  $V_{\text{он}} = 0,025 \text{ м/с}$ . При количестве кадров  $n > 72$  значение скорости  $V_{\text{он}}$  снижается до 27%.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной  $5 \text{ мм}$  при количестве кадров  $0 < n < 105$  скорость изменяется согласно формуле:

$$V_{\text{он}} = -7 \cdot 10^{-14} \cdot n^3 + 7 \cdot 10^{-10} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0152, \quad (8)$$

а при количестве кадров  $n > 105$  скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно:

$$V_{\text{он}} = 0.0194 \cdot n^{-0.057}. \quad (9)$$

Была задана скорость  $V_{\text{он}} = 0,015 \text{ м/с}$  при разработке УП. Как показывают результаты, реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента при количестве кадров  $n < 105$  сначала превышает заданное значение рабочей скорости режущего инструмента. При количестве кадров  $n=105$  реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента равно заданному значению  $V_{\text{он}} = 0,015 \text{ м/с}$ . При количестве кадров  $n > 105$  значение скорости  $V_{\text{он}}$  снижается до 22 %.

Полученные формулы (2)-(9) можно внести в обобщенную таблицу (таблица 1), которая содержит формулы для вычисления скорости рабочего хода инструмента для машины лазерной резки ByStar3015. Ранее в [8, 9] было проведено аналогичное исследование по определению изменения рабочей скорости инструмента от количества кадров УП для материала Ст10кп различной толщины. Эти данные также занесем в таблицу 1. Анализируя полученные формулы можно предположить, как будут изменяться значения рабочей скорости режущего инструмента применительно к материалам, для которых не были проведены исследования. Так зная значение скорости  $V_{on}$ , которое необходимо задать при разработке УП, и зная, как изменяются значения скорости режущего инструмента для определенных материалов, предположим, как изменяются значения рабочей скорости инструмента для Ст10кп толщиной  $\Delta=3.5, 3.9, 8, 10$  мм и для Амг3М толщиной  $\Delta=1.5$  мм. Результаты также занесем в таблицу 1.

Используя полученные формулы целевая функция (1) может быть уточнена и рассчитана по следующей формуле:

$$T_{cut} = L_{on}/V_{on}^* + L_{off}/V_{off} + N_{pt} \cdot t_{pt}. \quad (10)$$

Здесь  $V_{on}^*$  рассчитывается по формулам, приведенным в таблице 1 для материалов Ст10кп и Амг3М различной толщины.

Как показывают результаты исследований, скорость рабочего хода инструмента машины лазерной резки ByStar 3015 зависит от количества кадров УП. До определенного порогового значения количества кадров  $n$  рабочая скорость режущего инструмента больше установленной скорости при разработке УП, а после преодоления этого порогового значения скорость падает (рис. 1 и 2). Таким образом, используя формулы из таблицы 1 для расчета скорости режущего инструмента на рабочем ходе в зависимости от количества кадров УП, можно точно вычислить целевую функцию (1).

Таблица 1

## Обобщенная таблица формул для вычисления рабочей скорости инструмента

Материал и толщина материала ( $\Delta$ )	Количество кадров УП		
	$0 < n < 172$	$n = 172$	$n > 172$
Ст10кп, $\Delta=1$ мм	$V_{on} = -2 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 7 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.1415$	$V_{on} = 0.13 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.6633 \cdot n^{-0.317}$
	$0 < n < 167$	$n = 167$	$n > 167$
Ст10кп, $\Delta=2$ мм	$V_{on} = -1 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.105$	$V_{on} = 0.0975 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.49 \cdot n^{-0.315}$
	$0 < n < 242$	$n = 242$	$n > 242$
Ст10кп, $\Delta=3$ мм	$V_{on} = -4 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.066$	$V_{on} = 0.06 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.2145 \cdot n^{-0.229}$
	$0 < n < 242$	$n = 242$	$n > 242$
Ст10кп, $\Delta=3.5, 3.9$ мм	$V_{on} = -3 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0462$	$V_{on} = 0.042 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.1501 \cdot n^{-0.229}$
	$0 < n < 167$	$n = 167$	$n > 167$
Ст10кп, $\Delta=4$ мм	$V_{on} = -8 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 8 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0439$	$V_{on} = 0.04 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.1945 \cdot n^{-0.306}$
	$0 < n < 288$	$n = 288$	$n > 288$
Ст10кп, $\Delta=8$ мм	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-11} \cdot n^3 + 6 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.031$	$V_{on} = 0.027 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0634 \cdot n^{-0.15}$
	$0 < n < 288$	$n = 288$	$n > 288$
Ст10кп, $\Delta=10$ мм	$V_{on} = -6 \cdot 10^{-11} \cdot n^3 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.027$	$V_{on} = 0.023 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.054 \cdot n^{-0.15}$
	$0 < n < 70$	$n = 70$	$n > 70$
Амг3М, $\Delta=1$ мм	$V_{on} = -4 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.105$	$V_{on} = 0.1 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.2572 \cdot n^{-0.222}$
	$0 < n < 70$	$n = 70$	$n > 70$
Амг3М, $\Delta=1.5$ мм	$V_{on} = -3 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.07$	$V_{on} = 0.067 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.1723 \cdot n^{-0.222}$
	$0 < n < 70$	$n = 70$	$n > 70$
Амг3М, $\Delta=2$ мм	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 6 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0494$	$V_{on} = 0.048 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0734 \cdot n^{-0.1}$
	$0 < n < 72$	$n = 72$	$n > 72$
Амг3М, $\Delta=3$ мм	$V_{on} = -2 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0254$	$V_{on} = 0.025 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0346 \cdot n^{-0.075}$
	$0 < n < 105$	$n = 105$	$n > 105$
Амг3М, $\Delta=5$ мм	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-14} \cdot n^3 + 7 \cdot 10^{-10} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0152$	$V_{on} = 0.015 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0194 \cdot n^{-0.057}$

Рассмотрим пример вычисления маршрута режущего инструмента двумя способами: с постоянной скоростью рабочего хода инструмента и с изменяющейся скоростью резака, вычисляемой по формулам (2)-(9).

В САПР «СИРИУС» (Система Интерактивного Раскюя И Управления Станками) были сформированы раскюйные карты для заданного набора геометрических объектов на одном листе. И на основе раскюя с помощью САМ модуля был сформирован маршрут резки с учетом постоянства скорости рабочего хода инструмента и с учетом зависимости скорости от количества кадров (скорость рабочего хода режущего инструмента рассчитывается по формулам (2)-(9)).

Рассмотрим пример для материала Амг3М толщиной 1мм. Раскюйные карты были сформированы для заготовок двух типов, общим количеством 15 шт, при этом количество контуров равно 19. С помощью САМ модуля был сформирован маршрут при условии постоянства рабочей скорости режущего инструмента (рис.3) и при условии вычисления скорости по формуле (2) или (3) в зависимости от количества кадров УП (рис.4). На рис.3 приведен маршрут перемещения режущего инструмента при условии, что  $V_{on} = 0,1$  м/с. На рис. 4 приведен маршрут перемещения резака с учетом расчета скорости по формуле (3), т.к. количество кадров  $n=120$ .

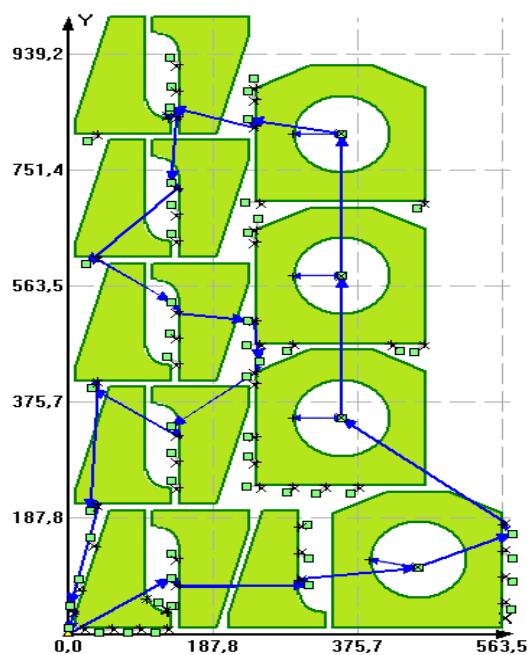


Рис.3. Маршрут перемещения режущего инструмента для Амг3М толщиной 1 мм при условии, что  $V_{on} = \text{const} = 0,1$  м/с

При сравнении полученных маршрутов резки (рис. 3 и 4) видно, что маршрут резки изменяется с применением коррекции скорости по

формуле (3). Время резки  $T_{cut} = 126,27$  сек в случае маршрута, представленного на рис. 3. А для маршрута, представленного на рис. 4, время резки  $T_{cut} = 141,38$  сек. Как можно легко заметить, в рассматриваемом примере количество кадров  $n=120$ , а пороговое значение количества кадров для Амг3М толщиной 1 мм  $n=70$ . Следовательно, рабочая скорость инструмента будет ниже установленной скорости инструмента  $V_{on} = 0,1$  м/с, что приводит к увеличению времени резки раскюйной карты.

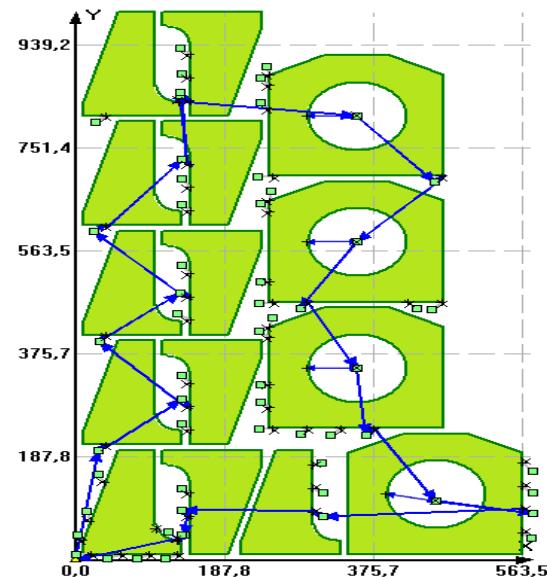


Рис. 4. Маршрут перемещения режущего инструмента для Амг3М толщиной 1 мм при условии, что  $V_{on}$  зависит от количества кадров

**Выводы.** В этой статье было проведено исследование для того, чтобы определить, как изменяется скорость рабочего хода режущего инструмента для машины лазерной резки Ву-Стар3015 для фигурного раскюя. Эксперимент был проведен для материала Амг3М толщиной  $\Delta$  1,2,3 и 5 мм. Как показывают результаты (рисунок 1 и 2, формулы (2)-(9)), скорость рабочих переходов режущего инструмента зависит от количества кадров УП. Причем до достижения определенного порогового значения количества кадров  $n$  в УП скорость сначала превышает (в некоторых случаях на 5%) значение скорости, которое установлено при разработке УП. При достижении порогового значения  $n$  скорость равна (или близка) к заданному значению скорости. После достижения порогового значения  $n$  скорость падает (в некоторых случаях до 50%). В этой статье были получены формулы (2)-(9) для вычисления скорости рабочего хода режущего инструмента для материала Амг3М. Была проведена оценка полученных формул с помощью сравнения реальных значений скорости и значений, вычисленных по формулам (2)-(9). Как показывает

анализ, отклонения значений скорости, вычисленных по формулам (2)-(9) от реальных значений рабочей скорости перемещения инструмента незначительны.

Также используя (2)-(9) и формулы, полученные в ранних исследованиях для материала Ст10кп, было предположено, как будет изменяться рабочая скорость режущего инструмента применительно к материалам, для которых исследования проведены не были. Все полученные формулы занесены в сводную таблицу, которую легко можно использовать при расчете целевой функции (1) и построить оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента.

Во второй части статьи рассматривается пример раскроя листового материала. Пример рассматривается для материала АМг3М толщиной 1 мм. В САПР «СИРИУС» были разработаны раскройные карты. С помощью САМ модуля для сформированных карт раскроя был построен оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента. Маршрут инструмента рассчитывается при двух условиях:

1. скорость рабочего хода инструмента машины термической резки с ЧПУ постоянна;

2. скорость рабочего хода инструмента зависит от количества кадров УП.

Полученные результаты показывают, что с учетом корректировки скорости по формуле (3) маршрут перемещения режущего инструмента уточняется и изменяется по сравнению с маршрутом, полученным при условии постоянства рабочей скорости резака. Результаты показывают, что время, полученное в случае корректировки скорости, увеличивается по сравнению со значением, полученным при условии, что скорость постоянна. Это можно объяснить тем, что в рассматриваемом примере количество кадров  $n=120$ , что превышает предел  $n=70$ . А при  $n>70$  значение рабочей скорости режущего инструмента снижается.

Полученные результаты можно использовать для разработки алгоритма автоматического назначения маршрута резки. В настоящее время проводится реализация данной методики в рамках разработки программного обеспечения для расчета времени лазерной резки с учетом полученных формул (таблица 1).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валихметова Ю.И., Филиппова А.С. Теория оптимального использования ресурсов Л.В. Канторовича в задачах раскроя-упаковки: обзор и история развития методов решения // Вестник УГАТУ. 2014. Т.18. №1 (62). С. 186–197.
2. Wäscher G., Haußner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems // European Journal of Operational Research. 2007. №183. Pp. 1109–1130.
3. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D., Laguna M., Vossen T. An improvement heuristic framework for the laser cutting tool path problem // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 53. Issue 6. Pp. 1761–1776.
4. Castelino D., D’Souza R., Wright P. Toolpath optimization for minimizing airtime during machining // Journal of Manufacturing Systems. 2003. Vol. 22. Issue 3. Pp. 173–180.
5. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol.87. Issue 5-8. Pp. 1865–1884.
6. Петунин А.А. Две задачи маршрутизации режущего инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ / Intelligent Technologies for Information Processing and Management: proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference // Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет. (Уфа 10-12 ноября 2014 г.), Уфа: Изд-во УГАТУ, 2014. Т.1. С. 215–220.
7. Верхотуров М.А., Тарасенко П.Ю. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки // Вестник УГАТУ. Управление, ВТиИ. 2008. Т.10. №2 (27). С. 123–130.
8. Tavaeva A., Kurennov . Cost minimizaing of cutting process for CNC thermal and water-jet cutting machines / Application of Mathematics in Engeeniring and Economics: proceedings of 41<sup>st</sup> international conference // AIP Publishing. (June 8-13, 2015, Sozopol, Bulgaria), 2015. PP. 020003-1 – 020003-7.
9. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Определение зависимости изменения рабочей скорости инструмента от числа кадров управляющей программы для машины лазерной резки с ЧПУ / Информационные технологии и системы: Труды VI международной конф. // Челябинский Государственный Университет. (1-5 марта 2017 г., Банное, Россия), Челябинск: Издательство ЧелГУ, 2017. С. 298–305.
10. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. Construction heuristics for generating tool paths for laser cutters // International Journal of Production Research. 2014. Vol.52. Issue 20. Pp. 5965–5984.
11. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. Sheet metal laser cutting tool path generation: Dealing with overlooked problem aspects / Sheet Metal: proceedings of 16<sup>th</sup> international conference // (March 16-18, 2015, Germany), Key Engineering Materials, 2015. Vol.639. Pp. 517–524.
12. Hoeft J., Palekar U.S. Heuristics for the

plate –cutting salesman problem // IIE Transactions. 1997. Vol.29. Issue 9. Pp. 719–731.

13. Lee M.-K., Kwon K.-B. Cutting Path Optimization in CNC cutting processes using two step genetic algorithm // International Journal of Production Research. 2006. Vol.44. Issue 24. Pp. 5307-5326.

14. Han G.-S., Na S.-J. A study on torch path planning in laser cutting process part 2: Cutting path optimization using simulated annealing // Journal of

Manufacturing Processes. 1999. Vol. 1. Issue 1. PP. 62–70.

15. Tavaeva A., Petunin A. The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings of 2<sup>nd</sup> international conference // South Ural State University. (May 19-20, 2016, Chelyabinsk), 2016. PP. 1-4.

**Tavaeva A.F., Petunin A.A.**

### SOME PROBLEMS OF CUTTING TOOL OPTIMIZATION APPLIED TO CNC THERMAL CUTTING MACHINES

*The paper deals with problem of tool path optimization applied to CNC laser cutting machines. The parameter of cutting time  $T_{cut}$  is optimization criterion. In order to calculate  $T_{cut}$  the values of objective function parameters must be known. One of parameters is cutting speed  $V_{on}$ . One is usually constant, but conducted researches show that cutting speed depend on some parameters (frame numbers of NC programs, part geometry). Depending on frame numbers of NC programs and parts geometry the value of cutting speed is varied. The formulas of cutting speed calculating are obtained depending on frame numbers of NC programs for sheet material (alloy A95154) with various thickness. The analysis of these formulas is conducted. Based on received results the cutting time can be accurately calculated and optimal tool path can be built.*

**Keywords:** CNC thermal cutting machines, CNC laser cutting machines, cutting tool optimization, cutting time, cutting speed.

**Таваева Анастасия Фидагилевна**, аспирант кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Адрес: Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: tavaeva\_a\_f@bk.ru

**Петунин Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Адрес: Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: aapetunin@gmail.com

**Должиков Д.С., аспирант,  
Дуюн Т.А., д-р техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛОНЖЕРОНА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

tanduun@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований погрешности формы крупногабаритного изделия «лонжерон», являющегося силовым элементом конструкции самолета. Эксперимент проводился в производственных условиях при обработке партии деталей с применением действующего промышленного оборудования, технологической оснастки и инструмента. В качестве измерительного оборудования использовалась контрольно-измерительная машина высокой точности. Выявлены особенности формирования погрешности формы для партии обработанных деталей. Для обеспечения заданных параметров точности предложен подход с учетом технологической наследственности, позволяющий учитывать последовательное действие всех технологических операций и изменение параметров точности в процессе выполнения технологического маршрута.

**Ключевые слова:** крупногабаритные изделия, лонжерон, погрешность формы, экспериментальные статистические исследования, технологическая наследственность.

**Введение.** Обеспечение параметров точности изготавливаемых изделий является первоочередной задачей машиностроения на современном этапе. Технологическое управление – один из основных методов повышения точности [1–7].

Лонжерон – основной силовой элемент конструкции крупногабаритных изделий, таких как самолеты, автомобили, вагоны, мосты, корабли и др., располагающийся по длине конструкции.

Конструктивно-силовая схема фюзеляжа самолета состоит из таких элементов, как лонжероны, стрингеры и шпангоуты. В паре со стрингерами лонжероны образуют продольный набор крыла, фюзеляжа, оперения, руля и элеронов самолета. Обтекатель килевой балки, в состав которой входит лонжерон заднего крыльышка (рис. 1) является неотъемлемой составляющей хвостовой части самолета, придавая ей наиболее обтекаемую форму и повышая аэродинамические свойства самолета.

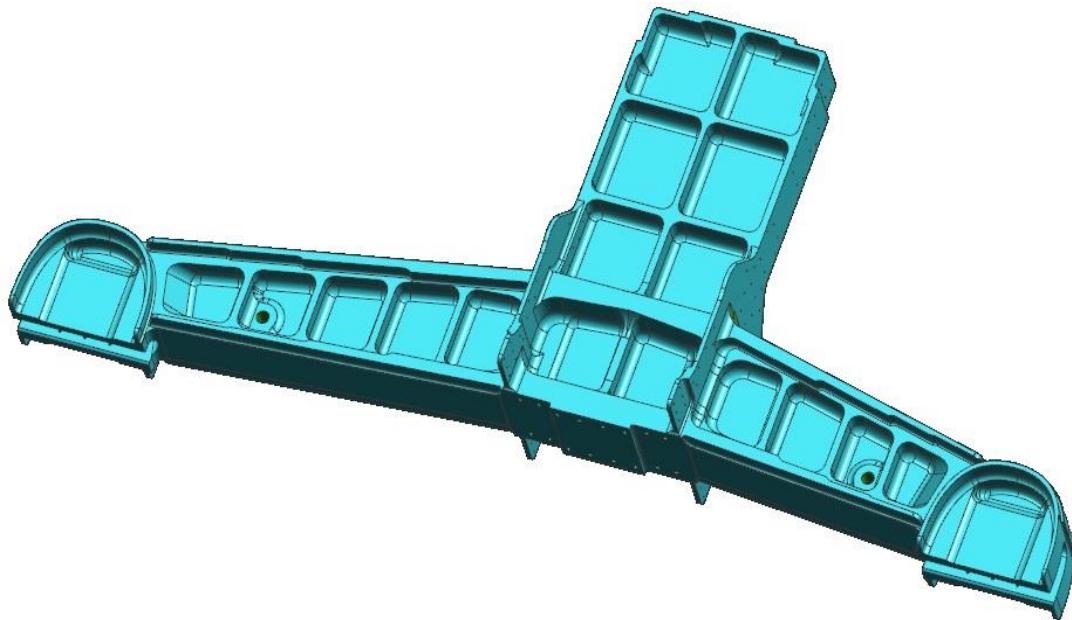


Рис. 1. Объемная модель лонжерона

Конструктивно лонжерон может быть выполнен монолитным или сборным. Сборный лонжерон имеет верхний и нижний пояс, а также стенку, в случае коробчатого сечения стенок две.

Пояса соединяются со стенкой путем клепки, болтовых соединений, точечной электросварки

или склейки. Пояса работают на растяжение-сжатие от изгибающего момента, они составляют большую часть площади сечения лонжерона.

В качестве материала лонжерона применяют, как правило, алюминиевый сплав АК6ч, химические и механические свойства которого представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

### Химический состав (масс. %) сплава АК6ч (остальное — Al) ГОСТ 4784–97

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Mn	Cu	Mg	Zn	Другие элементы
0,4	0,7-1,2	0,4-0,8	0,1	-	0,1	0,4-0,8	1,8-2,6	0,4-0,8	0,3	-

Таблица 2

### Физико-механических свойств поковок алюминиевого сплава марки АК6ч

Плотность $\rho$ , $(\text{кг}/\text{м}^3) \cdot 10^{-3}$	2,7
Температура плавления $T_{\text{пл}}$ , $^{\circ}\text{C}$	660
Теплопроводность $l$ , $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ (при $20^{\circ}\text{C}$ )	228
Теплоемкость $C_p$ , $\text{Дж}/(\text{г} \cdot ^{\circ}\text{C})$ (при $0-100^{\circ}\text{C}$ )	0,88
Предел прочности $s_b$ , МПа	40-60
Относительное удлинение $d$ , %	40-50
Твердость по Бринеллю НВ	25

**Основная часть.** Основной проблемой при изготовлении крупногабаритных тел сложной пространственной формы, таких как лонжерон, является обеспечение точности размеров и взаимного расположения поверхностей. В процессе выполнения механических и термических операций изделие подвергается воздействию силовых и тепловых факторов, которые формируют сложное напряженно-деформированное состояние, изменяющееся во времени по ходу технологического маршрута. Поэтому параметры качества необходимо контролировать на каждом этапе с целью корректировки технологических режимов и условий проведения операций.

Маршрутный технологический процесс изготовления лонжерона содержит следующие основные операции:

1. Ультразвуковой входной контроль материала заготовки (служит для выявления внутренних дефектов заготовки до выполнения механической обработки).

2. Фрезерная ЧПУ (черновая обработка изделия, позволяющая получить основные габаритные размеры).

3. Контрольная операция (ультразвуковой контроль материала и промежуточный контроль размеров).

4. Термическая обработка (выполняется закалка и старение для увеличения прочности и пластичности).

5. Фрезерная ЧПУ (получистовая и чистовая обработка изделия, обеспечивающая получение всех основных контролируемых параметров).

6. Контрольная операция (окончательный контроль выдерживаемых размеров с использованием контрольно-измерительной машины).

Основными контролируемыми параметрами при изготовлении лонжерона являются:

- шероховатость поверхностей;
- точность размеров и взаимного расположения поверхностей;
- физико-механические свойства поверхностных слоев (твердость);
- однородность физико-механических свойств основного материала (отсутствие внутренних пустот).

В производственных условиях ЗАО «Сокол-АТС» был выполнен натурный статистический эксперимент по выявлению отклонений от геометрической формы при изготовлении партии деталей «лонжерон». Все детали партии обрабатывались в идентичных условиях с одинаковыми технологическими режимами. Схема проведения измерений представлена на рис. 2. Отклонение от формы измерялось в 14 точках по ребрам жесткости. Для выполнения измерений отклонений от заданной геометрической формы использовалась контрольно-измерительная машина FaroArm-Prime6 (рис. 3), имеющая высокую точность измерений. Повторяемость точки, т.е. максимальное абсолютное отклонение измеренной точки от среднего значения в тесте на конусе составляет 0,019 мм. Результаты проведенных измерений представлены в табл. 3.

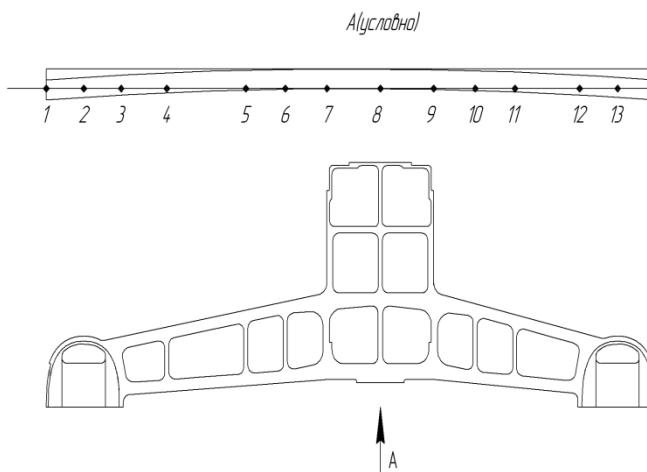


Рис. 2. Схема измерения отклонения от плоскости в контрольных точках

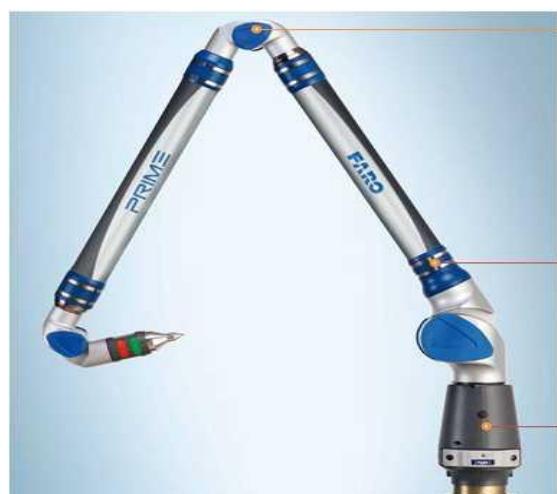


Рис.3. Контрольно-измерительная машина FaroArmPrime 6

Таблица 3

**Статистические данные измерений точности формы при изготовлении партии деталей**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Координата	-842,5	-657	-540	-440	-340	-240	-117,8	0	117,8	240	340	420	507	692,5
Результаты измерений	-1,57	-0,68	-0,29	-0,17	-0,06	-0,01	0,04	<b>0</b>	0,05	0,06	0,02	-0,07	-0,12	-0,94
	0,89	0,51	0,45	0,39	0,24	0,21	0,1	<b>0</b>	0,05	0,16	0,23	0,31	0,4	0,74
	0,8	0,38	0,34	0,29	0,14	0,06	0,05	<b>0</b>	0,07	0,15	0,15	0,23	0,28	0,45
	0,76	0,46	0,24	0,2	0,11	0,17	0,08	<b>0</b>	0,04	0,13	0,19	0,07	0,2	0,4
	0,81	0,48	0,28	0,27	0,2	0,13	0,12	<b>0</b>	0,01	-0,03	0,01	-0,03	-0,04	0,15
	1,06	0,57	0,37	0,21	0,11	0,07	0,01	<b>0</b>	-0,09	0,04	0,06	0,11	0,17	0,53
	0,92	0,51	0,32	0,2	0,04	0,05	-0,06	<b>0</b>	-0,04	0,02	-0,01	0,08	0,34	0,54
	-0,68	-0,25	0,04	0,02	0,06	0,11	0,06	<b>0</b>	0,03	0,06	0,07	0,02	-0,12	-0,58
	0,4	0,33	0,39	0,22	0,15	0,09	0,02	<b>0</b>	0,07	0,09	0,25	0,39	0,54	0,76
	1,5	0,61	0,4	0,17	0,04	-0,01	-0,03	<b>0</b>	-0,01	0,05	0,13	0,26	0,44	1,1
	-0,76	-0,51	-0,30	-0,05	-0,02	-0,01	0,01	<b>0</b>	0,00	-0,04	-0,03	-0,08	-0,37	-0,82
	0,92	0,84	0,64	0,48	0,25	0,13	-0,02	<b>0</b>	0,07	0,26	0,4	0,55	0,62	0,54
	1,19	0,76	0,5	0,3	0,15	0,05	-0,02	<b>0</b>	0,04	0,1	0,21	0,32	0,48	0,74
	-0,5	0,01	0,15	0,16	0,13	0,09	0,06	<b>0</b>	-0,01	-0,04	-0,09	-0,14	-0,26	-0,74

Особенностью конструкции лонжерона является сложная пространственная форма, наличие большого количества объемных внутренних полостей, соединенных тонкими стенками. Чередование операций механической и термической обработки приводит к перераспределению внутренних напряжений, что оказывает существенное влияние на точность относительного расположения поверхностей. На рис.4. представлено пространственное отклонение измеряемой поверхности. Анализируя результаты, можно сделать вывод, что при одинаковых технологических условиях проведения операций погрешность

формы для отдельных деталей партии имеет существенные отличия, наблюдается выпуклость, вогнутость и коробление. Это объясняется в первую очередь сложной пространственной формой крупногабаритного изделия, а также «индивидуальной историей» технологических воздействий для каждой отдельной детали.

В процессе изготовления изделие проходит через ряд состояний, характеризуемых параметрами качества. Каждая операция технологического процесса приводит к изменению этих параметров. В любой момент времени состояние изделия определяется конечным числом свойств.

Любое состояние при этом необходимо рассматривать как результат состояний, имевших место в прошлом. При этом каждую технологическую операцию необходимо рассматривать в тополо-

гическом плане, с учетом временной истории изменения параметров качества. Кроме того, необходимо учитывать синергетические эффекты одновременного воздействия нескольких факторов.

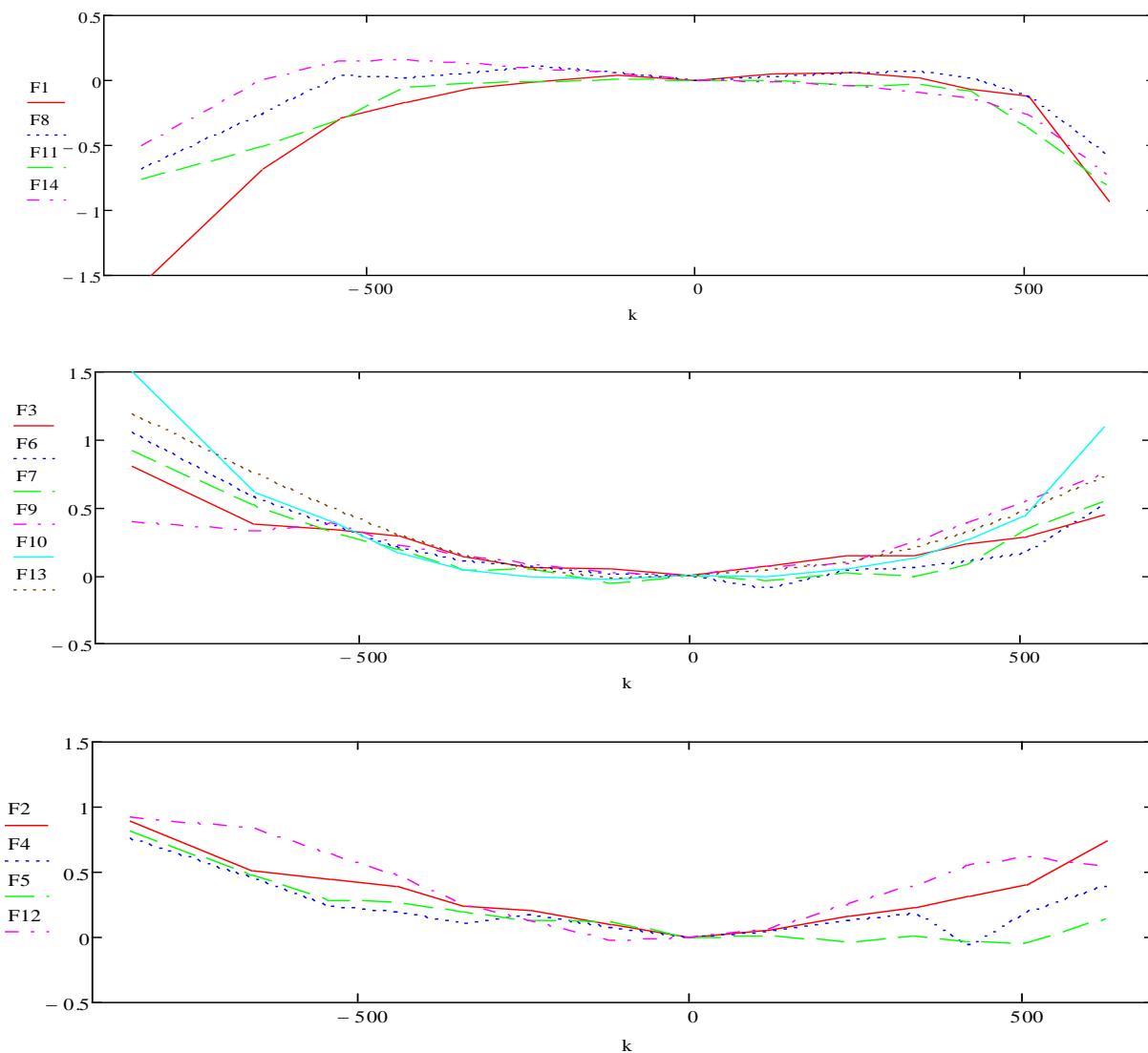


Рис. 4. Графическое представление погрешности формы для партии деталей «лонжерон»

Рассмотрим формирование точности формы фасонной поверхности лонжерона с учетом технологической наследственности, а также с учетом факторов, влияющих на формирование точности формы при выполнении каждой технологической операции. Представим вышеуказанные взаимосвязи в виде графа и структурной схемы (рис. 5). Основными операциями технологического процесса, на которых обеспечивается точность формы контактной поверхности, являются операции фрезерования. На данных операциях формируются все выдерживаемые размеры, а также микрорельеф поверхностей. Существенное

влияние на пространственные отклонения оказывает также исходная заготовительная операция и операция термообработки, так как на указанных операциях происходит исходное формирование и перераспределение внутренних напряжений, влияющих на точность формы.

Для обеспечения параметров точности необходимо учитывать действие технологической наследственности. Это означает, что все операции и их технологические переходы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики формируются всем комплексом технологических воздействий.

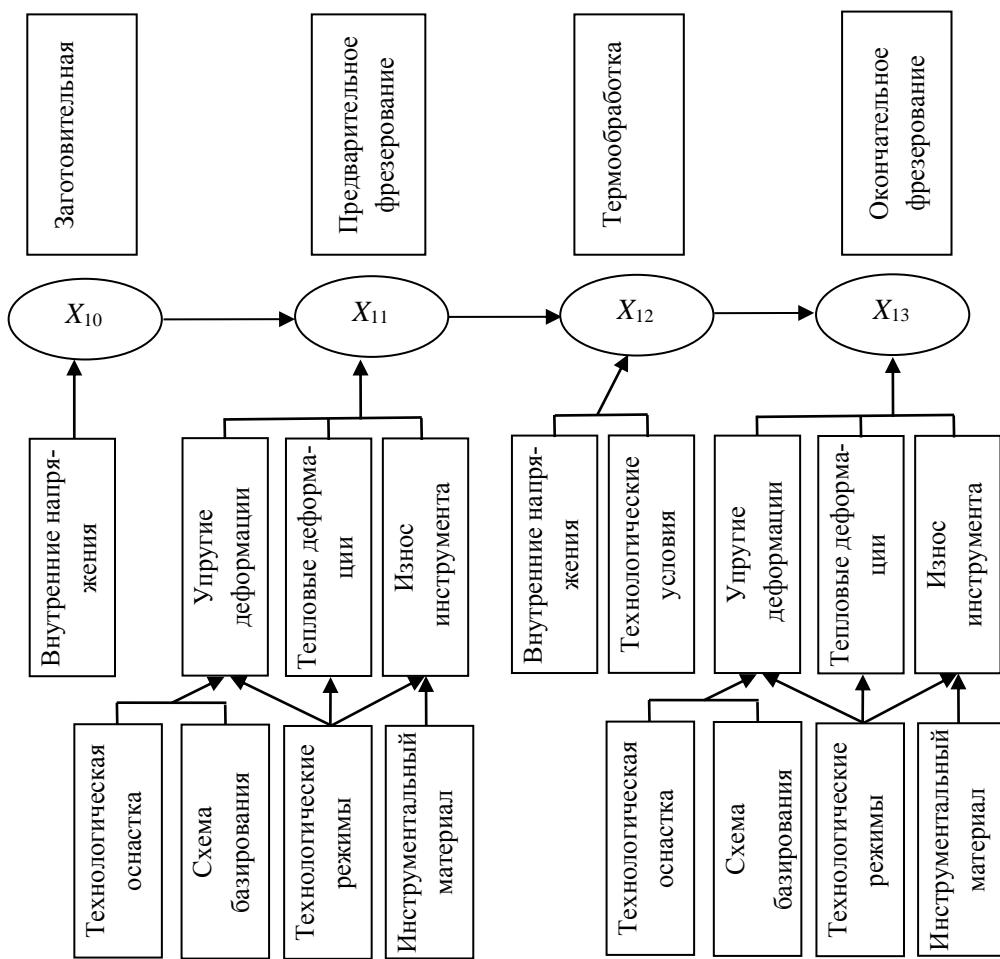


Рис. 2. Структурная схема формирования точности при изготовлении лонжерона

Каждая вершина графа отображает одно из свойств, изменяющееся в ходе технологического процесса. Ориентированные ребра показывают изменение свойств между предыдущей и следующей операциями. Ориентированные ребра характеризуются передачей ребра, то есть коэффициентом, показывающим количественное изменение свойства. В общем виде изменение параметров качества можно представить:

$$X_p = X_{p-1} / k_{p-1},$$

где  $X_p$  и  $X_{p-1}$  – параметры качества изделия после действующей и предшествующей операции соответственно;  $k_p$  – коэффициент технологической наследственности предшествующей операции (коэффициент передачи ребра).

**Заключение.** Полученные результаты экспериментального исследования погрешности формы крупногабаритного изделия «лонжерон» показывают необходимость учета технологической наследственности при обеспечении параметров точности. Для достижения требуемых параметров необходимо ввести в технологический процесс дополнительную промежуточную операцию контроля для возможности корректировки

технологических условий и режимов на окончательной операции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Дуюн Т.А. Технологическое обеспечение точности формы контактной поверхности коллектора электродвигателя // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Тематический выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». 2010. С. 346–349.
- Дуюн Т.А., Максимов Д.А., Схиртладзе А.Г. Обеспечение параметров качества при обкатывании медной поверхности коллектора // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. №6. С. 26–30.
- Дуюн Т.А. Технологическое обеспечение точности формы контактной поверхности коллектора электродвигателя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2010. №1. С. 181–187.
- Дуюн Т.А., Гринек А.В., Рыбак Л.А. Обеспечение надежности работы щеточно-коллекторного узла электрических машин постоянного тока с учетом технологической и эксплуатационной наследственности // Приводная техника. 2009. №2. С. 13–18.

5. Бешевли О.Б., Дуюн Т.А. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2 С. 112–117.

6. Бешевли О.Б., Дуюн Т.А. Оптимизация технологических параметров при фрезеровании баббита в условиях ремонтной обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных

подшипников // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №8 С. 142–148.

7. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Обеспечение технологических параметров фрезерования баббита при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения // Фундаментальные исследования. 2015. №9 (часть 2). С. 273–278.

---

Dolzhikov D.S., Duyun T.A.

### ENSURING ACCURACY OF THE FORM AT PRODUCTION OF THE LONGERON TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL HEREDITY

*Results of pilot studies of an error of a form of the large-size product "longeron" which is a power element of a design of the plane are presented. The experiment was made under production conditions when processing kit of parts with use of the operating industrial equipment, the industrial equipment and the tool. As the measuring equipment the control and measuring device of high precision was used. Features of formation of an error of a form for party of the processed details are revealed. For ensuring the set parameters of accuracy the approach taking into account technological heredity allowing to consider consecutive action of all technological operations and change of parameters of accuracy in the course of performance of a technological route is offered.*

**Keywords:** large-size products, longeron, form error, pilot statistical studies, technological heredity.

---

**Должиков Денис Сергеевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: dance92bull@ya.ru

**Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: tanduun@mail.ru

## ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

k.slonich@gmail.com

С каждым годом прослеживается тенденция к строительству зданий повышенной этажности и высотных. При эксплуатации таких зданий возникает вопрос по выполнению визуального контроля состояния их наружных ограждающих конструкций.

Для визуального контроля предлагается использовать беспилотный летательный аппарат, который оборудован камерой с высоким разрешением пикселей. В мире беспилотные летательные аппараты получили широкое применение.

**Ключевые слова:** обследование, мониторинг, беспилотный летательный аппарат, эффективность, повреждение.

**Введение.** Визуальное обследование является одним из основных методов технического обследования зданий и сооружений. Целью обследования здания или сооружения является определение фактического технического состояния объекта в целом и его элементов, получение количественной оценки фактических показателей качества конструкций для установления состава и объема работ по капитальному ремонту или реконструкции.

Согласно ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [1] обследование технического состояния проводится в три этапа:

1. Подготовка к проведению обследования.
2. Предварительное (визуальное) обследование.
3. Детальное (инструментальное) обследование.

Визуальное обследование выполняется с целью предварительной оценки технического состояния элементов здания по внешним признакам для определения необходимости в проведении детального (инструментального) обследования и уточнения его программы.

**Основная часть.** Обследование крупных или труднодоступных сооружений требует специализированное оборудование и высококвалифицированный персонал. В большинстве случаев такие работы выполняются без указанного оборудования, что не обеспечивает качество результатов и возможности их применения.

Специально подготовленный персонал, например, альпинисты, могут получить доступ к труднодоступным конструкциям, но при этом не могут выполнить оценку объекта с учетом характера и объема повреждений.

Поэтому они могут получить только фотографии объекта или видеоматериал соответствующей конструкции для дальнейшего исследования.

В настоящее время все чаще встречаются работы с низким качеством. Причиной этому, по мнению авторов статьи [2] является недооценка значимости результата работ со стороны заказчика и исполнителя, а также низкая квалификация исполнителей и ограниченность доступа к конструкциям объекта.

Ограниченный доступ к ограждающим конструкциям здания или сооружения, исключает возможность визуального обследования и достоверность результатов обследования по всему объекту. Для высотных зданий, большепролетных сооружений с пролетами более 36 м проведение мониторинга обязательно на всех стадиях строительства и эксплуатации [3].

Теоретически данную проблему можно решить, используя специализированное оборудование, машины (леса, автовышки, альпинизм). При этом, возведение лесов с каждой стороны высотного здания, использование автовышки или привлечение альпинистов приведет к высоким материальным затратам. Кроме того, возникают риски, связанные с обеспечением техники безопасности, при проведении технического обследования с использованием лесов, автовышки.

Основы устранения проблем ограниченного доступа заложены в ФЗ-384 от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4] и должны выполняться еще на этапе проектирования.

В настоящее время данную проблему можно решить за счет применения беспилотных летательных аппаратов, которые позволяют повысить качество визуального обследования и сократить

расходы на его проведение. Беспилотные летательные аппараты могут эффективно применяться для обследования труднодоступных зданий повышенной этажности и высотных.

Существует методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений [3], согласно которой определяют следующие виды нарушений:

- отклонение от вертикали здания и отдельных строительных конструкций (осей колонн, стен лифтовых шахт и других элементов);
- сжатие или усадку колонн и бетонных конструкций;
- раскрытие трещин (при их появлении), динамику их развития;
- осадку фундамента;
- горизонтальное смещение (сдвиг) строительных конструкций.

Данная методика не предусматривает применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга высотных и уникальных зданий и сооружений.

Беспилотные летательные аппараты могут обладать разной степенью автономности - от управляемых дистанционно до полностью автоматических, а также различаться по конструкции, назначению и множеству других параметров.

Основной принцип визуального обследования с использованием беспилотного летатель-

ного аппарата сводится к получению аэрофотоснимков с близкой дистанции в высоком разрешении и под разным углом.

Аэрофотосъемка также активно используется в инженерно-геодезических изысканиях [5]. На этапе инженерно-геодезических изысканий очень много зависит от получения актуальных данных о местности, а точнее создание топографических и ортофотопланов высокой точности.

Беспилотные аппараты позволяют повысить оперативность создания топографических планов в день съемки.

Точность съемки с беспилотного летательного аппарата напрямую зависит от соблюдения технологии и выполнения полетного задания. Обследование здание с применением беспилотного летательного аппарата проводится в три этапа:

1. Предполетная подготовка.
2. Полевые работы.
3. Обработка данных.

Предполетная подготовка включает в себя изучение документации на объект обследования, подбор беспилотного летательного аппарата, составление маршрута полета. Составление маршрута заключается в формировании полетного задания в специализированном программном обеспечении, например, Pix4D (рис.1). В данной программе задается траекторию полета, его высота, скорость.

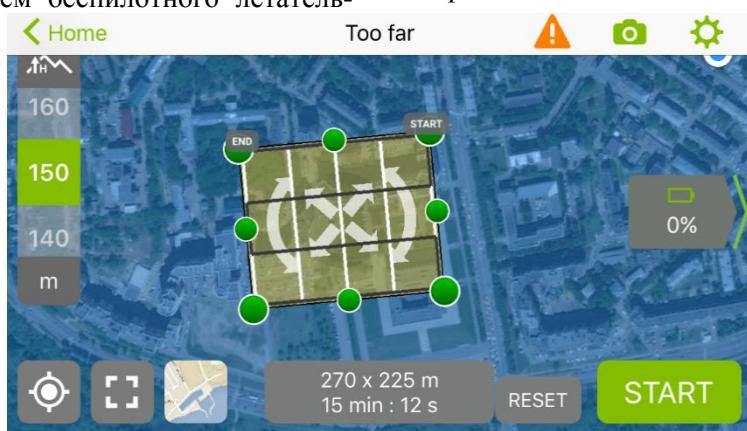


Рис. 1. Пример полетного задания в программном комплексе Pix4D

Полевые работы включают в себя ориентировку на местности, определение точки старта, полет в тестовом режиме (контрольная проверка оборудования), аэрофотосъемка объекта. Полет сопровождается записью видео в формате 4K.

Беспилотный летательный аппарат оборудован функциями, которые упрощают полет. Например, функция «вернуться домой» может гарантировать беспилотному летательному аппарату безопасную посадку. Также в беспилотном летательном аппарате имеется датчик контроля высоты (ба-

рометр), который позволяет удерживать его в заданной точке, для получения более качественных материалов.

После выполнения полетного задания, выполняется анализ и обработка полученных результатов аэрофотосъемки, перевод их в нужный формат и подготовка отчетных материалов.

Материалы, полученные в результате аэрофотосъемки также можно использовать в качестве приложения к техническому заключению.

Мониторинг технического состояния зданий и сооружений проводят для:

- контроля технического состояния зданий и сооружений и своевременного принятия мер по устранению возникающих негативных факторов, ведущих к ухудшению;
- выявление объектов, на которых произошли изменения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и для которых необходимо обследование их технического состояния;
- обеспечения безопасного функционирования зданий и сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований, которые могут повлечь переход объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние;
- отслеживания степени и скорости изменения технического состояния объекта и принятия в случае необходимости экстренных мер по предотвращению его обрушения.



Современными нормами [1] предусматривается, что техническое обследование зданий и сооружений проводится не реже одного раза в десять лет и не реже одного раза в пять лет для зданий и сооружений, работающих в неблагоприятных условиях (агрессивные среды, вибрации, повышенная влажность, сейсмичность района 7 баллов и более и др.). Для уникальных зданий и сооружений устанавливается постоянный режим мониторинга [1].

При необходимости зафиксировать источники тепловых потерь беспилотный летательный аппарат оборудуется тепловизионным оборудованием (рис.2).

Тепловизионная съемка успешно применяется для мониторинга подземных и надземных тепловых коммуникаций. Она помогает повысить эффективность работы теплосетей, сократить тепловые потери, а также сократить время обнаружения утечек теплоносителя. С помощью беспилотных летательных аппаратов можно оценить качество тепловой изоляции фасада, крыши здания.

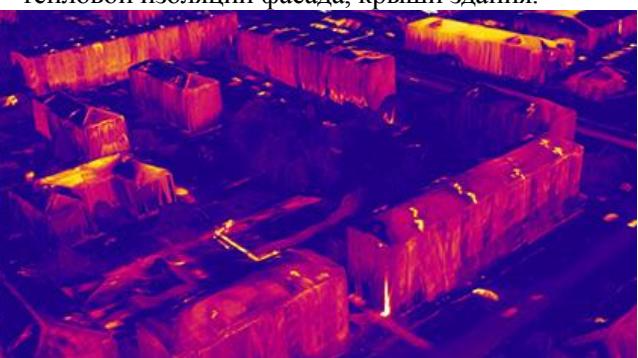


Рис. 2. Тепловизионная съемка с применением БПЛА

Мировым лидером по производству беспилотных летательных аппаратов является китайская компания DJI. В нашей стране рынок использования беспилотных летательных аппаратов находится в стадии становления.

Существует ряд факторов, ограничивающих развитие перспективной технологии, которые необходимо решить:

1. Отсутствие нормативно-правовой базы, регулирующей деятельность применения беспилотных летательных аппаратов (на сегодняшний день в существующих нормах по техническому обследованию не указана возможность проведения визуального обследования с использованием летательных аппаратов).

2. Отсутствие систем предупреждения столкновений, позволяющих интегрировать беспилотные летательные аппараты в единое воздушное пространство и совместное их использование с пилотируемойaviацией общего назначения.

3. Отсутствуют нормы и порядок сертификации и стандартизации беспилотных летательных аппаратов.

**Выводы.** Качество визуального обследования зданий повышенной этажности и высотных невозможно обеспечить без использования летательных аппаратов.

Использование беспилотных летательных аппаратов в условиях города является перспективной технологией технического обследования. Для развития данной технологии необходимо создание соответствующей нормативно-правовой базы, регламентирующей допустимую высоту полета, допустимые зоны полета, максимальную скорость, ответственность, административные правила безопасности. Важно определить порядок государственного надзора в сфере беспилотных летательных аппаратов, в том числе обмен информацией о предполагаемом полетном задании.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
2. Улыбин А.В., Ватин Н.И. Качество визуального обследования зданий и сооружений и методика его выполнения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №10(25). С. 1–2.
3. МДС 13-22.2009 «Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений»
4. ФЗ-384 от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»
5. СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96
6. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»
7. Shtengel V.G. Obshchiye problemy tekhnicheskogo obsledovaniya nemetallicheskikh stroitelnykh konstruktsiy ekspluatiruyemykh zdaniy i sooruzheniy [General problems of technical diagnosis of non-metal building structures in exploitable buildings and erections] // Magazine of Civil Engineering, 2010. № 7(17). Pp. 4-9. (rus)
8. Yeremin K.I., Matveyushkin S.A. Osobennosti ekspertizy i NKT metallicheskikh konstruktsiy ekspluatiruyemykh sooruzheniy [Features of inspection and NDT of metal structures in operated facilities]// NDT World Review. 2008. № 4 (42). Pp. 4-7.(rus)
9. Герасимов П.К., Егоров Д.А. Аспекты безопасности управления автономными беспилотными летательными аппаратами в городской среде / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2014», 1-5 декабря 2014 г., Москва. // Под ред. академика РАН А.С. Сигова. М.: МГТУ МИРЭА, 2014. Ч 5. С. 130–132.
10. Zhang Y.J. Photogrammetric processing of low altitude image sequences by unmanned airship, XXI ISPRS Congress, Beijing, China, 2008.
11. Eisenbeiß H. UAV Photogrammetry, PhD Thesis, ETH Zurich, Switzerland, 2009.
12. Menti N., Hamel T. A UAV for bridge inspection: visual servoing control law with orientation limits // Automation in Construction. 2007. Vol. 17. №. 1. Pp. 3–10.
13. Adams S., Levitan M., Friedland C. High resolution imagery collection utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) for post-disaster studies // ATC& SEI Conference on Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past, Miami, Florida, USA, 2012. Pp. 777–793.

**Slonich K.A., Semenov A.S.**

### SURVEYS OF BUILDINGS AND INSTALLATIONS USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

*Every year the trend is towards the construction of elevated floors and high-rise buildings. The operation of such buildings raises the question of visual control over the condition of their exterior insulating structures. For visual inspection, it is proposed to use an unmanned aerial vehicle equipped with a high-resolution camera. In the world, unmanned aerial vehicles have been widely used in various industries.*

**Keywords:** survey, monitoring, unmanned aerial vehicle, efficiency, damage.

**Семенов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Адрес: Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького 87.  
E-mail: semenov-alex@mail.ru

**Слонич Кирилл Алексеевич**, магистрант кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляции и гидравлика».

Владimirский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Адрес: Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького 87.  
E-mail: k.slonich@gmail.com

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.12737/article\_59a93b0d21e237.99095102

Каган П.Б., канд. техн. наук, доц.

Гудков П.К., аспирант

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

## ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И ТРАДИЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ САПР

gudkovpk@mgsu.ru

В настоящее время, в России особое внимание уделяется технологии информационного моделирования зданий (BIM-технология). Однако сама по себе BIM-технология, являясь во многом эволюционным развитием традиционных систем автоматизированного проектирования (САПР), не может рассматриваться в отрыве от них.

В рамках настоящей статьи проведен обзор эволюционного развития систем автоматизированного проектирования как основного инструмента в архитектурно-строительном проектировании: рассмотрено понятие САПР, описаны общие тенденции развития САПР как инструмента архитектурно-строительного проектирования, основная задача, решаемая при помощи традиционных САПР, дана краткая классификация САПР.

В противовес традиционным САПР рассмотрена общая концепция BIM-технологии, описаны ее основные достоинства. В статье особо подчёркивается важность формирования единого информационного пространства при обеспечении жизненного цикла строительного объекта, получаемых и внедряемых в модель на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта, а также влияния увеличения доли машинной обработки задачи с точки зрения повышения конечного качества продукта.

**Ключевые слова:** Системы автоматизированного проектирования, САПР, информационная модель здания, BIM, BIM-модель.

**Введение.** В XX-ом веке произошло одно из самых знаковых событий в истории человечества, в существенной степени повлиявшее на все сферы жизнедеятельности человека – появление электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Первоначально, ЭВМ использовались ограниченным кругом лиц, обладающих достаточными техническими знаниями, для решения задач, как правило связанными с математическими вычислениями. Однако, в процессе развития и увеличения вычислительных характеристик, диапазон решаемых при помощи ЭВМ задач непрерывно увеличивался. На сегодняшний день ЭВМ используется практически во всех областях деятельности человека, начиная от оборонно-промышленного комплекса и заканчивая повседневной жизнью. Внедрение ЭВМ не обошло, разумеется, стороной и такую область инженерной деятельности, как архитектурно-строительное проектирование. Создаваемые на базе вычислительной и оргтехники различные системы автоматизации проектирования получили наименование САПР.

**Основная часть.** В самом общем смысле САПР – автоматизированная система, реализующая информационную технологию выполнения функций проектирования, представляющая собой организационно-техническую систему, предназначенную для автоматизации процесса проектирования, состоящую из персонала и комплекса технических, программных и других средств автоматизации деятельности [1].

Исходная задача, решаемая при помощи различных САПР в архитектурно-строительном проектировании – всесторонняя автоматизация процесса архитектурно-строительного проектирования: создание чертежей, документации, 3D моделей, трехмерная визуализация, расчёты, анализ и моделирование физических процессов. Результатом является сокращение трудоемкости и сроков проектирования, повышение качества результирующего продукта, а также понижение вероятности возникновения ошибок.

В развитии автоматизации проектирования в конце 80-90 гг. XX века начали появляться системы с возможностью внедрения параметров в процессе моделирования. При параметрическом

моделировании – создается не только геометрическая, но и математическая модель объекта, при изменении параметров которых происходит динамическое изменение всей системы [2].

Для решения большинства задач архитектурно-строительного проектирования используется различные виды современных САПР: CAD (computer-aided design) – программные продукты, как правило, предназначенные для создания чертежей, конструкторской, технологической документации и/или 3D моделей; CAE (computer-aided engineering) – программные продукты, предназначенные для инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов; CAM (computer-aided manufacturing) – программные продукты, предназначенные для подготовки технологического процесса производства изделий, ориентированного на использование ЭВМ [3–5].

Многие современные программные продукты, используемые для архитектурно-строительного проектирования, обладают чертами нескольких типов САПР (например, CAD и CAE), используют возможности параметрического моделирования, и могут быть использованы как для

решения архитектурных, так и конструкторских задач.

Несмотря на очевидные положительные эффекты от использования автоматизированных систем в процессе архитектурно-строительного проектирования использование традиционных САПР не изменяет, а упрощает сам процесс архитектурно-строительного проектирования. Основной задачей САПР остается автоматизация процесса проектирования, а результатом является готовый проект, на основе которого и будет выполняться строительство объектов.

При этом, проектирование с использованием традиционных САПР требует решения ряда проблем:

1. Отсутствие единого информационного пространства, содержащего исчерпывающий объем информации об объекте строительства — фактически, информация представляет собой разрозненные массивы данных об объекте в слабо структурированном и связанном между собой виде (рис. 1).

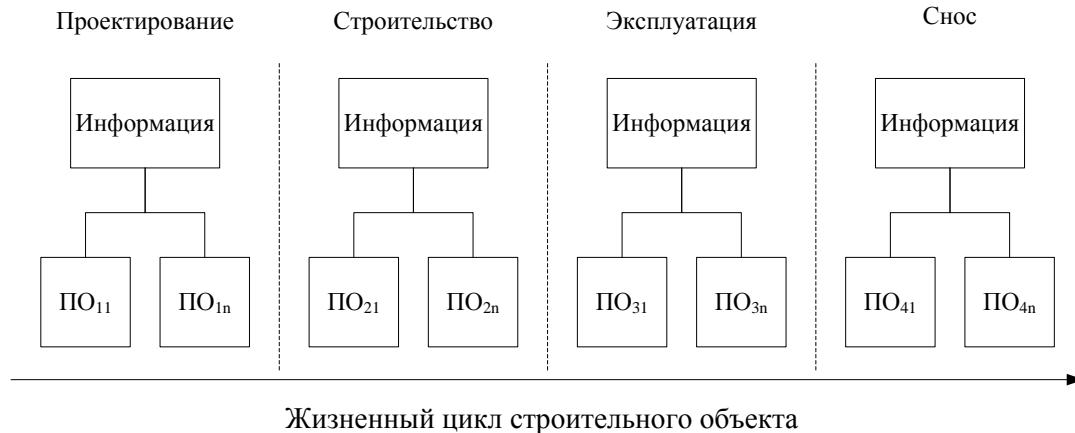


Рис. 1. Обмен данными на различных этапах жизненного цикла строительного объекта при традиционных САПР

2. Ввиду отсутствия единого информационного пространства, и несмотря на существование открытых форматов передачи данных (прим. IFC) обмен данными между различными САПР, группами проектировщиков и иными участниками процесса проектирования и эксплуатация как на одном этапе жизненного цикла объекта, так и на разных ввиду слабой согласованности форматов, протоколов, используемых различными производителями программного обеспечения, является весьма затруднительным.

3. Проекты, создаваемые с использованием САПР, отражают объект в один строго определенный промежуток времени в строго фиксированном, как правило, завершенном состоянии. Внесение корректировок в проект может потребовать значительных трудозатрат.

Информационное моделирование зданий (Building Information Modeling) возникло как эволюционное развитие процесса использования автоматизированного проектирования, в рамках которого информация об объекте не только создается и/или передается иным заинтересованным сторонам, но накапливается, хранится и обрабатывается в единой, взаимосвязанной структуре – информационной модели здания (Building Information Model) в течение всего жизненного цикла, в том числе на этапе предпроектных работ [6] – образуя тем самым единое информационное пространство, обладающее на каждом этапе строительного проектирования исчерпывающим объемом информации.

Таким образом, можно сказать, что основная задача информационного моделирования зданий

смещается с процесса архитектурно-строительного проектирования, который с успехом выполняется с использованием традиционных САПР, на процесс формирования, накопления и последующего использования информации об объекте и последующем использовании информации в тече-

ние всего жизненного цикла (рис. 2). Фактически САПР, а также иные прикладные программные продукты, становятся инструментом в первую очередь обеспечивающим наполнение информационной модели в рамках одной из подзадач, решаемых на отдельном этапе жизненного цикла здания.

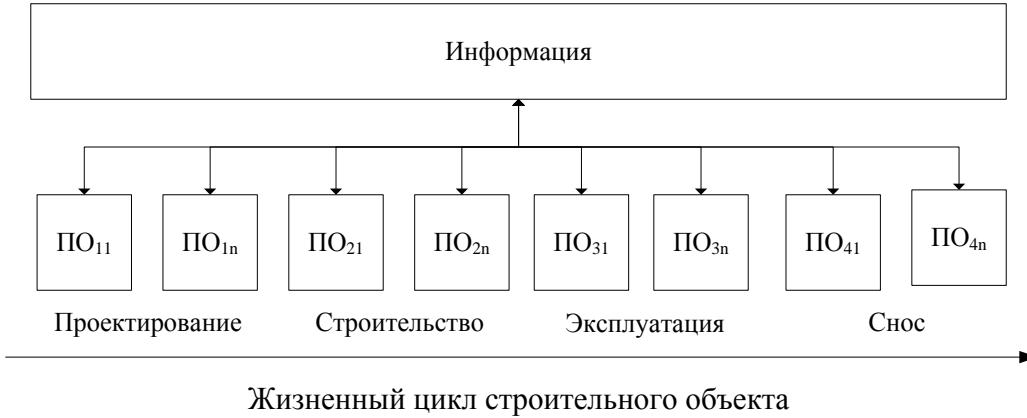


Рис. 2. Обмен данными на различных этапах жизненного цикла объекта. Концепция информационного моделирования зданий

Результатом проектирования является не столько готовый проект, по которому будут выполняться строительно-монтажные работы впоследствии, или 3D модель сколько информационная модель объекта, которая на последующих этапах жизненного цикла так же будет дополняться информацией, то есть, основной результат – BIM-модель, а проектная документация (чертежи) могут быть сформированы на основе данных, хранящихся в BIM-модели [7–10].

В отличие от единичного конечного состояния проекта, подготовленного в рамках САПР, «Жизнь» информационной модели здания на этапе проектирования только начинается [11]. Модель может быть наполнена совершенно разнообразной информацией, используемой для:

- принятия конкретных проектных решений;
- расчета узлов и компонентов здания;
- предсказания эксплуатационных качеств объекта;
- создания проектной документации;
- составления смет и строительных планов;
- заказа и изготовления материалов и оборудования;
- управления возведением здания;
- управления эксплуатацией в течение всего жизненного цикла объекта;
- управления зданием как объектом коммерческой деятельности;
- проектирования и управления реконструкцией или ремонтом здания;
- сноса и утилизации здания;
- иных связанных со зданием целей [12].

Кроме того, благодаря глубокой связности информации, информационная модель может обладать значительно большим уровнем контроля корректности данных и, как следствие, содержать в себе меньше ошибок, осуществлять проверку на наличие ряда ошибок, при условии наличия достаточной информации на этапе включения данных в модель, а также, при правильном подборе контролируемых параметров – основой для контроля качества на всех этапах жизненного цикла объекта [13].

**Выводы.** Фактически, единое информационное пространство не обязательно подразумевает единое физическое место хранения, и допускает распределенную систему хранения, при сохранении логической взаимосвязи между объектами.

Перспективным развитием информационного моделирования, в части построения единого информационного поля является обеспечение беспрепятственного взаимодействия между любыми информационными моделями, существующими на всех этапах жизненного здания.

Задача интеграции информационных систем на данный момент является одной из перспективных.

В целом, дальнейшим, эволюционным развитием процесса архитектурно-строительного проектирования является не только его полный переход в цифровую плоскость – информационное моделирование зданий, но также строгое регламентирование структуры информационной модели, характерное для объектной модели, приданье смысловой нагрузки для используемых в итоговой модели объектов создание внутренних

логических взаимосвязей между всеми объектами, формирование единого информационного пространства – хаба, содержащего сведения обо всех объектах строительства, позволяющего со-здавать управляющую логику для части или пол-ного обеспечения жизнедеятельности здания–формируя тем самым понятие умный город. Пер-спективой же ближайших лет можно назвать пе-реход от принципа информационного моделиро-вания зданий к принципу информационного мо-делирования жизненного цикла зданий [6,16].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 23501.101-87 «Системы автомати-зированного проектирования. Основные положе-ния».
2. Параметрическое моделирование [Элек-тронный ресурс]. Систем. требования: Internet ex-plorer URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Парамет-рическое\\_моделирование](https://ru.wikipedia.org/wiki/Парамет-рическое_моделирование) (дата обращения 12.11.2016).
3. CAD | CAE | CAM | PDM | PLM | CALS системы | Описание | Применение, [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet explorer. URL: [http://www.tech-gidravlika.ru/view\\_post.php?id=45](http://www.tech-gidravlika.ru/view_post.php?id=45) (дата обраще-ния 12.11.2016).
4. Dankwort C.W., Weidlich R., Guenther, B. Blaurock J.E. Engineers' CAx education-it's not only CAD // Computer Aided Design 36. 2004. Pp.1539–1450.
5. Гинзбург А.В., Баранова О.М., Блохина Н.С., Волков А.А. и др. Системы автоматизации проектирования в строительстве. М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2014. 664 с.
6. Гинзбург А.В. Информационная модель жизненного цикла строительного объекта // Про-мышленное и гражданское строительство. 2016. № 9. С. 61–65.
7. Каган П.Б. Моделирование застройки терриорий // Вестник КИГИТ. 2012. № 12-3. С. 9–9.
8. Kagan P.B., Muminova S.R. BIM training course in construction university // В сборнике: Pro-ceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality. 2011. С. 72–77.
9. Каган П.Б. Представление информации при проектировании, строительстве и эксплуата-ции линейных объектов инженерных коммуника-ционных сетей // Промышленное и гражданское строительство, 2016. № 3. С. 71–75.
10. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. New York: Wiley. 2008.
11. Игнатов В.П., Игнатова Е.В. Эффектив-ное использование информационной модели строительного объекта // Вестник МГСУ. 2011. Т.1. № 1. С. 321–324.
12. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК Пресс, 2011. 392 с
13. Open Bim, [Электронный ресурс]. Си-стем. требования: Internet explorer. URL: [http://www.graphisoft.ru/archicad/open\\_bim/about\\_bim/#goodFor](http://www.graphisoft.ru/archicad/open_bim/about_bim/#goodFor) (дата обращения 12.11.2016).
14. BIM как инструмент повышения качества проектирования, [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet explorer. URL: <http://ardexpert.ru/arti-cle/4710> (дата обращения 12.11.2016).
15. Ганночка О. Взгляд на BIM со стороны [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet explorer. URL: <http://tech.archimatika.com/bim-view-outside/#more-256> (дата обра-щения 12.11.2016).
16. Volkov A., Chulkov V., Korotkov D. LIFE CYCLE OF A BUILDING, CEUR Workshop Pro-ceedings 2015.

---

## Kagan P.B., Gudkov P.K.

### BUILDING INFORMATION MODELLING AND TRADITIONAL DESIGN USING CAD

*At present, in Russia special attention is paid to the technology of building information modeling (BIM-techno-logy). However, BIM technology itself, being in many respects an evolutionary development of traditional CAD systems, can not be considered in isolation.*

*This article is concentrated on the evolutionary development of CAD systems as the main tool in architectural and construction design, is reviewed: the concept of CAD is considered, general trends in the development of CAD as a tool for architectural and construction design are described, the main task solved with traditional CAD is given a brief classification of CAD.*

*In contrast to traditional CAD systems, the general concept of BIM-technology is considered, its main ad-vantages are described. The article emphasizes the importance of creating a single information space while ensuring the life cycle of a building object that are received and introduced into the model throughout the life cycle of a construction site, as well as the effect of increasing the share of machine processing tasks in terms of improving the final quality of the product.*

**Keywords:** computer aided design, CAD, Building Information Modelling, BIM.

---

**Каган Павел Борисович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве.  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Адрес: Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26  
E-mail: kagan@mgsu.ru

**Гудков Павел Кириллович**, аспирант кафедры Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве.  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Адрес: Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26  
E-mail: gudkovpk@mgsu.ru

Еременко В.Т., д-р техн. наук, проф.  
Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева  
Илюхин А.А., канд. техн. наук, доц.,  
Попов В.В., сотрудник  
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

## МЕТОДИКА МНОГОУРОВНЕВОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЕДИНОЙ СЕТИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНОЙ АСУТП ЖКХ

[wladimir@orel.ru](mailto:wladimir@orel.ru)

Технико-экономическая эффективность сетей сбора и обработки данных автоматизированных систем управления технологическими процессами обусловлена последовательными решениями в процессе ее проектирования. В статье предложена методика многоуровневого согласования проектных решений при построении сети сбора и обработки данных на основе модели многоуровневого марковского процесса принятия решений с вероятностной динамикой состояний. При этом обеспечивается возможность принятия решений на каждом этапе с учетом межуровневых взаимодействий, согласованных в рамках решения глобальной оптимизационной задачи.

**Ключевые слова:** сеть сбора и обработки данных, многоуровневая модель, марковский процесс, межуровневое взаимодействие, функционал Беллмана.

**Введение.** В настоящее время жилищно-коммунальный сектор экономики России находится в сложном положении, а эффективность работы предприятий жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) остается низкой. Важнейшей задачей современных предприятий ЖКХ является предоставление необходимых услуг населению с максимальной эффективностью и минимальной себестоимостью.

В последние годы все более широкое применение в жилищно-коммунальной сфере находит автоматизация и диспетчеризация инженерных систем, представляющая собой комплекс программно-аппаратных средств, предназначенных для мониторинга и управления.

Автоматизация и диспетчеризация ЖКХ призвана увеличить эффективность использования энергоресурсов и сократить их неконтролируемый расход, снизить совокупные затраты на обслуживание инженерных систем и коммунальной инфраструктуры объектов. Это требует роста уровня технической оснащенности инженерных объектов и использования современных информационных технологий для контроля их работы.

Автоматизация и диспетчеризация систем ЖКХ повышает надежность систем управления и оперативность управления, а также обеспечивают технологическую безопасность и снижения расходов на эксплуатацию.

В условиях городской застройки широкое применение находят беспроводные АСУТП ЖКХ (рис. 1). Современные технологии радиодоступа LoRaWAN, SigFox, Weightless, Nwave, тех-

нологии, основанные на существующих стандартах мобильной связи, протоколы автоматизации технологических процессов LonWorks, KXE/EIB, Modbus, BACnet позволяют добиться высоких результатов в отношении требуемой оперативности и надежности передачи данных, функциональности оборудования сети сбора и обработки данных с меньшими, по сравнению с проводными сетями, затратами на создание сети в целом [1].

Количественный и качественный рост сетей передачи данных по радиоканалам вынуждает разработчиков и производителей систем беспроводной связи искать новые решения проблем взаимодействия узлов и систем, а также совместимости сетей.

С позиции телекоммуникационных технологий АСУТП ЖКХ является сложной территориально-распределенной централизованной системой, характеризуемой различными форматами измерительных и расчетных данных, содержащей измерительные, управляющие и защитные устройства, функционирующие в режиме реального времени.

Для обеспечения корректной, своевременной и точной работы всех компонент АСУТП ЖКХ необходимо наличие единой транспортной телекоммуникационной основы – единой сети сбора и обработки данных (ЕССОД), как совокупности локальных радиосетей, предоставляющей возможности удаленного сбора данных о состоянии объектов и протекающих в них процессах в режиме реального времени, а также выработки управляющих решений.

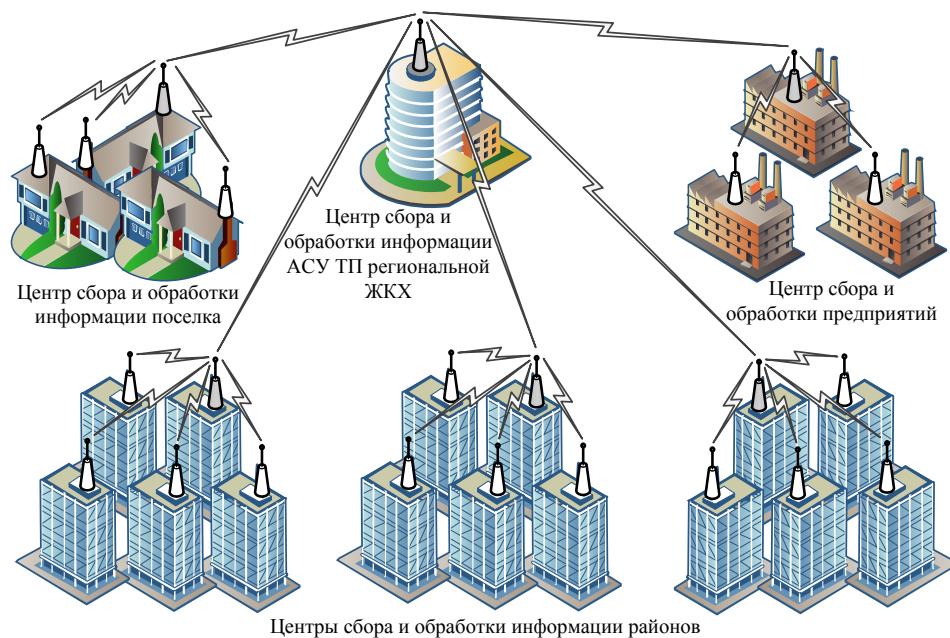


Рис. 1. Общая структура ЕССОД региональной АСУТП ЖКХ

Однако отсутствие в настоящее время научно обоснованных решений по построению единой радиосети сбора и обработки данных, количеству одновременно поддерживаемых соединений на радиоканал, выбору способа передачи сообщений и т.д. обуславливает избыточно высокую проектную стоимость разрабатываемых сетей и не позволяет в будущем обеспечить их масштабируемость [1, 2].

В связи с этим актуальной является разработка методики многоуровневого согласования проектных решений при построении ЕССОД АСУТП ЖКХ, обладающей высокой технико-экономической эффективностью. Основой для согласования проектных решений по каждому этапу построения систем сбора и обработки данных АСУТП является многоуровневая модель марковского процесса принятия решений [3].

**Основная часть.** Исходными данными при проектировании ЕССОД являются количество абонентских станций  $N_{ac}$ , передающих сообщения датчиков, и места их географического местоположения  $LP_{bc}$  (географические координаты) в локальных радиосетях (ЛРС). Технология и протокол передачи сообщений методом случайного множественного доступа установлен, однако параметры канала радиодоступа с учетом взаимного удаления базовых и абонентских станций, условий распространения радиоволн и коллизий сообщений в общем канале не определены.

Технико-экономическая эффективность единой сети сбора и обработки данных АСУТП обусловлена последовательно принимаемыми решениями в процессе ее проектирования (рис. 2). Вы-

делим в последовательности этапов проектирования в соответствии с принципами построения сетей передачи данных и уровнями ЭМВОС (физический, канальный, сетевой) на каждом  $l$ -м уровне множество вариантов решения  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_L) \in U$  и множество состояний  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_L) \in X$ , характеризующих структуру ЕССОД, а также процессы сбора и обработки данных в ней.

Глобальное решение по построению ЕССОД в сегменте радиодоступа [3] определяется множеством параметров многоуровневой структуры проектирования

$$\mathbf{u} = \{u_1, u_2, u_3\} \in U, \quad U = U_1 \times U_2 \times U_3,$$

$u_l \in U_l, l = 1, 2, 3$  – подмножества, определяющие количество базовых станций ЛРС  $N_{bc}$  и места их размещения  $LP_{bc}$  (географические координаты), параметры радиоканала по символьной скорости  $R_c$  (симв/с), позиционности модуляции  $M$ , скорости помехоустойчивого кодирования  $R_k$ , параметры протокола сбора и обработки данных в канале радиодоступа по объему сообщения датчика  $D$  (бит) и вероятности повторной передачи данных  $\beta$

$$u_1 = \{N_{bc}, P_n\}, \quad u_2 = \{R_c, M, R_k, D\}, \quad u_3 = \{\beta\}.$$

Глобальное состояние ЕССОД в сегменте радиодоступа

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\} \in X, \quad X = X_1 \times X_2 \times X_3,$$

где  $x_l \in X_l, l = 1, 2, 3$  – подмножества, определяющие состояние процессов сбора и обработки по количеству подключаемых активных источников данных (датчиков АСУТП ЖКХ)  $N$ , качеству

связи, т.е. отношению сигнал/шум  $\frac{P_s}{P_n}$  и задолженности  $n$  в канале радиодоступа, т.е. количеству источников, повторно передающих данные,

$$x_1 = \{N\}, \quad x_2 = \left\{ \frac{P_s}{P_n} \right\}, \quad x_3 = \{n\}.$$

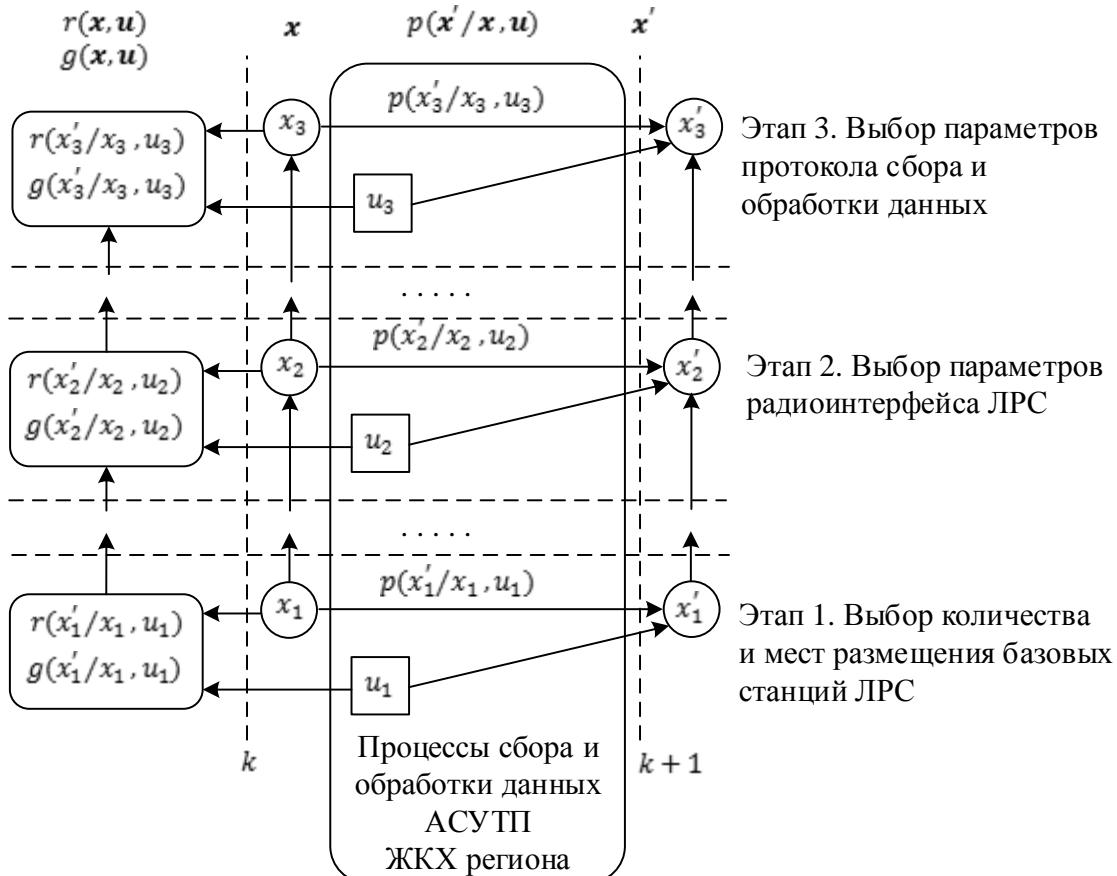


Рис. 2. Трехэтапная структура модели марковского процесса принятия решений

Выбор тех или иных решений на каждом этапе проектирования определит в конечном итоге технико-экономическую эффективность ЕССОД, оцениваемую производительностью ЕССОД в показателях интенсивности обрабатываемых сообщений (сообщ/с) в расчетах на удельную проектную стоимость (руб.)

$$\rho = \frac{R_c R_k \log_2 M (1 - p_{\text{пот}}) S}{D C_{6c} N_{6c}}, \quad (1)$$

где  $C_{6c}$  – стоимость оборудования одной базовой станции (руб.),  $p_{\text{пот}}$  – вероятность потерь сообщения в радиоканале вследствие низкого качества связи,  $S$  – производительность протокола случайного доступа, определяемая количеством успешно обработанных сообщений источниками.

Характер изменения состояний процессов сбора и обработки является случайным. Однако динамика состояний моделируемых процессов в справедливом предположении о ее стационарности может быть описана в терминах марковских процессов принятия решений (МППР). Важно и

то, что для последовательных этапов проектирования вероятностная динамика состояний марковских процессов принятия решений на последующих этапах определяется вероятностным распределением состояний и принимаемыми решениями предыдущих этапов [4]

$$p(x'/x, u) = \prod_{l=1}^L p(x'_l/x_l, x'_{1 \rightarrow l-1}, u_l),$$

где  $x'_{1 \rightarrow L} = (x'_1, \dots, x'_L)$  – ожидаемые состояния моделируемых процессов сбора и обработки данных, заданные в стационарном случае известной вероятностной мерой – матрицей переходов  $p(x'_l/x_l, u_l)$

$$p: X_l \times U_l \times X_l \mapsto [0,1], l = 1, L.$$

С каждым из последовательных этапов проектирования ЕССОД связаны условные по состояниям и управлению в терминах марковских процессов принятия решений доходы  $r(x'/x, u)$  и затраты  $g(x'/x, u)$ , устанавливающие технико-

экономическую эффективность  $\rho$  ЕССОД. Функционал (1) для многоуровневой структуры процесса принятия решений на основании свойств логарифмирования может быть представлен в аддитивном виде по компонентам каждого из этапов

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{l=1}^L r_l(x_l, u_l) - \sum_{l=1}^L \lambda_l^g g_l(x_l, u_l), \quad (2)$$

для которого в дальнейшем могут быть уточнены его определяющие свойства, необходимые для целей оптимизации процесса построения ЕССОД

$$\max_{\mathbf{u}} V(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{x'} p(x'/x, \mathbf{u}) R(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (3)$$

$$V_k^*(\mathbf{x}) = \max_{u \in \prod_{l=1}^L u_l} \left( R(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \beta \sum_{x' \in X} p(x'/x, \mathbf{u}) V_{k-1}^*(x') \right), \quad (4)$$

где  $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_L) \in X$  – ожидаемые состояния процесса информационного обмена и совместные решения  $u = (u_1, u_2, \dots, u_L) \in U$  на этапах проектирования,  $k$  – номер шага,  $\beta$  – коэффициенты дисконтирования.

Явные свойства многоуровневого марковского процесса принятия решений с вероятностной динамикой, определяемой условной зависимостью динамики состояний процессов последующих этапов проектирования от вероятностного

$$p(x'/x, \mathbf{u}) = p(x'_1/x_1, u_1)p(x'_2/x_2, x'_1, u_2) \dots p(x'_L/x_L, x'_{1-L}, u_L) \quad (5)$$

и функции условных доходов

$$V_{l-1} = f(x_l, u_l, V_l), \quad l = \overline{1, L}$$

многоуровневого последовательного процесса принятия решений, позволяет представить функционал динамического программирования, оптимизируемый совместными управлениями  $u \in U$  в следующем виде:

$$V_k^*(\mathbf{x}, u) = \max_{u \in U} \left( r_1(x_1, u_1) - \sum_{l=2}^L g_l(x_l, u_l) - \sum_{l=1}^L \lambda_l^g g_l(x_l, u_l) + \beta \sum_{x' \in X} \prod_{l=1}^L p(x'_l/x_l, x'_{1-l}, u_l) V_{k-1}^*(x') \right). \quad (6)$$

Учитывая условие нормировки переходных вероятностей по состояниям, предложена процедура вычисления оптимального значения целевой функции (6) на каждой итерации поиска и оптимальной стратегии в обратной прогонке.

В начальный момент времени, предшествующий выполнению оптимизационной процедуры, каждый из предыдущих этапов проектирования  $l \in \{1, \dots, L-1\}$  формирует информацию о технико-экономической эффективности  $\theta_{l-1,l} = \{\mathbb{Q}_{l-1}(\mathbf{x})\}$

где  $\lambda_l^g$  – удельные коэффициенты, устанавливающие соответствие между показателями производительности и проектной стоимости.

Предложим и реализуем подход, обеспечивающий возможность на каждом этапе принятия решения, используя межуровневый обмен, принимать локально оптимальные решения, согласованные в рамках глобальной оптимизационной задачи [3]. Учет межуровневых взаимодействий осуществляется в рамках текущей многоуровневой структуры процесса принятия решений для нахождения оптимального значения функционала динамического программирования

распределения состояний и принимаемых решений на предыдущих этапах, свидетельствуют о важности применения многоуровневой модели для согласования проектных решений для нахождения компромисса между производительностью и проектной стоимостью ЕССОД АСУТП ЖКХ региона.

Справедливость декомпозиции условных вероятностей

$$\mathbb{Q}_{l-1}(\mathbf{x}) = \{\rho_l | \rho_l = f_l(x_l, u_l, \rho_{l-1})\}, \quad (7)$$

$\forall x_{l \rightarrow L} \in X_{l \rightarrow L}, \forall u_{l \rightarrow L} \in U_{l \rightarrow L}$ ,  
где  $\rho_l$  – удельная производительность ЕССОД (1) и функции преобразования  $f_l(x_l, u_l, \rho_{l-1})$  определены разработанными математическими моделями в [3].

Функции условных доходов на последующем этапе проектирования могут быть определены по значениям  $\rho_l$ , рекуррентно пересчитанным с учетом принимаемых решений на предыдущем этапе (рис. 3).

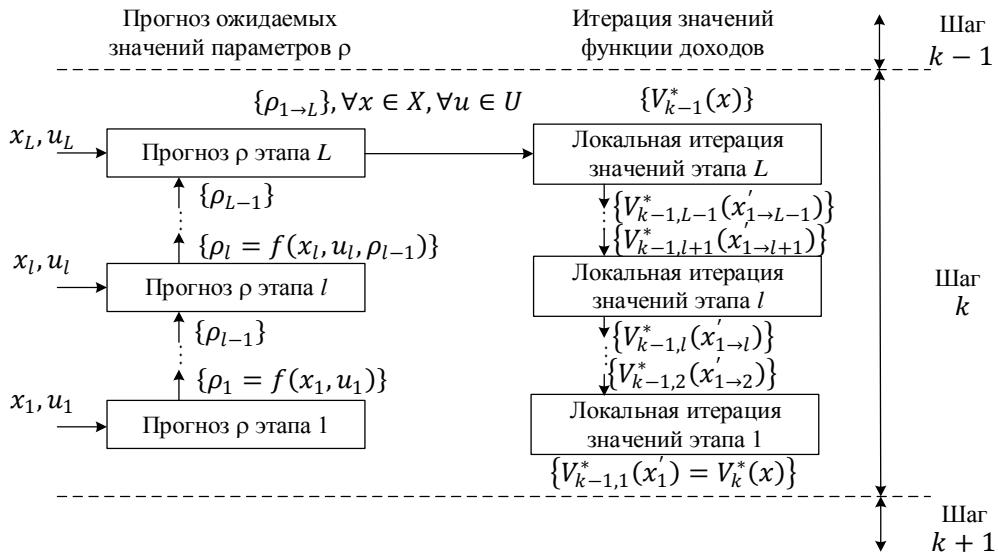


Рис.3. Принцип координации межуровневых взаимодействий при последовательном принятии решений

Учитывая, что значения удельной производительности ЕССОД на предыдущих этапах не зависят от прогнозируемых состояний процессов

$$\sum_{x'_{1 \rightarrow L} \in X_{1 \rightarrow L}} \prod_{l=1}^L p(x'_l / x_l, x'_{1 \rightarrow l-1}, u_l) = 1, \quad (8)$$

выражение (6) можем представить в следующем виде:

$$V_k^*(x) = \max_{u_{1 \rightarrow L-1} \in U_{1 \rightarrow L-1}} \left\{ r_1(x_1, u_1) - \sum_{l=2}^{L-1} g_l(x_l, u_l) - \sum_{l=1}^{L-1} \lambda_l^g g_l(x_l, u_l) + \beta \sum_{x'_{1 \rightarrow L-1} \in X_{1 \rightarrow L-1}} \prod_{l=1}^{L-1} p(x'_l / x_l, x'_{1 \rightarrow l-1}, u_l) V_{k-1, L-1}^*(x'_{1 \rightarrow L-1}) \right\}. \quad (9)$$

Таким образом, выбор решения с оценкой удельной производительности на предыдущем этапе обеспечит максимизацию функции  $V_k^*(x)$  на локальной итерации. Правая часть данного

на последующих, а также условие нормировки переходных вероятностей по состояниям

выражения – локальная итерация стратегий на этапе  $L$  для всех  $x_{1 \rightarrow L-1} \in X_{1 \rightarrow L-1}$  и  $u_{1 \rightarrow L-1} \in U_{1 \rightarrow L-1}$

$$V_{k-1, L-1}^*(x'_{1 \rightarrow L-1}) = \max_{u_L \in U_L} \left\{ -g_L(x_L, u_L) - \lambda_L^g g_L(x_L, u_L) + \sum_{x'_L \in X_L} p(x'_L / x_L, u_L, x'_{1 \rightarrow L-1}) V_{k-1}^*(x'_1, \dots, x'_L) \right\}. \quad (10)$$

Оптимальные решения  $u_L^*(x'_1, \dots, x'_L)$

$$u_L^* = \arg \max_{u_L \in U_L} V_{k-1, L-1}^*(x'_{1 \rightarrow L-1})$$

зависят от ожидаемых состояний последующих этапов. После выполнения этапом  $L$  локальной

оптимизации для каждого состояния  $x'_1, \dots, x'_{L-1}$  формируются решения  $\{V_{k-1, L-1}^*(x'_1, \dots, x'_{L-1}), u_L^* | \forall (x'_1, \dots, x'_{L-1})\}$  к предыдущему этапу  $L-1$ , снижая таким образом размерность функционала Беллмана:

$$V_k^*(x) = \max_{u_{1 \rightarrow L-2} \in U_{1 \rightarrow L-2}} \left\{ r_1(x_1, u_1) - \sum_{l=2}^{L-2} g_l(x_l, u_l) - \sum_{l=1}^{L-2} \lambda_l^g g_l(x_l, u_l) + \beta \sum_{x'_{1 \rightarrow L-2} \in X_{1 \rightarrow L-2}} \prod_{l=1}^{L-2} p(x'_l / x_l, x'_{l-1}, u_l) V_{k-1, L-2}^*(x'_{1 \rightarrow L-2}) \right\}, \quad (11)$$

где

$$V_{k-1,L-2}^* = \max_{u_{L-1} \in U_{L-1}} \left\{ \sum_{x'_{L-1} \in X_{L-1}} p(x'_{L-1}/x_{L-1}, x'_{1 \rightarrow L-2}, u_{L-1}) V_{k-1,L-1}^*(x'_1, \dots, x'_{L-1}) \right\}. \quad (12)$$

Укажем на то, что компоненты удельной производительности  $\rho_l = f(x_l, u_l, \rho_{l-1})$  не зависят от ожидаемых состояний  $x'_{l+1 \rightarrow L} \in X_{l+1 \rightarrow L}$ , а

$$\sum_{x'_{1 \rightarrow L-2} \in X_{1 \rightarrow L-2}} \prod_{l=1}^{L-1} p(x'_l/x_l, x'_{1 \rightarrow L-2}, u_l) = 1. \quad (13)$$

Таким образом, аналогично равенству выражение (11) для локальной итерации стратегий для

$$V_k^*(x) = \max_{u_{1 \rightarrow l-1} \in U_{1 \rightarrow l-1}} \left\{ r_1(x_1, u_1) - \sum_{l=2}^{l-1} g_l(x_l, u_l) - \sum_{l=1}^{l-1} \lambda_l^g g_l(x_l, u_l) + \right. \\ \left. + \beta \sum_{x'_{1 \rightarrow l-1} \in X_{1 \rightarrow l-1}} \prod_{l=1}^{l-1} p(x'_l/x_l, x'_{l-1}, u_l) V_{k-1,l-1}^*(x'_{1 \rightarrow l-1}) \right\}, \quad (14)$$

где  $V_{k-1,l-1}^*(x'_{1 \rightarrow l-1})$  – результат локальной итерации стратегий на этапе  $l$  для всех ожидаемых состояний  $x'_{1 \rightarrow l-1} \in X_{1 \rightarrow l-1}$ , которые переданы от этапа  $l$  к этапу  $l-1$ , т. е.  $\{V_{k-1,l-1}^*(x'_1, \dots, x'_{l-1}) | \forall (x'_1, \dots, x'_{l-1})\}$ .

$$V_{k-1,l-1}^* = \max_{u_l \in U_l} \left\{ -g_l(x_l, u_l) - \lambda_l^g g_l(x_l, u_l) + \right. \\ \left. + \sum_{x'_l \in X_l} p(x'_l/x_l, x'_{1 \rightarrow l-1}, u_l) V_{k-1,l}^*(x'_1, \dots, x'_l) \right\}. \quad (15)$$

От этапа  $l$  к этапу  $l-1$  проектирования формируется решение

$$\{V_{k-1,l-1}^*(x'_1, \dots, x'_{l-1}) | \forall (x'_1, \dots, x'_{l-1})\}.$$

$$V_k^*(x) = \max_{u_1 \in U_1} \left\{ r_1(x_1, u_1) - \lambda_1^g g_1(x_1, u_1) + \beta \sum_{x'_1 \in X_1} p(x'_1/x_1, u_1) V_{k-1,1}^*(x'_1) \right\}, \quad (16)$$

где  $\theta_{L-1,1} = \{V_{k-1,1}^*(x'_1)\}$  и  $V_k^*(x)$  становятся входными переменными для локальной итерации стратегий этапа 1 на следующем шаге  $k+1$ .

Отметим, в результате декомпозиции процесса оптимизации значение целевой функции  $V_k^*$  будет сходиться к оптимальному  $V^*$  при  $k \rightarrow \infty$ .

Локальная итерация стратегий определяет оптимальные решения на каждом этапе, обеспечивающие максимальные значения функции удельной производительности ЕССОД, основываясь на локальных моделях их динамики [5].

На рисунке 4 представлена динамика изменения показателя удельной производительности ЕССОД в процессе выбора локально оптимальных решений при проектировании. Из результатов сравнительного анализа с существующими подходами к проектированию следует, что предлагаемая методика (поз. 1) позволяет достичь

для состояний  $\overline{1, L-1}$  справедливо условие нормировки по вероятности

$$\prod_{l=1}^{L-1} p(x'_l/x_l, x'_{1 \rightarrow L-2}, u_l) = 1. \quad (13)$$

всех состояний  $x'_{1 \rightarrow l} \in X_{1 \rightarrow l}$  функционала Беллмана имеет вид

$$\left. \begin{aligned} & r_1(x_1, u_1) - \sum_{l=2}^{l-1} g_l(x_l, u_l) - \sum_{l=1}^{l-1} \lambda_l^g g_l(x_l, u_l) + \\ & + \beta \sum_{x'_{1 \rightarrow l-1} \in X_{1 \rightarrow l-1}} \prod_{l=1}^{l-1} p(x'_l/x_l, x'_{l-1}, u_l) V_{k-1,l-1}^*(x'_{1 \rightarrow l-1}) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

Для каждого следующего состояния на предыдущих этапах  $(x'_1, \dots, x'_l)$  функционал динамического программирования Беллмана на этапе  $l$  вычисляется как

$$\text{Окончательно для локальной итерации стратегии этапа 1}$$

максимальной производительности уже на начальных этапах выбора решений по протоколам радиоинтерфейса общих каналов доступа, а последующий выбор параметров протоколов канального и сетевого уровней лишь подтверждает правильно выбранную стратегию поиска локально оптимальных решений.

Реализация предложенного многоуровневого согласования проектных решений при построении единой сети сбора и обработки данных АСУТП ЖКХ позволила устранить сложности вычислительного характера в выборе вариантов построения ЕССОД большой размерности. Однако получение глобально оптимального решения требует для проектировщиков ЕССОД знания полной априорной информации о динамике

работы сетевых протоколов и радиоканала обмена данными по всему пространству состояний и управлений.

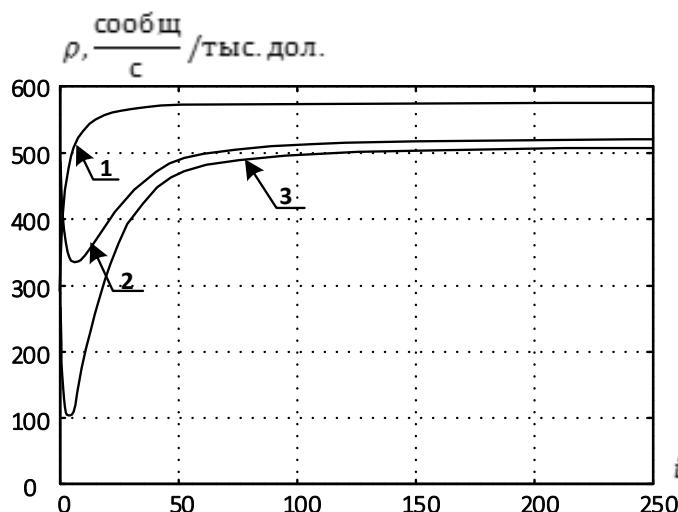


Рис. 4. Удельная производительность ЕССОД по итерациям поиска

**Вывод.** Основой для согласования проектных решений по каждому этапу построения систем сбора и обработки данных АСУТП, является многоуровневая марковская модель. В рамках оптимизации процессов принятия решений в многоуровневой структуре проектирования ЕССОД предложена аддитивная форма записи функционала Беллмана (6) для удельной производительности ЕССОД (1), позволяющая снизить размерность решения задачи обоснования проектных решений.

Декомпозиция предложенной формы записи функционала Беллмана позволила в дальнейшем развить подход, основанный на иерархической структуре моделей условно зависимых последовательных процессов принятия решений и обосновать вариант построения ЕССОД, обладающий потенциально высокой технико-экономической эффективностью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диспетчеризация объектов ЖКХ [электронный ресурс]. Систем. требования:

AdobeAcrobatReader. <http://i.consystems.ru/u/f6/12a1b6510911e3ba2112b5f3284aaa-/Диспетчеризация%20объектов%20ЖКХ.pdf>

2. Афонин С.И., Еременко В.Т., Кузьмина Л.В., Офицеров А.И., Плащенков Д.А. Методы решения задач распределения информационных потоков в сетях передачи данных предприятия на основе резервирования ресурсов // Информационные системы и технологии. 2012. №1. С. 78–84.

3. Илюхин А.А., Попов В.В. Многоуровневая марковская модель процессов информационного обмена в системе сбора и обработки данных автоматизированной системы управления жилищно-коммунального хозяйства региона // Информационные системы и технологии. 2016. №6. С. 70–77.

4. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. Радио, 1977. 488 с.

5. Жиров В.А., Поляков А.В. Управление передачей сообщений в системе с общим ресурсом // Системы связи: анализ, синтез, управление; Под ред. В.М. Терентьева. СПб.: Тема, 1999. С. 57–70.

Eremenko V.T., Il'yukhin A.A., Popov V.V.

## TECHNIQUE OF MULTI-LEVEL COORDINATION OF PROJECT DECISIONS IN CASE OF CREATION OF THE SINGLE NETWORK OF COLLECTION AND DATA HANDLING OF THE REGIONAL INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM OF HOUSING AND PUBLIC UTILITIES

*The technical and economic efficiency of networks of collection and data handling of automated process control systems is caused by serial decisions in the course of its design. In article the technique of multi-level coordination of project decisions in case of creation of a network of collection and data handling on the basis of model of multi-level Markov decision-making process with probable dynamics of statuses is offered. At the same time the possibility of decision-making at each stage taking into account the interlevel interactions co-ordinated within the decision of the global optimization task is provided.*

**Keywords:** network of collection and data handling, multiple model, Markov process, interlevel interaction, Bellman's functionality

**Ерёменко Владимир Тарасович**, доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности.  
Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева.  
Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 40, каб. 618.  
E-mail: wladimir@orel.ru

**Илюхин Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент.  
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации.  
Россия, 302020, г. Орел, Приборостроительная, 35.  
E-mail: ilyukhin.orel@mail.ru

**Попов Вячеслав Васильевич**, сотрудник.  
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации.  
Россия, 302020, г. Орел, Приборостроительная, 35.  
E-mail: ilyukhin.orel@mail.ru

## РАСЧЕТ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ РАЗНОМОДУЛЬНОГО НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО МАТЕРИАЛА ШАГОВЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ

[alekpetrakov@mail.ru](mailto:alekpetrakov@mail.ru)

*В работе выведены нелинейные дифференциальные уравнения для оболочек вращения из нелинейных разномодульных материалов. Упругие постоянные для материала определяются из шести условий, первые четыре из которых выражают равенство пределов прочности экспериментальной и аппроксимирующей диаграмм в растянутой и сжатой зонах при одноосном напряженном состоянии и двухосном равномерном растяжении и сжатии, пятое – равенство пределов прочности при сдвиге и последнее – равенство предельной деформации экспериментальной и аппроксимирующей диаграмм в сжатой зоне. Решение полученных нелинейных дифференциальных уравнений сведено при помощи модифицированного метода последовательных нагружений к решению линейных дифференциальных уравнений. Линейные дифференциальные уравнения решены с помощью матрицы дифференцирования. Получена матрица дифференцирования для неравномерного шага. Произведено сопоставление расчетов с разными матрицами дифференцирования и показана лучшая сходимость в случае применения матрицы дифференцирования с переменным шагом.*

**Ключевые слова:** оболочка вращения, нелинейный разномодульный материал, метод последовательных нагружений, матрица дифференцирования, неравномерный шаг.

Будем рассматривать упругую, однородную и изотропную среду. В.В. Новожиловым [1, 2, 3] показано, что если сплошная среда обладает упругим потенциалом, то последний является функцией трех инвариантов тензора деформаций

$$U = U(J_1, J_2, J_3); \quad (1)$$

$$U = (AJ_1^2 + BJ_2) + (C_1J_1^3 + C_2J_1J_2 + C_3J_3) + (D_1J_1^4 + D_2J_2J_1^2 + D_3J_1J_3 + D_4J_2^2) + \dots, \quad (2)$$

где A, B, Ci, Dj – физические константы, определяемые на основе экспериментальных данных.

Учитывая выражения в первых двух скобках получим форму упругого потенциала, предложенную Л. Бриллюэном [4] и развитую Р.Д. Мурнаганом [5].

Аппроксимация экспериментальных зависимостей кубической параболой, что соответствует

$$U = AJ_1^2 + BJ_2 + C_2J_1J_2 + C_3J_3 + D_2J_2J_1^2 + D_3J_1J_3 + D_4J_2^2. \quad (3)$$

Используя этот потенциал в работах [6] получена связь между компонентами тензора

где U – упругий потенциал напряжений, J1, J2, J3 – инварианты тензора деформаций.

Разложим упругий потенциал в ряд по целым степеням инвариантов тензора деформаций. В результате этого потенциал приводится к виду

членам в первых трех скобках в выражении (2), достаточно точно отражает результаты опытов и позволяет получить сравнительно простые зависимости между напряжениями и деформациями. Учитывая это, принимаем упругий потенциал в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = & \frac{2G}{1-\nu_0} \{ (\varepsilon_{11} + \nu_0 \varepsilon_{22}) + A_1 \left[ \frac{\varepsilon_{12}^2}{4} + \varepsilon_{11}^2 - (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \frac{1-\nu_0 + \nu_0^2}{3(1-\nu_0)^2} \right] + A_2 \left[ \frac{\varepsilon_{12}^2}{4} + \varepsilon_{11}^2 + (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \frac{\nu_0}{(1-\nu_0)^2} \right] + \\ & + B_1 \left[ 2\varepsilon_{11}(1-\nu_0 + \nu_0^2) - \varepsilon_{22}(1-4\nu_0 + \nu_0^2) \right] \left[ (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \frac{1-\nu_0 + \nu_0^2}{3} + (\varepsilon_{12}^2 - 4\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}) \right] + \\ & + B_2(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \left[ (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \frac{(1+\nu_0)^2}{(1-\nu_0)^2} + 3(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})\varepsilon_{11} + 1,5(\varepsilon_{12}^2 - 4\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}) \right] + \\ & + B_3(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \left[ (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})\varepsilon_{11} + (\varepsilon_{12}^2 - 4\varepsilon_{11}\varepsilon_{22})/2 - (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \frac{(1+\nu_0)^2}{9(1-\nu_0)^2} \right] \}; \end{aligned}$$

напряжений и тензора деформаций для нелинейно-упругого разносопротивляющегося материала для плосконапряженного состояния

$$\sigma_{12} = G\epsilon_{12}\{1 + (\epsilon_{11} + \epsilon_{22})\frac{A_1 + A_2}{1 - \nu_0} + (\epsilon_{12}^2 - 4\epsilon_{11}\epsilon_{22})/2 + \frac{(\epsilon_{11} + \epsilon_{22})^2}{1 - \nu_0}[3B_2 + B_1(1 - \nu_0 + \nu_0^2) + B_3]\}. \quad (3)$$

Здесь  $G$  – модуль сдвига,  $\nu_0$  – начальный коэффициент Пуассона,  $A1, A2, B1, B2, B3$ , – упругие постоянные которые определяются из шести условий, первые четыре из которых выражают равенство пределов прочности экспериментальной и аппроксимирующей диаграмм в растянутой и сжатой зонах при одноосном напряженном состоянии и двухосном равномерном растяжении и сжатии, пятое – равенство пределов прочности при сдвиге и последнее – равенство предельной деформации экспериментальной и аппроксимирующей диаграммы[7].

Рассмотрим сферическую оболочку для интегрирования нелинейной системы дифференци-

$$\begin{aligned} \Delta u c_{10} + \Delta u' c_{11} + \Delta u'' c_{12} + \Delta w d_{10} + \Delta w' d_{11} + \Delta w'' d_{12} + \Delta w''' d_{13} + \frac{q_x}{12\eta^2} &= 0; \\ \Delta u c_{20} + \Delta u' c_{21} + \Delta u'' c_{22} + \Delta u''' c_{23} + \Delta w d_{20} + \Delta w' d_{21} + \Delta w'' d_{22} + \Delta w''' d_{23} + \Delta w^{iv} d_{24} + \frac{q_z}{12\eta^2} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Процесс расчета сводится к решению системы линейных дифференциальных уравнений, коэффициенты которой, а также правые части зависят от шага нагрузки [6]. С помощью матрицы, дифференцирования от системы дифференциальных уравнений приходим к матичным выражениям.

Для одномерной задачи при делении оси на  $n$  участков формула численного дифференцирования может быть записана применительно к некоторой обобщенной функции  $w$ , в следующем виде

$$\begin{aligned} \{w'\}_{n+1} &= \{d_0\}_{n+1} w_0^+ + \{d_1\}_{n+1} w_0^- + [D^2]_{n+1,n+1} \{w\}_{n+1}; \\ \{w''\}_{n+1} &= \{d_0\}_{n+1} w_0^+ + \{d_1\}_{n+1} w_0^- + [D^3]_{n+1,n+1} \{w\}_{n+1}; \\ \{w^{iv}\}_{n+1} &= \{d_0\}_{n+1} w_0^{iv} + \{d_1\}_{n+1} w_0^+ + \{d_2\}_{n+1} w_0^- + [D^4]_{n+1,n+1} \{w\}_{n+1}; \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \{d_i\}_{n+1} &= [D]_{n+1,n+1} \{d_{i-1}\}_{n+1}; \\ [D^i]_{n+1,n+1} &= [D^{i-1}]_{n+1,n+1} [D]_{n+1,n+1} \quad (i = 1, \dots, 4). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &(c_{10} + c_{11}[D] + c_{12}[D^2])\{\Delta u\} + (c_{11}\{d_0\} + c_{12}\{d_1\})\Delta u_0^+ + c_{12}\{d_0\}\Delta u_0^- + \\ &+ (d_{10} + d_{11}[D] + d_{12}[D^2] + d_{13}[D^3])\{\Delta w\} + \\ &+ (d_{11}\{d_0\} + d_{12}\{d_1\} + d_{13}\{d_2\})\Delta w_0^+ + (d_{12}\{d_0\} + d_{13}\{d_1\})\Delta w_0^- + d_{13}\{d_0\}\Delta w_0^+ + \{q_x\}12\eta^2 = 0; \\ &(c_{20} + c_{21}[D] + c_{22}[D^2] + c_{23}[D^3])\{\Delta u\} + (c_{21}\{d_0\} + c_{22}\{d_1\} + c_{23}\{d_2\})\Delta u_0^+ + (c_{22}\{d_0\} + c_{23}\{d_1\})\Delta u_0^- + \\ &+ c_{23}\{d_0\}\Delta u_0^+ + (d_{20} + d_{21}[D] + d_{22}[D^2] + d_{23}[D^3] + d_{24}[D^4])\{\Delta w\} + \\ &+ (d_{21}\{d_0\} + d_{22}\{d_1\} + d_{23}\{d_2\} + d_{24}\{d_3\})\Delta w_0^+ + (d_{22}\{d_0\} + d_{23}\{d_1\} + d_{24}\{d_2\})\Delta w_0^- + \\ &+ (d_{23}\{d_0\} + d_{24}\{d_1\})\Delta w_0^+ + d_{24}\{d_0\}\Delta w_0^+ + \{q_z\}12\eta^2 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

К полученным  $2(n+1)$  уравнениям следует добавить граничные условия, записанные также в матричной форме.

Для шарнирно неподвижного края в  $n$  точке

альных уравнений применим метод последовательных нагружений. В.В. Петров [8] доказал, что уравнения метода последовательных нагружений представляют собой дифференциал Фреше исходных уравнений.

Так как нелинейными исходными уравнениями являются только физические уравнения (3) можно сразу лианализировать эти уравнения, про-дифференцировав по Фреше, и при выводе разре-шающих дифференцирующих уравнений пользо-ваться уже линейными относительно прираще-ний перемещений  $\Delta u$  и  $\Delta w$  уравнениями.

В результате приходим к линейным диффе-ренциальным уравнениям[6].

$$\begin{aligned} \{w'\}_n &= \{d_0\}_n w_0^+ + [D]_{n,n+1} \{w\}_{n+1}. \\ \{w\}_{n+1} &= \{d_0\}_{n+1} w_0^+ + [D]_{n,n+1} \{w\}_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь матрицы  $\{d\}_n$  и  $\{D\}_{n,n+1}$  аналогичны матрицам дифференцирования А.В. Александрова [9, 10].

В систему дифференциальных уравнений (4) входят производные до четвертой степени вклю-чительно. Из формулы (5) после простых преоб-разований получаем матричные выражения для высших производных.

$$\Delta u_n = 0; \Delta w_n = 0; \Delta M_1 = 0. \quad (9)$$

В случае защемленного края оболочки граничные условия в н точке будут

$$\Delta u_n = 0; \Delta w_n = 0; \{d_0\} \Delta w_0 + [D] \{\Delta w\} = 0. \quad (10)$$

Для замкнутой оболочки при  $n = 0$  получим

$$\Delta u_n = 0; \Delta w_0 = 0; \Delta w_0''' = 0. \quad (11)$$

Матрицу дифференцирования можно построить разными способами: с помощью сплайн-нов, или прибегнуть к аппроксимации функции и ее производной полиномами.

А.В. Александров вывел [9] матрицу дифференцирования  $\{d\}$  и  $\{D\}$  для равномерного шага.

$$Y_{(x)} = \frac{\prod_{k=0}^n (x - x_k)}{\prod_{k=0}^n (x_{-1} - x_k)} y_{-1} + \frac{\prod_{k=-1,1}^n (x - x_k)}{\prod_{k=-1,1}^n (x_0 - x_k)} y_0 + \dots + \frac{\prod_{k=-1}^{n-1} (x - x_k)}{\prod_{k=-1}^{n-1} (x_n - x_k)} y_n. \quad (12)$$

Продифференцируем выражение для  $Y(x)$

$$\frac{dY}{dx} = \frac{\prod_{k=0}^n (x - x_k) \sum_{k=0}^n \frac{1}{(x - x_k)}}{\prod_{k=0}^n (x_{-1} - x_k)} y_{-1} + \frac{\prod_{k=-1,1}^n (x - x_k) \sum_{k=-1,1}^n \frac{1}{(x - x_k)}}{\prod_{k=-1,1}^n (x_0 - x_k)} y_0 + \frac{\prod_{k=-1}^{n-1} (x - x_k) \sum_{k=-1}^{n-1} \frac{1}{(x - x_k)}}{\prod_{k=-1}^{n-1} (x_n - x_k)} y_n. \quad (13)$$

Для определения значения  $y_{-1}$  запишем производную  $Y'$  в точке  $x_0 = 0$  и приравниваем к  $y_0'$ .

$$\frac{y_{-1}}{\prod_{k=0}^n (x_{-1} - x_k)} = \frac{1}{\prod_{k=0}^n (-x_k)} y_0' - \frac{\prod_{k=-1,1}^n (-x_k) \sum_{k=-1,1}^n \frac{1}{(-x_k)}}{\prod_{k=-1,1}^n (x_0 - x_k) \prod_{k=0}^n (-x_k)} y_0 - \dots - \frac{\prod_{k=-1}^{n-1} (-x_k)}{\prod_{k=-1}^{n-1} (x_n - x_k) \prod_{k=0}^n (-x_k)} y_n. \quad (14)$$

После преобразований формула () принимает вид

$$\frac{y_{-1}}{\prod_{k=0}^n (x_{-1} - x_k)} = \frac{1}{\prod_{k=0}^n (-x_k)} y_0' - \frac{x_{-1} \sum_{k=-1,1}^n \frac{1}{(-x_k)}}{\prod_{k=-1,1}^n (x_0 - x_k)} y_0 - \frac{x_{-1}}{\prod_{k=-1,0,2}^n (x_1 - x_k) x_k} y_1 - \dots - \frac{x_{-1}}{\prod_{k=-1}^{n-1} (x_n - x_k) x_n} y_n. \quad (15)$$

Подставляя () в () получаем

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dx} &= \frac{\prod_{k=0}^n (x - x_k) \sum_{k=0}^n \frac{1}{(x - x_k)}}{\prod_{k=1}^n (-x_k)} y_0' + \left[ \frac{\prod_{k=-1,1}^n (x - x_k) \sum_{k=-1,1}^n \frac{1}{(x - x_k)} - \prod_{k=0}^n (x - x_k) \sum_{k=0}^n \frac{1}{(x - x_k)} x_{-1}}{\prod_{k=-1,1}^n (x_0 - x_k)} \right] y_0 + \\ &\dots + \left[ \frac{\prod_{k=-1}^{n-1} (x - x_k) \sum_{k=-1}^{n-1} \frac{1}{(x - x_k)} - \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_k) \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(x - x_k)} \frac{x_{-1}}{x_n}}{\prod_{k=-1}^{n-1} (x_0 - x_k)} \right] y_n. \end{aligned} \quad (16)$$

После простых преобразований получим

Однако рациональнее принять шаг неравномерным, выбирая его в зависимости от гладкости функций.

Для построения матрицы дифференцирования для неравномерного шага проводим параболу  $n+1$ -го порядка через точки  $y_0, y_1, \dots, y_n$  с заданной производной в точке 0  $y_0'$ . Искомая функция при этом аппроксимируется многочленом  $n$ -й степени  $Y(x)$ , удовлетворяющим условиям  $Y(x_k) = y_k$  в  $n+2$  точках интерполяции  $x_k$  ( $k = -1, 0, 1, \dots, n$ ). Неизвестное значение  $y$  в точке  $k = -1$  определяется через производную  $y_0'$  в точке  $k = 0$ .

Воспользуемся интерполяционной формулой Лагранжа [11]

$$\frac{dY}{dx} = \frac{\prod_{k=0}^n (x - x_k) \sum_{k=0}^n \frac{1}{(x - x_k)} y_0 + \prod_{k=1}^n (x - x_k) \left[ \sum_{k=1}^n \frac{x}{x - x_k} \left( \frac{1}{x} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{x_k} \right) + \sum_{k=1}^n \frac{1}{x_k} \right] y_0 + \prod_{k=1}^n (x_0 - x_k) + \prod_{k=0,2}^n (x - x_k) \left[ \sum_{k=0,2}^n \frac{x}{x - x_k} + 1 \right] y_1 + \dots + \prod_{k=0}^{n-1} (x - x_k) \left[ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{x}{x - x_k} + 1 \right] y_n}{\prod_{k=1}^n (-x_k)} \quad (17)$$

С помощью формулы (17) можно написать матричную формулу численного дифференцирования при переменном шаге разбиения

$$\begin{bmatrix} y_0' \\ y_1' \\ \vdots \\ y_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} y_0' + \begin{bmatrix} 0,0,\dots,0 \\ d_{10},d_{11},\dots,d_{1n} \\ \vdots \\ d_{n0},d_{n1},\dots,d_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}; \quad (18)$$

Или

$$\{y'\}_{n+1} = \{d\}_{n+1,1} y_0' + [D]_{n+1,n+1} \{y\}_{n+1}. \quad (19)$$

Где элементы вектора  $\{d\}$  и  $[D]$  вычисляются по формулам

$$d_i = \frac{\prod_{k=0; k \neq i}^n (x_i - x_k)}{\prod_{k=1}^n (-x_k)}; (i = 0, 1, \dots, n);$$

$$d_{ij} = \frac{x_i \prod_{k=0; k \neq i, k \neq j}^n (x_i - x_k)}{x_j \prod_{k=0; k \neq j}^n (x_j - x_k)}; (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; i \neq j);$$

$$d_{ii} = \frac{1}{x_i} + \sum_{o; o \neq i}^n \frac{1}{x_i - x_o}; (i = 1, 2, \dots, n);$$

$$d_{0j} = 0; (j = 0, 1, \dots, n); \quad (20)$$

$$d_{i0} = \frac{\prod_{k=0; k \neq i}^n (x_i - x_k) x_i}{\prod_{k=1}^n (x_0 - x_k)} \left( \frac{1}{x_i} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{x_k} \right); (i = 1, 2, \dots, n);$$

При равномерном шаге матрица дифференцирования получается такой же, как у А.В. Александрова [9].

Рассмотрим для сравнения три матрицы дифференцирования:

1. матрицу дифференцирования, полученную с помощью кубических сплайнов,

2. матрицу дифференцирования А.В. Александрова [9] для равномерного шага,

3. матрицу дифференцирования, полученную выше для неравномерного шага ( $n = 6$ ).

Результаты расчета замкнутой сферической оболочки с жестко защемленным опорным контуром под действием нормальной равномерно распределенной нагрузки ( $\eta = 100$ ,  $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ ) даны в таблице 1.

Значения сравниваются с точным решением, полученным И.С. Ахмедяновым [12. 13. 14. 15] (4 столбик таблицы).

Таблица 1

## Сравнение матриц дифференцирования

$\beta$	Методы решения						
	1	%	2	%	3	%	4
Изгибающие моменты							
12					- 0,00487	8	- 0,00448
15	- 0,03345	34	- 0,04617	8,7			
18					-0,12241	5,6	- 0,12968
20	-0,18679	0,9	- 0,18596	1,4			- 0,18853
24					-0,19537	2,1	- 0,19963
25	-0,15743	10,3	- 0,13114	8,1			- 0,14272
27					0,11287	4	0,10847
30	0,96670	0,1	0,96914	0,2	0,96991	0,2	0,96741
Поперечная сила							
12					-0,00565	12	- 0,00504
15	-0,01138	4,4	- 0,01079	1			- 0,10908
18					- 0,01529	3	- 0,01576
20	- 0,01995	27	- 0,01462	0,1			- 0,01461
24					0,01768	0,1	0,01769
25	0,03911	8,7	0,03710	3			0,03598
27					0,08792	0,1	0,08798
30	0,19690	0,5	0,19726	0,3	0,19690	0,02	0,19785

Из сравнения результатов видно, что наибольшую точность дает матрица дифференцирования с неравномерным шагом. Ошибка в этом случае в зоне краевого эффекта меньше 4 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Л.-М. Гостехиздат, 1948. 211 С.
- Новожилов В.В. О связи между напряжениями и деформациями в нелинейно-упругой среде // Прикладная математика и механика. 1951. Т. ХУ. Вып. 2. С. 183–194.
- Новожилов В.В. Теория упругости. Л., Судпромгиз, 1958. 370 С.
- Brillouin L. Les tenseurs en mécanique et en élasticité. Hfris: Vasson, 1938. 370 Н.
- Murnaghan F.D. Finite deformation of an elastic solid. New York: Wiley, 1951. 140 Н.
- Петраков А.А. Расчет сферических оболочек с учетом физической нелинейности // Нелинейные задачи сопротивления материалов и прикладной теории упругости. Вып. 118. М., МИСИ. 1974 С. 65–69.
- Петраков А.А. Определение характеристик нелинейно-упругих разносопротивляющихся материалов // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Москва, МГСУ, 2014 С. 256–259.
- Петров В.В. Метод последовательных
- нагружений в нелинейной теории пластиинок и оболочек. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 120 С.
- Александров А.В. Численное решение линейных дифференциальных уравнений при помощи матрицы дифференцирования // Тр. МИИТ, М.: Трансжелдориздат, 1961, вып. 131, С. 253– 266.
- Смирнов В.А. Численный метод решения некоторых краевых задач теории упругости для дифференциальных уравнений в частных производных // Исследования по теории сооружений. М.: Стройиздат, 1969. Вып. ХУП, С. 111–124.
- Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников. М.: Наука, 1974. 831 С.
- Ахмедъянов И.С. Об одном методе интегрирования уравнений изгиба сферической оболочки при осесимметричном нагружении // Изв. вузов. Авиационная техника. 1962. № 3. С. 62–70.
- Ахмедъянов И.С. К расчету тонких сферических оболочек при осесимметричном нагружении // Тр. КуАИ, 1963, вып. ХУП, С. 117–130.
- Ахмедъянов И.С. Интегрирование неоднородных уравнений осесимметричного изгиба сферической оболочки // Известия вузов. Авиационная техника. 1966. № 4. С. 36–40.
- Ахмедъянов И.С., Хазанов Х.С. Расчет сферических оболочек при осесимметричном нагружении. Куйбышев: Изд-во Куйбышевского авиационного института, 1967, 83 С.

**Petrakov A.A.****THE CALCULATION OF SPHERICAL SHELLS OF BIMODULUS NONLINEAR ELASTIC MATERIAL OF STEPPER METHOD USING THE MATRIX DIFFERENTIATION**

*The paper presents nonlinear differential equations for shells of revolution of bimodulus nonlinear materials. Elastic constants for a material are determined from the six conditions, the first four of which Express the equality of strength of experimental and approximating diagrams in stretched and compressed zones under uniaxial stress and biaxial uniform tension and compression, the fifth equality of strength at the shift and the last equality is the limit of the deformation of experimental and approximating graphs in the compressed area. The solution of the resulting nonlinear differential equations is reduced by using the modified method of successive loadings to the solution of linear differential equations. Linear differential equations are solved using the matrix differentiation. The resulting matrix of differentiation for an uneven step. Made a comparison of calculations using different matrices of differentiation and shows the best convergence in case of the use of matrix differentiation with nonuniform step.*

**Keywords:** shell of revolution, the bimodulus nonlinear material, the method of successive loading, matrix differentiation, nonuniform step.

---

**Петраков Александр Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики.

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Адрес: Россия, Москва, Ярославское ш., д. 26.

E-mail: alekpetrakov@mail.ru

*Горлов А.С., канд. техн. наук, доц.,  
Порхало В.А., канд. техн. наук, доц.,  
Горлов К.А., магистрант*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТИРАНИЯ ЧАСТИЦ\*

**belgoras@mail.ru**

*В статье рассмотрен механизм истирания частиц твердого материала. Представлены физическая и математическая модели, определяющие изменение массы частиц различной формы в процессе истирания. На установке по визуализации и изучению процесса истирания частиц различной формы проведены экспериментальные исследования. Приведены полученные по результатам экспериментальных исследований значения по истираемости мела, который находит наиболее широкое применение в производстве строительных материалов. Установлено, что создание физической и математической моделей, которые описывают процесс истирания частиц с разными физико-механическими характеристиками, способствует организации и управлению указанными процессами, протекающими в различных аппаратах измельчения материалов.*

**Ключевые слова:** истирание частиц, физическая модель, экспериментальная установка.

**Введение.** Важной характеристикой аппаратов измельчения материалов является время пребывания частиц материала в аппарате в процессе обработки. Механизмы разрушения зависят от размеров частиц исходного материала и от организации технологического процесса измельчения [5]. Материалы с разными физико-механическими свойствами необходимо измельчать на аппаратах, в которых реализуются различные механизмы измельчения, при которых можно достичь минимальных энергозатрат. Для материалов, отличающихся большой твердостью, более эффективными являются удар и раздавливание, для хрупких – раскалывание, для материалов вязких предпочтительнее истирание.

Во многих аппаратах одним из механизмов разрушения является механизм истирания. От организации процесса истирания зависит время пребывания частиц твердой фазы в камерах измельчения, энергетические затраты.

Описание процесса истирания частиц является сложной задачей. Для этого необходимы эмпирические и экспериментальные данные для материалов с различными физико-механическими свойствами.

Уравнение, описывающее изменение массы частицы в процессе истирания, может иметь вид:

$$\frac{dm_p}{dt} = k_m \beta(K, m_{p0}, S_{tp}, V) \quad (1)$$

где  $m_p$  – переменная масса частицы;  $k_m$  – коэффициент трения частицы о плоскость (кинетический);  $\beta$  – функция, зависящая от значения приложенных к частице сил, под действием которых проходит процесс истирания;  $K$  – коэффициент,

зависящий от морфологической структуры истираемого материала;  $m_{p0}$  – начальная масса частицы;  $S_{tp}$  – площадь трения;  $V$  – скорость частицы.

Коэффициент трения частицы зависит от физико-механических характеристик истираемых частиц и материала, из которого выполнена поверхность истирания. Закон изменения массы частиц в процессе истирания определяется физико-механическими характеристиками материала, кристаллической структурой, силами взаимодействия на микроуровне, а также силами, действующими на частицу.

Механизм возникновения трения объясняет молекулярно-механическая теория трения, в разработку которой внесли большой вклад российские и зарубежные ученые. В соответствии с этой теорией трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Силу трения можно представить как сумму молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих. Молекулярная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных связей, которые возникают между контактирующими телами в процессе истирания. Механическая составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому смещению в контактирующем слое истираемого материала. Поведение материала при истирании определяется глубиной распространения пластической деформации внутри образца. С ростом нормального давления в области контакта развиваются сначала упругие, а затем пластические деформации. Процесс истирания материала в аппарате необходимо организовать технологически таким образом, чтобы в процессе истирания преодолеть силы между частицами в образце.

Схема физической модели, определяющая процесс истирания частиц, представлена на (рис. 1).

Частица движется поступательно по поверхности под действием сил с некоторой скоростью  $v_u$ . На частицу действует удельная нагрузка  $P$ , которая зависит в одних случаях от физико-механических свойств истираемого материала, в других – от свойств истирающей поверхности. В результате действия силы трения, превосходящей силы взаимодействия между слоями материала, происходит отделение материала от частицы (уменьшение массы частицы).

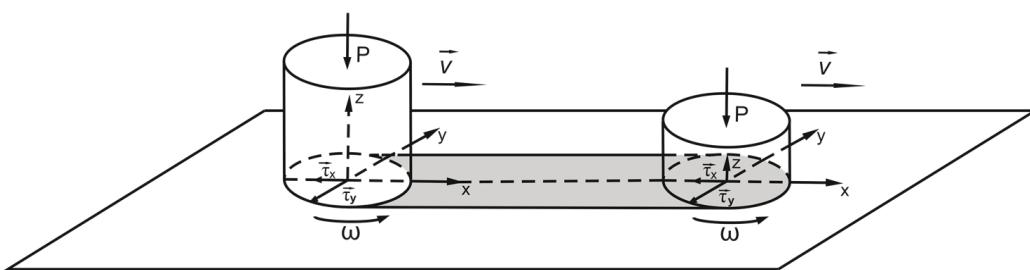


Рис. 1. Схема процесса истирания при поступательно-вращательном движении материала

Сила трения, действующая на поверхности частицы в области контакта, определяется по формуле

$$\mathbf{F} = \int_s d\mathbf{F} = F_x e_1 + F_y e_2, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь контакта материала.

Момент действия сил на элементарной площадке

$$dM = -|\mathbf{r} \times d\mathbf{F}| = -r_x dF_y + r_y dF_x, \quad (4)$$

В результате поступательно-вращательного движения цилиндра, действия момента сил в плоскости контакта поверхности появляются касательные напряжения, величины которых равны

$$\tau_x = \frac{dF_x}{ds}, \quad \tau_y = \frac{dF_y}{ds}. \quad (5)$$

Рассмотрим пограничный слой на поверхности частицы толщиной  $\delta$ , в котором происходит разрушение материала, его отслаивание под действием сил трения.

Деформации сдвига, возникающие в области контакта, приводят к отслоению (разрушению) материала. Процесс отслоения (истирания) материала имеет сложную физическую природу. Значение нагрузки, под действием которой начинается отслоение (истирание), зависит от многих факторов: от силы, приложенной к образцу, от его физико-механических свойств, от морфологической структуры материала, от скорости дви-

жения по поверхности и т.д. Расчетная схема контакта цилиндрического тела с истирающей поверхностью представлена на (рис. 2).

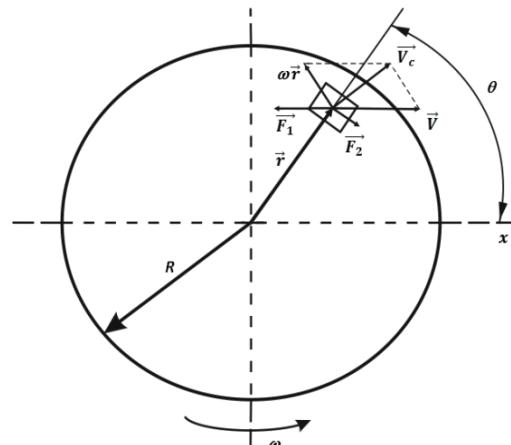


Рис. 2. Расчетная схема процесса истирания

Будем полагать, что сила трения скольжения, действующая на выделенную элементарную площадку, удовлетворяет закону Кулона, по которому имеем

$$dF = -f_c \sigma(P) \frac{V_c}{|V_c|} ds \quad (6)$$

Для плоского круглого диска напряжение в точке контакта определяется в виде:

$$\sigma(r) = \frac{P}{2\pi R^2 \sqrt{1-r^2}},$$

где  $\sigma(r)$  – нормальное напряжение в точке контакта, Н/м;  $P$  – сила прижимающая цилиндр к плоскости движения, Н,  $f_c$  – коэффициент трения образца о плоскость [7].

На выделенной площадке действует сила трения, которая имеет две составляющие: одна возникает в результате линейного движения, вторая в результате вращения частицы по поверхности контакта. Рассмотрим пограничный слой на поверхности частицы толщиной  $\delta$ , в котором происходит разрушение материала, его отслаивание под действием сил трения. Относительное смещение слоев материала при наличии взаимного притяжения и адгезии сопровождается деформацией сдвига, что вследствие неидеальной упругости материала требует дополнительных затрат энергии. Разумеется, большую тангенциальную силу надо приложить, если связь между телами нарушается не по месту контакта, а на некоторой глубине от поверхности контакта. Материал в ходе истирания формирует на мезоуровне диссипативные структуры, способные осуществлять пластическую деформацию по схеме «сдвиг-поворот». В результате действия силы трения, которая превосходит силы взаимодействия между слоями материала, происходит истирание (уменьшение массы) частицы.

Если в результате движения частицы под действием сил происходит отделение материала в зоне контакта, тогда за частицей остается след из материала, форма которого зависит от формы истираемой частицы [1]. Объем материала, расположенного в следе, определяется следующим образом:

$$V_p = Sh, \quad (7)$$

где  $S$  – площадь следа в области контакта;  $h$  – толщина следа, зависящая от физико-механических характеристик материала, сил, приложенных к частице; свойств поверхности контакта, а также скорости движения частицы.

С другой стороны, происходит постоянное уменьшение объема самой частицы на некоторую величину, которая определяется следующим образом:

в случае частицы кубической формы:

$$V_p = S_{\text{тр}} dl, \quad (8)$$

а в случае, если частица имеет шарообразную форму:

$$V_p = \frac{1}{6} \pi dl^3 + \frac{1}{2} \pi dl r_1^2, \quad (9)$$

где  $dl$  – величина линейного истирания;  $r_1$  – радиус круга контакта частицы с поверхностью истирания.

Если частица имеет кубическую форму, то площадь трения представляет собой квадрат, в

случае если частица не вращается на поверхности истирания. Радиус круга контакта шарообразной частицы с поверхностью истирания в процессе движения такой частицы по абразивной поверхности постоянно изменяется.

Время, в течение которого истирается частица (кубик с основанием  $a$ ), можно определить по формуле:

$$t_1 = \frac{m_p}{\rho_p a v_u h}, \quad (10)$$

где  $\rho_p$  – плотность частицы;  $v_u$  – скорость движения частицы.

Для сферической частицы равного объема, при одинаковых условиях истирания, время будет определяться по формуле:

$$t_2 = \frac{m_p}{\rho_p v_u h} \frac{1}{R}, \quad (11)$$

где  $R$  – радиус частицы.

Радиус частицы выражается через сторону куба равного объема:

$$R = a \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}}. \quad (12)$$

Изменение массы прямо пропорционально силе  $P$  нормального давления между поверхностями труящихся тел. Отношение величины истирания частицы к интервалу времени, в течение которого оно возникло, или к пути, на котором происходило истирание, представляет собой соответственно скорость истирания и интенсивность истирания. Истираемость частицы определяется по формуле

$$I = \frac{m_{p0} - m_{p1}}{S_{\text{тр}}}, \quad (13)$$

где  $m_{p1}$  – конечная масса частицы.

Для проведения экспериментальных исследований процесса истирания частиц различной формы, с разными физико-механическими характеристиками разработана установка по визуализации и изучению указанного процесса, схема которой показана на (рис. 3).

Алгоритм проведения экспериментальных исследований на представленной установке следующий. В обойму вставляются образцы частиц (кубики, шарики, цилиндры) материала. На поверхность вращающегося диска прикрепляется слой абразивного материала различной дисперсности. На установке определяют нагрузку на частицу, при которой начинается процесс истирания. Зафиксировав среднее время истирания при установленном режиме и площадь следа, определяют толщину материала в следе. Массу частиц взвешивают после прохождения равных расстояний по поверхности истирания.

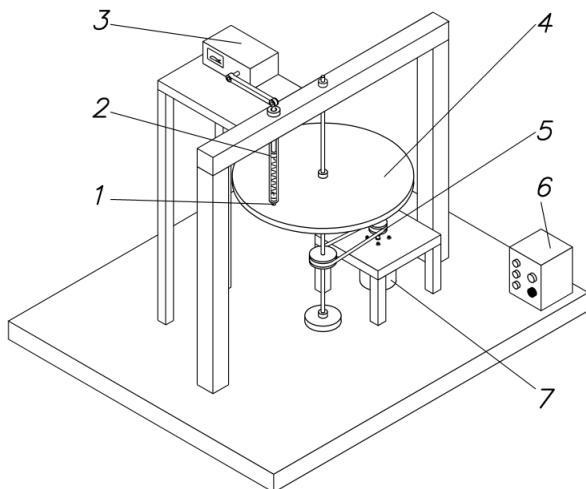


Рис. 3. Схема установки для испытания на истирание частиц материала:

1 – обойма с частицами материала; 2 – трубка с демпферным механизмом; 3 – блок управления давлением на обойму и ее вращением; 4 – вращающийся диск; 5 – ременная передача; 6 – блок управления частотой вращения вала электродвигателя; 7 – электродвигатель

При больших скоростях истирания необходимо учитывать температурный режим в области контакта, который влияет на процесс истирания. Контакты, образующиеся и разрушающиеся в процессе истирания, вызывают искажения в поверхностном слое и являются причиной выделения тепла. При нагревании материала происходит изменение его физико-механических свойств в области контакта, что приводит к изменению характера связей, силы трения и интенсивности истирания.

Закон изменения массы частицы может иметь вид: линейной, степенной или экспоненциальной зависимости [11].

В результате проведения экспериментальных исследований были получены значения по истираемости мела – 0,6–1,0 г/см<sup>2</sup>. Мел относится к жестким полускальным породам. Его прочность зависит от влажности. Временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии может изменяться от 1000 до 4500 кН/м<sup>2</sup>. Сухой мел имеет модуль упругости от 3000 МПА (для рыхлого) до 10000 МПА (для плотного) и ведет себя как упругое тело. Угол внутреннего трения мела равен 22°–32°, сцепление в условиях всестороннего сжатия достигает 700–750 кН/м<sup>2</sup>.

При увлажнении прочность мела начинает снижаться уже при влажности 1–2 %, а при влажности 25–35 % прочность на сжатие увеличивается в 2–3 раза, при этом появляются пластичные свойства. Проявление вязкопластических

свойств мела с увеличением его влажности приводит к осложнению в технологии переработки.

Проведенные эксперименты по истиранию частиц одинаковой массы показали, что время, затраченное на истирание сферической частицы, в 1,4–1,7 раз больше, чем время истирания кубической частицы. Следует отметить, что при различных скоростях движения и вращения истираемого материала экспериментальные зависимости коэффициента трения от нагрузки, и температуры могут вести себя по-разному (линейно возрастать, убывать, и т.д.).

Таким образом, можно сделать вывод, что создание модели, описывающей процессы истирания частиц с разными физико-механическими характеристиками, поможет организовать управление процессом истирания в аппаратах измельчения, в которых реализован этот процесс в стадиях измельчения.

\*Исследования проводятся для выполнения ПНИЭР по соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0193 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме: «Разработка роботизированного комплекса для реализации полномасштабных аддитивных технологий инновационных материалов, композитов, конструкций и сооружений».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Горлов А.С. Исследование процесса истирания частиц твердой фазы в камере измельчения вихре-акустического диспергатора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №5. С. 179–183.
- Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. 640 с.
- Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.И. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1995. 560 с.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. 204 с.
- Мизонов В.Е. Некоторые закономерности селективного измельчения // Теоретические основы химической технологии. 1984. Т. 18. № 3. С. 410–411.
- Журавлев В.Ф. О модели сухого рения в задаче качения твердых тел // ПММ. 1998. Т. 62. Вып. 5. С. 762–767.
- Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980.
- Киреенков А.А. Связанные модели трения скольжения и качения // Докл. РАН. 2008. Т. 419. №6. С. 759–762.

9. Карапетян А. В. Двухпараметрическая модель трения // ПММ. 2009. Т. 73. Вып.4. С. 515–519.
10. Киреенков А.А. О движении однородного вращающегося диска по плоскости в условиях комбинированного трения // Изв. РАН, МТТ. 2002. №1. С. 60–67.
11. Горлов А.С., Губарев А.В., Некрасова Ю. С., Горлов К. А. Моделирование процесса истирания частиц твердых материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. г. Орел. №1 (231). 2017. С. 30–34.

---

**Gorlov A.S., Porhalo V.A., Gorlov K.A.**

**MATHEMATIC MODELING OF THE PROCESS OF ABRASION OF THE SOLID PARTICLES**

*In the article there was described the abrasion mechanism of the particles of solid material. There were presented physical and mathematical models, determinating the mass variation of the particles of various shapes during abrasion process. Using the device on rendering and on investigation of the abrasion process of the particles of various shapes there was held the experimental research. There were given the abrasion values of chalk, which find most wide application in production of building materials. There was found, that the creation of physical and mathematical models, describing the abrasion process of the particles with different physical-mechanical characteristics promotes the organization manage processes, which take place in the devices for the grinding of materials.*

**Keywords:** abrasion of particles, physical model, mathematical model.

---

**Горлов Александр Семенович**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail:belgoras@mail.ru

**Порхало Василий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail:Porhalo@mail.ru

**Горлов Кирилл Александрович**, магистрант кафедры технической кибернетики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гольцов Ю.А., ст. преп.,  
Кижсук А.С., канд. техн. наук, доц.,  
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ\*

umin@mail.ru

Исследуются динамические режимы и бифуркации в импульсной системе управления нагревательной установкой, состояние которой описывается дифференциальными уравнениями с разрывными правыми частями. Показано, что рассматриваемая система может демонстрировать чрезвычайно большое многообразие нелинейных явлений и бифуркационных переходов, таких как, квазипериодичность, мультистабильное поведение, хаотизация колебаний через классический каскад бифуркаций удвоения периода и бифуркации граничного столкновения.

**Ключевые слова:** нагревательная установка, тепловой объект, теплопроводность, тигель, дробный порядок, закон управления, полевой транзистор, широтно-импульсная модуляция, бифуркация.

**Введение.** Технология выращивания моноцисталлов представляет собой процесс управляемой кристаллизации, при котором качество растущего кристалла определяется точностью управления условиями фазовых переходов [1]. При выращивании кристалла синтетического сапфира необходимо обеспечить закон изменения температуры в тигле от 25 °C до 2050 °C с определённой степенью наращивания и спада температуры, что предполагает применение автоматической системы управления с возможностью программного задания изменения температуры в тигле с заданной точностью.

Теплотехнический объект, нагревательная установка, состоит из следующих зон: внутреннего печного пространства 1, заполненного воздухом или газом; никромового электронагревателя 2, равномерно распределённого во внутреннем слое футеровки 3, состоящей из магнезитового кирпича и внешнего слоя футеровки 4 из минеральной ваты в цилиндрическом стакане из оцинкованной стали (рис. 1). Геометрическая форма печи – ограниченный цилиндр, сверху и снизу которого располагается футеровка.

Для решения задачи синтеза закона управления классическим методом аппроксимации с использованием свободно распространяемой библиотеки FOMCON по экспериментальной кривой разгона теплового объекта определена передаточная функция нагревательной установки следующего вида:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент передачи объекта,  $T_1, T_2$  – постоянные времени объекта [2, 3].

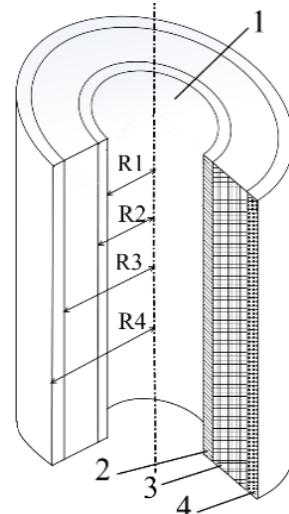


Рис. 1. Нагревательная установка

Используемые в настоящее время регуляторы температуры с тиристорными преобразователями существенно искажают форму кривой тока, потребляемого из сети, приводя к возникновению в питающей сети несинусоидальных режимов.

Для устранения указанных недостатков на базе патента авторов [4] разработана и реализована система управления нагревателем высокой мощности, построенная на основе высокочастотного преобразователя электрической энергии с широтно-импульсным регулированием. Повышение энергетических показателей с упрощением управления технологическим объектом достигается за счет использования в качестве ключевых элементов преобразователя полевых тран-

зисторов с применением дробных законов управления широтно-импульсной модуляцией, улучшающих качество системы [5–7].

Однако в нелинейных импульсных системах при вариации параметров объекта управления, а также воздействии внешних возмущений возможно возникновение сложных нелинейных явлений, включая колебания на пониженных частотах, кратных частоте модуляции, квазипериодические и хаотические режимы [8, 9].

Следствием этого является многократное увеличение амплитуды колебаний температуры нагревательной установки, снижение точности регулирование и нарушение хода технологического процесса.

Целью данной работы является численное исследование бифуркационных явлений в динамике импульсной системы управления нагревательной установкой.

## 1. Постановка и аналитическое решение задачи

Уравнение движения системы управления нагревательной установкой, непрерывная линейная которой описывается передаточной функцией (1), имеет вид

$$T_1 T_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dx}{dt} + x = K \varphi(\varepsilon), \quad (2)$$

где  $x$  – температура в нагревательной установке;  $\varepsilon$ ,  $\varphi(\varepsilon)$  – сигналы на входе и выходе широтно-импульсного модулятора, соответственно;  $K$  – коэффициент передачи непрерывной линейной части системы;  $T_1$ ,  $T_2$  – постоянные времена.

Введем  $x = x_1$ ,  $\frac{dx}{dt} = x_2$  и перепишем уравнение движения (2) в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{1}{T_1 T_2} x_1 - \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} x_2 + \frac{K}{T_1 T_2} \varphi(\varepsilon). \end{aligned} \quad (3)$$

Выходной сигнал модулятора  $\varphi(\varepsilon)$

$$\varphi(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & k \cdot T_0 < t < k \cdot T_0 + \tau_k; \\ 0, & k \cdot T_0 + \tau_k < t < (k+1) \cdot T_0; \end{cases} \quad (4)$$

$$k \in N;$$

где  $T_0$  – период модуляции,  $\tau_k$  – ширина импульса, определяемая видом импульсной модуляции. В работе рассматривается система с широтно-импульсной модуляцией первого рода (ШИМ-1) и пропорциональным корректирующим звеном в цепи обратной связи. Тогда входной сигнал модулятора определяется выражением

$$\varepsilon = \alpha(V_{ref} - \beta x_1(kT_0)).$$

Здесь  $V_{ref}$  – сигнал задания температуры нагревательной установки,  $\beta$  – коэффициент передачи датчика температуры,  $\alpha$  – коэффициент усиления.

При ШИМ-1 величина  $\tau_k$  находится как:

$$\tau_k = \begin{cases} 0, & \varepsilon < 0; \\ T_0, & \varepsilon > V_s; \\ \frac{T_0 \varepsilon}{V_s}, & 0 \leq \varepsilon \leq V_s, \end{cases} .$$

где  $V_s$  – опорный сигнал модулятора.

Введем обозначения

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1 T_2} & -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T_1 T_2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения движения (3) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= A \cdot X + B \cdot \varphi(\varepsilon); \\ \frac{dX}{dt} &= \begin{cases} A \cdot X + B, & \text{если } \varepsilon > 0, \\ A \cdot X, & \text{если } \varepsilon < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Исследование динамической системы (6) можно свести к изучению свойств двумерного кусочно-гладкого отображения:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= F(X_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, X_k = X(kT_0), \\ F(X_k) &= \exp(AT_0)[X_k + D] - \exp(A(T_0 - \tau_k))D, \\ D &= A^{-1}B. \end{aligned}$$

Здесь ширина импульса  $\tau_k$  согласно (5) определяется

$$\tau_k = \begin{cases} 0, & \varepsilon_k < 0; \\ T_0, & \varepsilon_k > V_s; \\ \frac{T_0 \varepsilon_k}{V_s}, & 0 \leq \varepsilon_k \leq V_s, \end{cases} . \quad \varepsilon_k = \alpha(V_{ref} - CX_k),$$

где  $C = (\beta, 0)$  – матрица - строка.

В исследованиях были выбраны следующие значения параметров модели:

$T_1 T_2 = 10240 \text{ c}^2$ ;  $T_1 + T_2 = 352 \text{ с}$ ;  $T_0 = 10 \text{ с}$ ;  $K = 327.8 \text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;  $U_0 = 24 \text{ В}$  – напряжение питания;  $\beta = 0.01 \text{ В}/^{\circ}\text{C}$ ;  $V_s = 5 \text{ В}$ ;  $\alpha > 0$ ;  $V_{ref} = 5 \text{ В}$ .

Период  $T$  периодического движения динамической системы (6) в общем случае является кратным периоду внешнего воздействия  $T_0$ :  $T = mT_0$ ,  $m = 1, 2, \dots$ . Движение с таким периодом будем называть  $m$ -циклом или циклом периода  $m$ .

## 2. Бифуркационный анализ

При проведении бифуркационного анализа в качестве варьируемых параметров были выбраны напряжение питания  $U_0$  и коэффициент

усиления  $\alpha$ . На рис. 2 приведены однопараметрические бифуркационные диаграммы, рассчитанные для разных значений  $U_0$  при изменении коэффициента усиления  $\alpha$ .

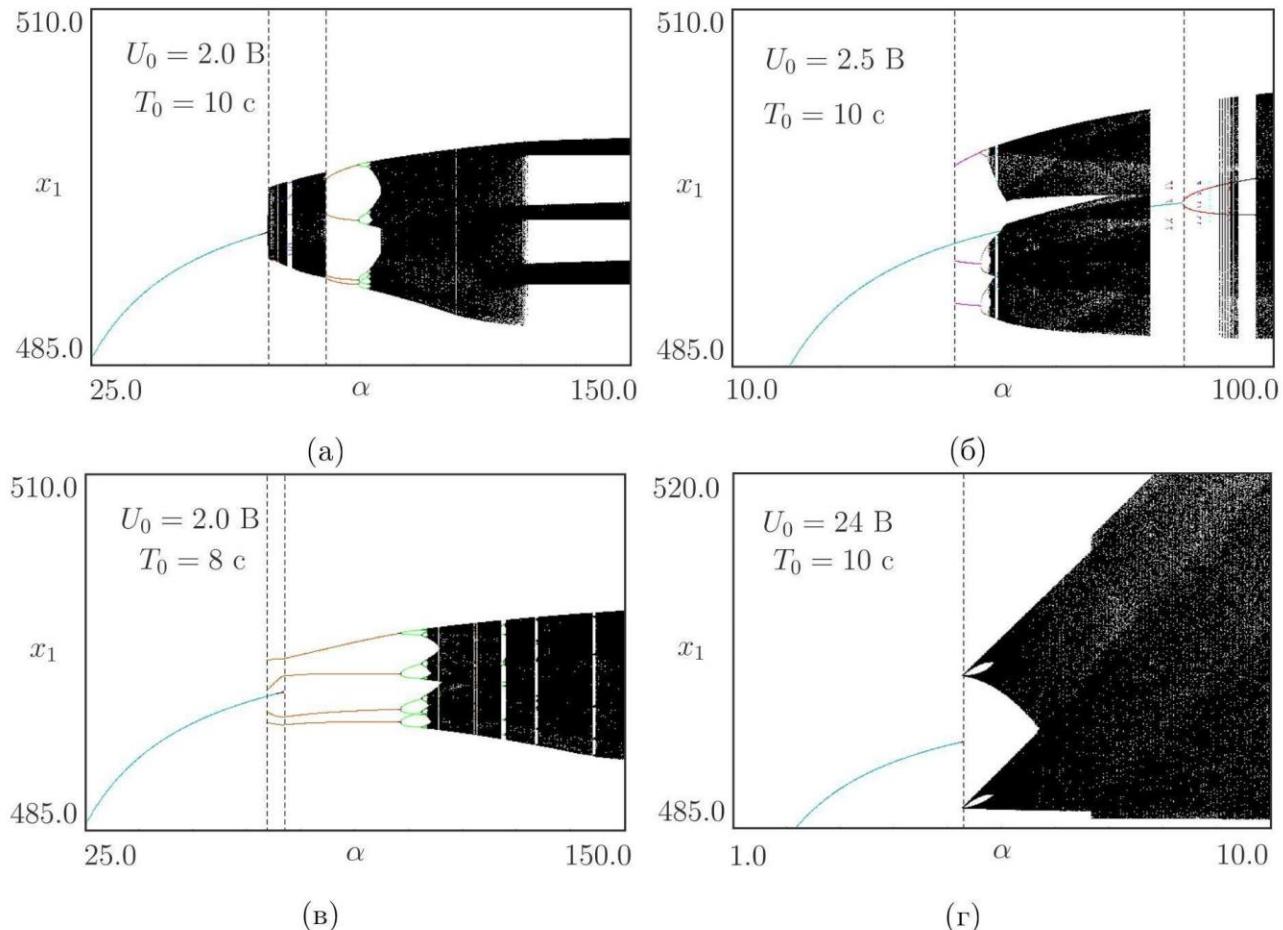


Рис. 2. Бифуркационные диаграммы при различных параметрах  $U_0$  и  $T_0$ ,  $V_s = 5$  В,  $V_{ref} = 5$  В (соответствует уставке 500 °C)

При малых значениях  $U_0$  система демонстрирует квазипериодическое поведение с ярко выраженной мультистабильностью. На рис. 2, а изображена бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая рождение замкнутой инвариантной кривой, отвечающей двухчастотному квазипериодическому режиму. Как следует из рис. 2, а, при увеличении коэффициента усиления  $\alpha$  1 – цикл теряет устойчивость через бифуркацию Неймарка – Саккера. Потеря устойчивости приводит к возникновению устойчивой замкнутой инвариантной кривой, при этом 1 – цикл продолжает существовать, но становится неустойчивым фокусом. Как известно, характер движения на замкнутой инвариантной кривой определяется числом вращения, когда оно иррационально, точки отображения плотно заполняют инвариантную кривую и динамика становится квазипериодической.

При рациональном числе вращения на инвариантной кривой имеется четное число периодических орбит, половина из которых устойчивые, а половина – седловые, а сама инвариантная кривая образована замыканием неустойчивых многообразий седловых циклов. На рис. 2, а окно с периодической динамикой отвечает области устойчивости резонансного 4 – цикла (области существования замкнутой инвариантной кривой с числом вращения 1:4). При увеличении  $\alpha$  резонансный 4 – цикл претерпевает каскад бифуркаций удвоения периода, завершающийся хаотизацией колебаний, при этом замкнутая инвариантная кривая разрушается. Численные эксперименты показали, что с увеличением  $U_0$  область устойчивости 1 – цикла уменьшается.

Бифуркационная диаграмма, изображенная на рис. 2, б, иллюстрирует типичный сценарий

рождения существующих аттракторов. При изменении коэффициента усиления  $\alpha$  жестко возникает устойчивый 3 – цикл. При дальнейшем увеличении  $\alpha$  реализуется бесконечный каскад бифуркаций удвоения периода, завершающийся хаотизацией колебаний. По этой причине в широком диапазоне изменения параметров наряду с устойчивым 1 – циклом существуют либо устойчивые периодические колебания, либо хаотические режимы. То есть в зависимости от начальных условий может устанавливаться или периодическое, или хаотическое движение.

На рис. 2, в показан случай субкритического учетверения периода 1 – цикла через так называемую бифуркацию граничного столкновения («border - collision bifurcation», см., например, [8–15]). На рис. 2, г представлен пример рождения 4-х полосного хаотического аттрактора (four-band chaotic attractor) через border-collision flip bifurcation [8, 15].

**Заключение.** В статье представлены результаты бифуркационного анализа широтно-импульсной системы управления нагревательной установкой.

Выявлено, что при малых значениях напряжения питания системы демонстрирует квазипериодическое поведение с ярко выраженной мультистабильностью [11], но при этом система имеет достаточно большой запас устойчивости по коэффициенту усиления.

Однако, при увеличении напряжения питания область устойчивости 1 – цикла (рабочего режима) сужается, и потеря устойчивости происходит через бифуркацию граничного столкновения, приводящая к внезапной хаотизации колебаний.

\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

*Авторы выражают благодарность проф. Жусубалиеву Ж.Т. за обсуждение результатов исследований и полезные комментарии.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974. 540 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
3. Fractional-order Modeling and Control. [Электронный ресурс]. URL: <http://fomcon.net/> (дата обращения: 20.07.2017).
4. Пат. № 2612311 Российской Федерации, МПК G05D 23/22. Устройство регулирования температуры электронагрева / Гольцов Ю. А., Жусубалиев Ж. Т., Кижук А. С., Коленченко В., Рубанов В. Г., заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г.Шухова. – № 2016113209, заявл. 06.04.2016, опубл. 06.03.2017. Бюл. № 7. 5 с.
5. Gol'tsov Yu.A., Kizhuk A.S., Rubanov V.G. Control of high power thermal object in the class of fractional order regulators // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Т. 8. №.4. С. 24790–24800.
6. Рубанов В.Г., Кижук А.С, Гольцов Ю.А., Караков Е.Б. Реализация алгоритма аппроксимации дробного интегродифференцирования с оценкой ошибки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 148–151.
7. Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Микропроцессорная система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №11. С. 42–49.
8. Мощный полевой транзистор IRF3205. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: [www.irf.com](http://www.irf.com) (дата обращения: 20.07.2017).
9. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. Singapore: World Scientific, 2003. pp: 363.
10. Banerjee S., Verghese G.C. Nonlinear Phenomena in Power Electronics. New York, USA: IEEE Press, 2001.
11. Bernardo Di.M., Feigin M. I., Hogan S. J., Homer M. E. Local Analysis of C -bifurcations in n-dimensional Piecewise-Smooth Dynamical Systems // Chaos, Solitons and Fractals. 1999. 10(1). Pp. 1881–1908.
12. Nusse H.E., Yorke J. A. Border-Collision Bifurcations Including “Period Two to Period Three” for Piecewise Smooth Systems // Physica D. 1992. 57. Pp. 39–57.
13. Banerjee S., Ranjan P., Grebogi C. Bifurcations in Two-Dimensional Piecewise Smooth Maps – Theory and Applications in Switching Circuits // IEEE Trans. Circ. Syst. I. 2000. 47(5). Pp. 633–643.
14. Zhusubaliyev Zh.T., Soukhoterin E.A., Mosekilde E. Border-Collision Bifurcations and Chaotic Oscillations in a Piecewise-Smooth Dynamical System // Int. J. Bifurcation Chaos. 2001. 11(12). Pp. 1193–1231.
15. Bernardo Di.M., Budd C.J., Champneys A.R., Kowalczyk P. Piecewise-smooth Dynamical Systems: Theory and Applications, in: Applied Mathematical Sciences. Springer. 2008. Vol. 163. Pp. 483.
16. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Multistability and Hidden Attractors in a Multilevel DC/DC Converter // Mathematics and Computers in Simulation.

---

Goltsov Yu.A., Kizhuk A.S., Rubanov V.G.

**NONLINEAR EFFECTS IN THE PULSE-WIDTH CONTROL SYSTEM  
FOR THERMOTECNICAL OBJECT**

*This article introduces the research of dynamic modes and bifurcations in the pulse control system for heating unit, which state is described by differential equations with discontinuous right-hand sides. It is shown that the system can represent extremely high diversity of nonlinear effects and bifurcation transitions, such as quasi-periodicity, multistable behavior, chaotization of oscillations through the classic cascade of period doubling bifurcations and border-collision bifurcations.*

**Keywords:** heating unit, thermal object, the thermal conductivity, the crucible, approximation, fractional order, control law, a field-effect transistor, pulse-width modulation, bifurcation.

---

**Гольцов Юрий Александрович**, старший преподаватель кафедры технической кибернетики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: umin@mail.ru

**Кижук Александр Степанович**, кандидат технических наук, профессор кафедры технической кибернетики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail:kizhuka@mail.ru

**Рубанов Василий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики.

Адрес: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

# ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI: 10.12737/article\_59a93b10888436.47603507

Слабинская И.А., д-р экон. наук, проф.,  
Ткаченко Ю.А., канд. экон. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ПРОЦЕДУРЫ ВНУТРЕННЕГО КОНТРОЛЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

tkach\_y@mail.ru

Продукция строительной отрасли достаточно разнообразна и является фундаментальной базой для функционирования других экономических субъектов. Производство строительного продукта – уникальный и продолжительный в аспекте реализации проект. Поэтому одной из важных процедур в строительных работах является внешний и внутренний контроль качества. В свою очередь, система внутреннего контроля в строительной отрасли должна обеспечиваться постоянным фактором действия. Данная система позволяет на ранних стадиях выявить риски, устранить отклонения и обеспечить успешную реализацию проекта в дальнейшем.

**Ключевые слова:** внутренний контроль, строительный продукт, контрольные процедуры.

**Введение.** Система контроля, в настоящее время, является основной составляющей современного строительства. Внешний контроль качества строительства с каждым годом усиливается. Отметим, что области внешнего контроля дополняется и авторским контролем. Авторский контроль осуществляется проектной организацией, которая разработала проект. И для успешного функционирования строительной компании фундаментальным является сбалансированная действенная система внутреннего контроля.

Для проверки соответствия проекту производства строительных работ организуется постоянный внутренний контроль на всех этапах возведения объекта.

Внутренний контроль выполняется персоналом компании, производящим строительный продукт (строительно-монтажные работы, проектные изыскания). Внутренний контроль – это функция не только управленческого, но и технического персонала строительной фирмы [1]. Как отмечает большинство авторов, система внутреннего контроля подразумевает программу действий, предписывающую в ультимативной или рекомендательной форме использовать определенные методы исследования объектов контроля, а также последовательность и процедуру применения [2]. На наш взгляд, в строительной отрасли исполнение контрольных процедур системы внутреннего контроля должно носить исключительно ультимативную форму исполнения, ввиду строгого соответствия СНиП.

Компетентно организованные контрольные процедуры должны служить определенной основой для планирования и выполнения показателей системы контроля в строительстве.

В настоящее время применение системной контрольной работы в строительных компаниях достаточно значимо и обеспечивает минимизацию будущих рисков. Задачей контрольных процедур модуля внутреннего контроля является исследование не только прошедших событий, но и выявление ожидаемых последствий. Минимизация расходов и ликвидация рисков – основополагающее направление системы внутреннего контроля в строительной отрасли.

**Методология.** Внутренний контроль качества строительных работ, в отличие от других промышленных отраслей, носит разноплановый и всеобъемлющий характер. Принято различать следующие стадии внутреннего контроля в строительстве:

1. Входной контроль. Входной контроль включает: контроль проектной документации, контроль применяемых материалов и изделий, контроль вынесенной в натуре геодезической разбивочной основы.
2. Операционный контроль.
3. Геодезический контроль.
4. Приемочный контроль.
5. Лабораторный контроль.
6. Контроль соответствия нормативной базе.

Создание соответствующей системы контроля и ее эффективное функционирование в строительных компаниях требует формирования качественного учетно-аналитического обеспечения. Действующий механизм подготовки, отбора и систематизации информации о расходах в строительной отрасли отходит от требований, предъявляемых к ней в современных условиях, что показывают результаты проведенного исследования. Причинами этого являются:

1. Обработка одних и тех же данных на различных уровнях менеджмента;
2. Расхождения одного и того же массива информации;
3. Малосодержательность показателей и расчетных значений;
4. Отсутствие сопоставимости показателей, сформированных различными отделами или службами;
5. Сложность и нестабильность учетных потоков;
6. Длительный процесс обработки информации;
7. Отсутствие информации для принятия мгновенных управленческих решений высшим менеджментом [3, 15].

Также, следует отметить многообразие форм документации, представляющих одну и ту же информацию, громоздкость и слабую информативность внутренних отчетов, представление однообразной информации в различных измерителях, отсутствие действенных эффективных средств контроля для качества оповещения.

Можно сделать вывод об отсутствии цельного подхода к содержанию требований и запросов к информации, определению ее состава, а также к составу её показателей и содержательности.

При создании архитектуры внутреннего контроля необходима оптимизация всей системы учетных источников и документооборота в строительной компании.

Имеется ввиду, что необходимая для контрольных процедур, информация подготавливается с нужной степенью точности и поступала различным пользователям своевременно [4, 13].

Важное значение, должна иметь информация о каких-либо отклонениях от заданных параметров в заранее сформированных бизнес-процессах.

Такая информация предполагает разработку необходимых влияний менеджмента в целях устранения возможных последствий нежелательных аномалий [3, 14].

При формировании учетно-аналитического обеспечения контроля расходов в соответствии с особенностями строительного производства, проверка затрат должна быть организована по направлениям, необходимым для эффективного контроля, а именно в разрезе бизнес-процессов, видов работ, статей сметных расходов.

Потому что, именно, процессный вариант ориентирован на выявление результатов деятельности строительной компании в пунктах возникновения расходов.

Формирование информации по бизнес-процессам и видам произведенных работ с выдачей

отчетов позволит обеспечить прозрачность информации о расходах, что образует эффективный контроль [8, 12].

Одной наиболее часто применяемой процедурой внутреннего контроля является оценка абсолютных и относительных изменений отдельных статей сметных затрат, содержащихся в детальных счетах по учету затрат на возведение объекта.

Практика показывает, что наиболее распространенной ошибкой являются арифметические ошибки в подсчетах и при заполнении учетных регистров, а также при переносе данных из одних учетных регистров в другие регистры и формы отчетности.

Анализируя структуру стоимости объекта строительства, появляется возможность выявления допущенной ошибки, необоснованного завышения затрат на строительство по тем или иным сметным статьям затрат, а также отклонений от показателей заданного проекта [5].

Средства внутреннего контроля стоимости строительного объекта в сметно-статейном разрезе начинаются с выявления отклонений фактических расходов от сметных показателей по каждой статье расходов.

Показатели отчета о стоимости строительно-монтажных работ показывают, как осуществлялось задание по статьям. Отклонения по сметным статьям затрат могут быть как положительными, так и отрицательными [6]. Положительные отклонения удостоверяют о рациональном использовании ресурсов строительной компанией, а отрицательные - о превышении фактически произведенных затрат над установленными показателями.

Процедуры внутреннего контроля стоимости строительных работ следует осуществлять по выявлению отдельных факторов, действовавших на отклонение величины отдельной статьи расходов от базового показателя. Следует учитывать имеющие место субъективные факторы.

**Основная часть.** Совершенствованию системы внутреннего контроля строительной компании способствует применение процедуры контрольных обмеров. Контрольный обмер представляет собой установление фактического объема выполненных строительных работ, качества и количества фактически использованных материалов и инструментов.

Контрольные обмеры проводятся визуально, для осуществления которых используется специальные измерительные приборы с применением расчётных методик. Перед проведением контрольных обмеров выполненных строительных работ сотрудниками службы внутреннего контроля проводится изучение рабочих чертежей

строительного объекта, определение этапов выполненных работ и фактически возведенных конструкций, на которые следует обратить внимание при проведении процедуры контрольных обмеров.

Допускается проведение контрольных обмеров одновременно по нескольким строительным объектам (однозначно, где обнаружен перерасход в стоимости материалов или услуг).

С помощью контрольных обмеров в строительстве вскрываются следующие виды нарушений и злоупотреблений:

1. Фактическое исполнение некоторых видов работ или выполненное с отклонением от проекта строительства.

2. Незаконченный характер обосабленных стадий строительных работ, особенно если они уже приняты по акту как исполненные.

3. Выполнение работ в объёме меньшем, чем это указано в смете или акте приёмки строительно-монтажных работ.

4. Одновременное включение в сметы и акты приёмки строительно-монтажных работ этапов, по которым не предусмотрена раздельная оплата.

5. Включение в сметы и акты приёмки строительно-монтажных работ ранее оплаченных работ, двойная оплата работ или оплата специального оборудования, цена которого уже включена в стоимость строительных работ.

6. Удорожание стоимости различных материалов, повышение качества строительных работ в акте приёмки относительно проектно-сметной документации.

7. Завышение расхода (перерасход) строительных материалов по сравнению с проектно-сметной документацией.

8. Использование завышенных цен и строительных коэффициентов, не соответствующих фактическим условиям, времени года и характеру работ.

9. Расчет стоимости строительно-монтажных работ, выполненных в прошлом году, по ценам текущего года.

Система внутреннего контроля строительных компаний должен учитывать основные особенности строительного производства:

1. В строительстве продукция неподвижна и используется только там, где она создана, в пространстве перемещаются строительный персонал и орудия труда. Эта особенность строительства обуславливает определенную форму управления, требует правильного размещения строительных фирм, чтобы свести к минимуму потери времени и затраты на переход персонала и техники с одной строительной площадки на другую;

2. Процесс изготовления продукции строительства занимает продолжительный период времени и, следовательно, на долгое время вовлекает рабочую силу и средства производства в строительный цикл;

3. Строительное производство связано со многими отраслями экономики. От одних отраслей оно получает сырье, материалы и оборудование для изготовления строительной продукции. С другими отраслями оно связано тем, что осуществляет работы на заказ по заданиям организаций-заказчиков.

Учитывая эти особенности при формировании эффективной системы внутреннего контроля строительной компании результат внедренной системы должен обеспечить:

1. Достоверную информацию, необходимую для мобильного и успешного менеджмента;

2. Сохранность активов и документов, предотвращение фактов хищения материальных ресурсов, порчи и нецелевого использования имущества, уничтожения или разглашения информации [9, 10];

3. Исключение посредством контрольных процедур дублирования, непроизводительных затрат, нерационального использования всех видов ресурсов;

4. Оптимизация налоговых уплат;

5. Соблюдение принципов сметного задания;

6. Обеспечение соблюдения технологии выполнения и качества строительно-монтажных работ;

7. Формирование реальной договорной цены на строительный объект;

8. Обеспечение надежной системы бухгалтерского учета;

9. Соответствие предписанным принципам – неукоснительное исполнение сотрудниками установленных внутриfirmенных стандартов [7, 11].

**Выводы.** Система внутреннего контроля в строительной компании является важнейшим элементом проверки качества строительных работ, реальным оружием повышения ответственности, сохранности и эффективного использования ресурсов. В современных условиях, одной из самых существенных задач системы внутреннего контроля должно быть углубление работы по управлению качеством и стоимостью строительного продукта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурцев В.В. Организация системы внутреннего контроля коммерческой организации. М.: Экзамен, 2000. 320 с.

2. Соколов Б.Н. Внутренний контроль в коммерческой организации (организация, методики, практика). М.: Альянс Пресс, 2006. 132 с.
3. Слабинская И.А., Ткаченко Ю.А. Формирование системы внутреннего контроля российских компаний в условиях мирового экономического кризиса // Белгородский экономический вестник. 2009. № 2 (54). С. 58–67.
4. Слабинский Д.В. Способы выявления мошенничества и их диагностика // Белгородский экономический вестник. 2010. №2 (58). С. 71–74.
5. Ткаченко Ю.А., Сухорученко Е.А. Специализированные подразделения системы внутреннего контроля // Белгородский экономический вестник. 2014. № 1 (73). С. 108–111.
6. Ткаченко Ю.А. Документирование внутреннего контроля // Белгородский экономический вестник. 2014. № 4 (76). С. 192–202.
7. Чижова Л.П., Слабинская И.А., Ткаченко Ю.А. Учет расходов на содержание службы внутреннего контроля // Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. 2015. № 3. С. 64–67.
8. Тупикин П.Н., Ткаченко Ю.А., Бюджетирование в обеспечении экономической безопасности предприятия // Белгородский экономический вестник. 2016. № 1 (81). С. 141–146.
9. Ткаченко Ю.А., Курило Е.В. Проблемы обеспечения экономической безопасности хозяйствующего субъекта // Белгородский экономический вестник. 2016. № 3 (83). С. 62–66.
10. Бурцев В.В. Организация системы внутреннего контроля коммерческой организации. М.: Экзамен, 2000. 320 с.
11. Соколов Б.Н. Внутренний контроль в коммерческой организации (организация, методики, практика). М.: Альянс Пресс, 2006. 132 с.
12. Slabinskaya I.A., Tkachenko Y.A., Benderskaya O.B., Slabinskiy D.V. Internal controls organization: a methodology approach // World Applied Sciences Journal. T. 30. №10. Pp. 1205–1207.
13. Irina A. Slabinskaya, Iuliia A. Tkachenko, Denis V. Slabinskiy and Aleksandr A. Mitrokhin, Approaches to the Performance of Economic Agent Internal Control // International Business Management. 2015. 9. Pp. 1136–1140.
14. Ткаченко Ю.А. Применение метода лайдетекции в частном бизнесе // Белгородский экономический вестник. 2010. №1. С. 34–40
15. Шестакова Е.В. Планирование процесса внутреннего контроля // Планово-экономический отдел. 2016. №11. С. 18–27

---

**Slabinskaya I.A., Tkachenko Y.A**

### **PROCEDURES OF INTERNAL CONTROL IN THE CONSTRUCTION**

*Products of a construction industry are rather various and are fundamental base for functioning of other economic actors. Production of a construction product – the unique and long project in aspect of implementation. Therefore one of important procedures in construction works is external and internal control of quality. In turn, the internal control system in a construction industry shall be provided with a constant factor of action. This system allows to reveal risks at early stages, to eliminate deviations and to provide successful project implementation further.*

**Keywords:** internal control, construction product, control procedures

---

**Ткаченко Юлия Александровна**, кандидат экономических наук, доцент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: tkach\_y@mail.ru

**Слабинская Ирина Александровна**, доктор экономических наук, профессор

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

## СТРАТЕГИЯ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ НОВОГО ТОВАРА В МАРКЕТИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

gukova@bsu.edu.ru

*В статье представлены результаты исследования в области разработки стратегия и реализации концепции нового товара в маркетинговой деятельности предприятия, рассматриваются обстоятельства необходимости новой продукции для устойчивого экономического развития фирм. В работе обоснована необходимость эффективного долгосрочного планирования новой продукции, целенаправленного поиска идей нового товара, основные условия коммерческого успеха новых товаров.*

**Ключевые слова:** стратегия, проектирование продукции, маркетинг, новый товар.

**Введение.** В условиях постоянно меняющихся запросов покупателей, технологий и конкурентного окружения выживание компании напрямую зависит от того, насколько успешно она разрабатывает и внедряет на рынок новые товары. Однако и после того, как новый товар окажется на рынке, он не может быть предоставлен сам себе. Необходимо применять к нему правильные маркетинговые стратегии по мере того, как он проходит стадии своего жизненного цикла: рождение, рост, зрелость и постепенное вытеснение с рынка товарами, лучше удовлетворяющими потребительские нужды. Важным является вопрос уровня уникальности товара. Согласно многочисленным исследованиям только 10 % всех новых товаров являются по-настоящему новыми, оригинальными и называются товарами мировой величины. Разработка таких товаров, организация их производства и вывод на рынок требуют больших затрат и сопряжены с повышенным риском [1]. Поэтому зачастую компании предполагают совершенствовать и модифицировать существующие товары [2]. Главная задача разработчика [3] – это заинтересовать потребителя уникальностью и неповторимостью товара в отличии от других конкурентов.

**Методология.** Значительный вклад в развитие и изучения методологии выведения нового товара как конечного продукта технологии на рынок внесли отечественные и зарубежные ученые-экономисты Ф. Котлер, Г. Г. Паничкина, Е. И. Мазилкина, Л. Роджерс, А.Ф. Барышев, В.Е. Ланкин, Дж. Виртерс, К. Випперман, В. И. Беляев, В. Д. Маркова, К. И. Терехин, Г. Я. Гольдштейн и др.

**Основная часть.** Для решения вопроса, каким должен быть новый товар: стандартным (индивидуальным к рынку), дифференцированным (в зависимости от рынка), универсальным (сочетающим оба признака), необходимо, прежде

всего, изучить природу товара и требования потенциальных покупателей и их мотивацию к покупке данного продукта. Наиболее выигрышный вариант – максимально стандартизованный, востребованный товар с оригинальными элементами, отражающими специфические требования рынка. В международном бизнесе считается целесообразным выпускать не одно изделие, а достаточно широкий параметрический ряд (product line – продуктовая линия). Очень привлекательно создать унифицированный продукт для всех рынков. Это обеспечивает ряд несомненных преимуществ, а именно:

- значительную экономию средств за счет увеличения объемов производства;
- упрощения контроля за движением запасов и организацией технического обслуживания;
- возможность разработки стандартных программ маркетинга;
- обеспечения быстрой окупаемости инвестиций.

Однако индивидуализация конструкций и размеров подобных по назначению изделий приводит к уменьшению серийности производства, распыление средств на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Поэтому необходимым становится выполнение исследований для определения оптимального параметрического ряда и ассортимента продукции.

Новые товары, с позиции маркетинга, можно классифицировать следующим образом:

- товар, не имеющий аналогов на рынке;
- оригинальный итог принципиально новых открытий и изобретений, являющихся следствием качественных прорывов в науке;
- товар, который имеет весомое качественное усовершенствование по отношению к товарам-аналогам, имеющимся на рынке;
- товар, который уже был на рынке, после этого усовершенствован так, что его свойства

принципиально не изменились (телевизоры на батарейках);  
 · товар рыночной новизны, т. е. новый только для определенного рынка;  
 · старый товар, успешно наведший себе новую сферу применения [4].

Изготовление и сбыт новых товаров требуют больших затрат, поэтому важной задачей маркетинга является выбор таких идей, реализация которых даст надлежащий выигрыш фирме. Внедрение нового товара - риск, поэтому нужно быть готовым к тому, что рынок отвергнет созданный товар, и иметь наготове другое изделие и его маркетинговую программу. Риск, связанный с новаторством, велик, но столь же велики и связанные с ним материальные выгоды [1].

Необходимость новой продукции для устойчивого экономического развития фирм связывают со следующими обстоятельствами:

1) новая продукция помогает стабилизировать сбыт и расходы в течение года, что особенно важно для компаний с сезонным характером производства;

2) новые изделия обеспечивают фирме большую прибыль и повышают эффективность маркетинговых программ;

3) фирма получает инструмент оперативного реагирования на меняющиеся демографические характеристики потребителей и изменения в стиле жизни

Таким образом возникает необходимость тщательной разработки стратегии выведения на рынок нового продукта, которая включает девять основных этапов [6] представленных на рис.1.



Рис. 1. Стратегия разработки и выведения на рынок нового продукта

Процесс выборки новых товаров включает в себя, прежде всего, генерирование идеи, которые возникают в исследовательских лабораториях и конструкторских бюро на основании опроса потребителей, наблюдение за отношением потребителей к подобным товарам на выставках или ярмарках, отчетов и предложений торговых агентов, исследований недостатков производимой продукции, изучение тенденций в конструкторской деятельности конкурирующих фирм, анализа информации поставщиков и патентной информации, изучения мнений экспертов по технике и технологии, оценки преимуществ и недостатков собственной продукции и т.п. В процессе разработки идеи товара необходимо руководствоваться требованиями гаммы наибольшей безопасности, экономической целесообразности и полного соответствия изделия условиям окружающей среды.

Целенаправленный поиск идей нового товара базируется на использовании общих методов научно-технической деятельности и: прогностических, логистических, инверсий и комбинирования. К самым распространенным методам

прогностики относят фактографические и экспертные методы. Фактографические методы предусматривают использование количественной информации о фактах и явлениях, наблюдавшихся ранее. Фактографическая информация может быть зафиксирована на любых носителях. Все идеи новых товаров подлежат предварительной селекции при аналитическом исследовании, предусматривает оценивание среды, потенциальных потребностей и конкуренции. На этапе предварительного анализа возможностей производства и сбыта выясняется совместимость идеи товара с текущей производственно-сбытовой деятельностью предприятия, то есть связь нового товара с точки зрения технологии и принципов сбыта с выпускаемой продукцией. Анализируется достаточность производственных мощностей, материальных и трудовых ресурсов для освоения товара. Следует также оценить емкость рынка, трудности проникновения на него, остроту конкуренции, возможность использования старых каналов сбыта или организации новых и т. п.

С этой целью при анализе факторов экономической целесообразности выпуска новой продукции учитываются:

- прогнозы спроса (соотношение объемов продаж и цен; темпы роста сбыта;
- сезонность; интенсивность каналов сбыта);
- прогнозы расходов (общие и относительные издержки, использование существующих мощностей и ресурсов, соотношение начальных и текущих расходов, оценка будущих расходов материально-технических ресурсов;
- конкуренция (потенциальные конкуренты; показатели доли компании и ее конкурентов на рынке;
- слабые и сильные стороны конкурентов;
- стратегия конкурентов;
- необходимые инвестиции (инжиниринг, патентный поиск, разработка продукции, испытания);
- доходность (при покрытии первоначальных затрат, прогнозный прибыль, контроль за ценами, риск).

Все это в совокупности делает принятие решения о целесообразности выпуска нового товара.

На этапе проектирования товара проектируют сам товар, его параметры, дизайн, упаковку, определяют название или марку товара, изготавливают опытные образцы. Как правило, исходным документом для проектирования продукции является техническое задание (ТЗ) с технико-экономическими требованиями к продукции, определяющие ее потребительские свойства и эффективность использования. Иногда этот документ могут заменить договор, заявка, договор, протокол и т.п. Исполнитель с учетом требований ТТЗ и соответствующих стандартов разрабатывает техническую документацию. Уточнение требований осуществляется посредством предварительной конструкторской оценки и анализа различных вариантов изделия. Эскизный проект разрабатывается с целью определения принципиальных (конструктивных, схемных) решений изделия, дающих общее представление о принципах действия и построения. Этот документ предшествует техническому у проекта или рабочей конструкторской документации.

Имеющиеся в техническом проекте инженерные решения дают уже исчерпывающее представление о конструкции изделия. При необходимости проект может предусматривать разработку нескольких вариантов изделия и его составных частей. В этом случае выбор оптимального варианта осуществляется по результатам испытаний опытных образцов изделия. После рассмотрения

и утверждения технический проект используется для разработки конструкторской и иной рабочей документации. Согласно действующей в национальной экономике классификации рабочей документацией считают конструкторскую, технологическую, эксплуатационную и ремонтную. Испытания опытных образцов происходит сначала на стендах производителя, затем в реальных условиях эксплуатации потребителем. Как правило, под испытанием понимают экспериментальное определение количественных и качественных характеристик объекта и их изменений в результате влияния реальных условий эксплуатации. На основании полученных данных осуществляется доработка товара.

На этом этапе развития производства и сбыта разрабатывается детальный план производства нового товара. Исследуются источники снабжения материалами, компонентами, оборудованием, осуществляется запуск товаров в производство. Параллельно разрабатываются мероприятия по продажам – от рекламы до организации технического обслуживания.

Все этапы планирования новой продукции необходимо осуществлять как можно быстрее, поскольку можно потерять свою долю рынка в результате действий конкурентов. Сокращение сроков освоения повышает конкурентоспособность фирм. Понятно, что затраты на новый товар должны окупиться еще до того, как прекратится спрос на него из-за появления на рынке новых, более совершенных конкурирующих изделий.

Основными условиями коммерческого успеха новых товаров можно считать:

- 1) ориентирование на потребности рынка, наличие достаточной и своевременной информации относительно тенденций рыночного спроса;
- 2) активное взаимодействие между подразделениями научно-исследовательских и конструкторских работ и службой маркетинга;
- 3) наличие долгосрочных планов, четко определенных целей у предприятия;
- 4) возможность предусмотреть ситуацию в долгосрочной перспективе;
- 5) рациональная организационная структура, мощный исследовательский и сбытовой потенциал, достаточное финансирование проектных работ;
- 6) эффективное координирование взаимодействия людей, участвующих в разработке нового товара, наличие лидера, стимулирования творческой активности.

В это время фирма создает потенциальные варианты, получает представление потребителей о них, оценивает их, устраняет наименее привле-

кательные, разрабатывает опытные образцы продукции, испытывает их и внедряет на рынке [7, с. 200].

Широкие параметрические ряды помогают гибко реагировать на переход товара из одной стадии жизненного цикла к другой. На стадиях внедрения товара на рынок и спада объемов продаж целесообразно реализовывать только безусловно «ходовые» модели, на стадии роста - расширять набор, на стадии зрелости и насыщения - дать полный набор изделий всего параметрического ряда. От того как именно будет происходить процесс разработке стратегии вывода нового товара на рынок будет зависеть и весь жизненный цикл товара. В теории маркетинга жизненный цикл товара – это период времени, в течение которого товар обращается на рынке, начиная от момента выхода его на рынок и заканчивая его уходом с рынка [8]. Жизненный цикл описывается изменением показателей объема продаж и прибыли по времени и состоит из следующих стадий: начало продаж (внедрение на рынок), рост, зрелость (насыщение) и спад [9].

Большое внимание в товарной политике фирмы уделяют дизайну. С его помощью обеспечивается комфортность пользования изделием. Последнее достигается предоставлением товара выразительности, гармонично-целостной формы и других признаков, которые максимально соответствуют условиям его использования по назначению. Дизайн создает фирменный стиль, что очень важно сейчас, когда технология, стоимость производства и обслуживания многих изделий почти одинаковые.

При разработке стратегии тщательно рассматриваются также элементы внешней среды: конкуренция, институциональные факторы, правовая система (особенно для экспортной продукции). По каждому из этих элементов оцениваются функциональные аспекты товара, дизайн, название, марка, упаковка. Такой анализ особенно необходим в начале разработки нового товара, так как уровень затрат, связанных с эксплуатацией изделия, на 80 % определяется характеристика начального этапа проектирования. На стадии рабочего проектирования и изготовления опытного образца конструктор имеет возможность повлиять уже только на 15 % общих расходов, а когда изделие передается в серийное производство, эти возможности сокращаются до 55 %.

**Выводы.** Создание новой продукции – это главная составляющая инновационной деятельности предприятия. В общей теории управления [10–15] понятие «инновация» связывается с разработкой новых товаров и услуг, более полезных, чем существующие. Инновационный потенциал

прежде всего проявляется в способности предприятий производить научноемкую продукцию, отвечающую требованиям рынка. Конечным результатом продуктов инновации является новый продукт, созданный на основании патентной или иной временной монополии предприятия. Технологическая инновация улучшает качество продукта, создает его новую модификацию.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Бебрис А.О., Решетко Н.И. Формирование механизмов развития предпринимательских структур в условиях конкуренции // Вестник Университета (Государственный университет управления). 2011. № 17. С. 113–118.
2. Жидкова О.Н., Ефимова А.И. Стратегия разработки и реализация концепции нового товара в маркетинговой деятельности предприятия // Молодой ученый. 2014. №6.2. С. 17–18.
3. Соколов М.А., Кущёва А.Г. Разработка нового товара как рыночная стратегия фирмы // Молодой ученый. 2014. № 6.2. С. 63–65.
4. Каменева Н.А. Инновационная активность как фактор обеспечения конкурентоспособности российской экономики // Проблемы современной экономики. 2011. № 4. С. 19–21.
5. Зайкина К.А., Насретдинова Э.С. Стратегия ценообразования как инструмент конкурентной борьбы // Молодой ученый. 2016. №11. С. 742–744.
6. Бубенцова В.Ф. Стратегия разработки и выведения на рынок нового продукта // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2016. № 4 Электронный ресурс: <http://ekonomika.sciencedirect.com/10.1016/j.ecinem.2016.04.001> (дата обращения: 16.06.2017).
7. Соколов М.А. Возможности использования зарубежного опыта в российской практике слияний и поглощений // Вопросы экономических наук. 2007. № 5. С. 199–201.
8. Merkel F.K. Addressing New Item Bias in the Producer Price Indexes: A PPI Quality Improvement Initiative, опубликованная работа. 2000. (Washington, D.C.: Bureau of Labor Statistics).
9. Oi W.Y. «The Welfare Implications of Invention», in T.F. Bresnahan and R.J. Gordon (eds.): The Economics of New Goods, NBER Studies in Income and Wealth (Chicago, IL: University of Chicago Press), 1997. pp. 109–141.
10. Гридчин А.М., Лесовик В.С. От бюджетного выживания к инновационному развитию // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 8. С. 10–12.
11. Глаголев С.Н., Бухонова С.М. Анализ формализованных подходов оценки гибкости промышленного предприятия // Современные

проблемы строительного материаловедения Материалы седьмых академических чтений. 2001. С. 60–68.

12. Дорошенко Ю.А., Бухонова С.М., Сомина И.В. Теоретические аспекты инвестиционной привлекательности экономических систем // Белгородский экономический вестник. 2014. № 2 (74). С. 3–7.

13. Гукова Е.А. Особенности Российской специфики организации процесса бизнес-планирования на предприятии // Экономические и социальные факторы развития народного хозяйства. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Ханты-Мансийск. 2016. С. 60–64.

14. Avilova Z.N., Gulei I.A., Shavyrina I.V. Formation of the customer-centric organizational culture of the university as a factor of effective social and economic development of the region // Mediterranean Journal of Social Sciences. 2015. Т. 6. № 3. С. 207–216.

15. Тхориков Б.А. Методология индикативного управления организациями социальной сферы: проблемы целеполагания, метод TASKED // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2015. Т. 36. № 19-1 (216). С. 39–42.

---

**Gukova E.A.****THE STRATEGY OF DEVELOPING AND IMPLEMENTING THE CONCEPT OF A NEW PRODUCT IN THE MARKETING ACTIVITIES OF AN ENTERPRISE**

*The article presents the results of research into the development of strategy and implementation of the concept of a new product in the marketing activities of an enterprise, considers the circumstances of the need for new products for sustainable economic development of firms. The work substantiates the need for effective long-term planning of new products, a focused search for new product ideas, the basic conditions for the commercial success of new products*

**Keywords:** strategy, product design, marketing, new goods.

---

Гукова Елена Арсеньевна, магистрант кафедры менеджмента и маркетинга.  
Белгородский государственный национальный исследовательский университет.  
Адрес: Россия, 308000, Белгород, ул. Победы, д. 85.  
E-mail: gukova@bsu.edu.ru

## ОЦЕНКА ЗРЕЛОСТИ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

antonkar2005@yandex.ru

*Определение достигнутого промышленным предприятием уровня процессного управления является актуальной задачей для бизнеса. Решение этой задачи осуществляется в настоящее время с помощью шкалы «Gartner», методологии «CMMI», пятиуровневой модели зрелости «BI», модели «People-CMM»; классификации состояний системы процессного управления на промышленных предприятиях. В рамках данной статьи существующий инструментарий дополнен способами оценки процессной зрелости на основе технологии изучения бизнес-процессов и этапов внедрения процессного управления с учетом применяемых методологий. Были выявлены достоинства и недостатки рассмотренного инструментария.*

**Ключевые слова:** этапы внедрения процессного подхода, уровни процессного управления, зрелость бизнес-процессов, система управления, промышленное предприятие.

**Введение.** Интерес к технологиям управления предприятиями на основе процессного подхода возрастаёт в российском бизнес-сообществе, о чём свидетельствуют результаты исследований консалтинговых организаций «АВРМР Russia» и «Логика BPM» [1, 2]. Около половины отечественных компаний находятся на начальном этапе создания системы процессного управления или только планируют внедрять процессный подход. Поскольку процессное управление базируется на нескольких основных методологиях с разными предметами исследования [3], это вносит в теоретические основы внедрения и развития процессного управления определенную путаницу, а также вызывает необходимость более детального рассмотрения этапов формирования системы процессного управления в разрезе процессных методологий.

**Основной текст.** Оценка зрелости системы процессного управления промышленного предприятия позволяет определить совокупность мероприятий, необходимых для перехода на более высокий уровень, а также рассчитать стоимость их реализации. По нашему мнению, анализ зрелости системы процессного управления на промышленных предприятиях можно осуществлять тремя способами на основе:

1. Технологии изучения существующих бизнес-процессов.
2. Классификаций уровней развития системы процессного управления.
3. Этапов внедрения процессного управления и применяемых методологий.

Рассмотрим их.

1. **Технологии изучения существующих бизнес-процессов** характеризуются следующими признаками: полнота охвата, степень декомпозиции бизнес-процессов, применяемые

правила (нотации) и программные продукты описания.

Рассмотрим классификации на основе этих признаков:

1.1. По полноте охвата бизнес-процессов [4]:  
а) описание единичных бизнес-процессов;  
б) описание всех бизнес-процессов предприятия;

в) описание «смежных» бизнес-процессов предприятий-поставщиков и потребителей (в т.ч. интеграция на уровне информационных систем).

1.2. По степени декомпозиции бизнес-процессов [5]:

а) низкий уровень декомпозиции: детальное описание бизнес-процессов, вплоть до отдельных действий, выполняемых на рабочем месте;

б) средний уровень декомпозиции: описание на уровне подпроцессов.

в) высокий уровень декомпозиции: описание наименований бизнес-процессов, определение их выходных продуктов, взаимосвязей между бизнес-процессами.

1.3. По применяемым правилам моделирования [6]:

а) формализованные нотации (например, IDEF0, IDEF3, BPMN, ARIS eEPC);

б) собственные оригинальные правила моделирования.

1.4. По применяемым программным продуктам [1, 4, 6]:

а) специализированное программное обеспечение (ARIS, AllFusion Process Modeller, Business Studio).

б) программное обеспечение, поддерживающее отдельные нотации (MS Visio).

в) стандартный пакет офисных программ (MS Word, MS Excel).

Изучение существующих бизнес-процессов будет осуществляться в сочетании рассмотренных параметров. На основе этого сочетания можно методом экспертных оценок определить уровень зрелости процессного управления. Недостатком данного способа является отсутствие шкалы для оценки зрелости, а также влияние субъективного фактора при экспертной оценке.

2. Рассмотрим существующие **классификации уровней развития системы процессного управления**, в частности, шкалу «Gartner», методология «CMMI», пятиуровневую модель зрелости «BI», модель «People-CMM»; классификацию состояний системы процессного управления на промышленных предприятиях, предложенную Карамышевым А.Н., Махмутовым И.И., Сычом С.А. [7].

### 2.1. Шкала «Gartner».

В соответствии со шкалой «Gartner» выделяются пять уровней процессной зрелости предприятия: «понимание неэффективности»; «знание процессов»; «внутрипроцессная автоматизация и контроль»; «межпроцессная автоматизация и контроль»; «управление цепочкой добавленной стоимости»; «адаптивная структура бизнеса». В нашем материале [8] были выделены следующие недостатки указанной шкалы:

1) отсутствие классификационных признаков, на основе которых выделяются уровни зрелости.

2) несогласие с последовательностью этапов шкалы, в частности, пятым этапом «адаптивная структура бизнеса». По нашему мнению, предприятие становится адаптивно-управляемым после моделирования бизнес-процессов, определения их объектных взаимосвязей, а также связей с внешней средой. Автоматизация позволяет частично ускорить выполнение бизнес-процессов.

3) отсутствие критериев для понимания неэффективности на первом уровне зрелости.

4) отсутствие критериев для определения степени декомпозиции бизнес-процессов на втором уровне зрелости.

5) не приведена методика «управления цепочкой добавленной стоимости». С учетом сложного циклического характера экономических взаимосвязей между вспомогательными бизнес-процессами этот недостаток, по нашему мнению, является достаточно серьезным.

### 2.2. Методология «CMMI»

В соответствии с методологией «CMMI» выделяются пять уровней процессной зрелости предприятия: «начальный» (бизнес-процессы слабо изучены, затраты на их выполнение и результаты варьируются), «управляемый» (описаны отдельные бизнес-процессы), «определен-

ный» (описаны все бизнес-процессы организации), «количественно-управляемый» (все важные параметры бизнес-процессов выявлены, определены их количественные характеристики, заданы эталонные величины этих параметров, управленические решения принимаются по результатам отклонения фактических значений от эталонных), «оптимизируемый» (акцент делается на совершенствовании бизнес-процессов). Определение уровня процессной зрелости определяется на основе ответов на 101 вопрос по 22 тематическим областям [9].

Недостатками данной методологии, по нашему мнению, являются:

1) Вопросы автоматизации не отражены в представленных уровнях зрелости. Это важный недостаток, поскольку автоматизация является одной из важнейших целей внедрения процессного подхода на предприятии (54% по данным АВРМР Russia [1]).

2) Не описаны управленические возможности на уровнях «начальный», «управляемый», «оптимизируемый», «определенный». По нашему мнению, более высокий уровень процессного управления должен давать дополнительные возможности при подготовке и принятии управленических решений.

### 2.3. Модель «People-CMM»

Предполагает определение процессной зрелости предприятия через призму управления персоналом. Модель является производной от методологии «CMMI».

В соответствии с моделью «People-CMM» выделяются пять уровней процессной зрелости предприятия: «начальный» (несистемное управление персоналом), «управляемый» (выделяются наиболее эффективные методы выполнения работы и распространяются в масштабах компании), «определенный» (управление персоналом осуществляется на основе регламентов и стандартов предприятия), «предсказуемый» (управление персоналом осуществляется на основе количественных показателей), «оптимизируемый» (постоянное улучшение показателей эффективности персонала на основе поиска лучших технологий выполнения процессов) [10].

Недостатками данной модели, по нашему мнению, являются:

1) оценка зрелости системы процессного управления на основе только человеческого капитала будет, на наш взгляд, однобокой.

2) не определены управленические возможности на каждом из уровней модели. Анализ системы управления на основе данной методологии не дает полной и достоверной информации для принятия обоснованных решений.

**2.4. Классификация состояний системы процессного управления на промышленных предприятиях (предложена Карамышевым А.Н., Махмутовым И.И., Сычом С.А.).**

В классификации выделяются пять уровней зрелости системы процессного управления: «Традиционное управление», «Самопознание», «Адаптивное управление», «Попроцессное управление ресурсами», «Стремление к совершенству». Каждый уровень оценивается по следующим параметрам: уровень регламентации бизнес-процессов, базовый элемент управления, взаимосвязь между базовыми элементами управления бизнес-процессами, технология расчета стоимости вспомогательных бизнес-процессов, механизм отнесения стоимости вспомогательных бизнес-процессов на себестоимость товарной продукции, алгоритм принятия решения о передаче в аутсорсинг вспомогательного бизнес-процесса, степень охвата бизнес-процессов автоматизированной информационной системой предприятия, рамки реализации процессного планирования и учета, степень соответствия оргструктуры предприятия структуре бизнес-процессов, проведение работ по оптимизации бизнес-процессов.

В соответствии с данной классификацией, предприятия, на которых не внедрен процессный подход, соответствуют уровню «Традиционное управление», который имеет мало инструментария для принятия обоснованных управленческих решений. Со второго по пятый уровень такой инструментарий предусмотрен, причем его возможности в поддержке управленческих решений расширяются с переходом на более высокий уровень зрелости системы процессного управления [7].

Общим недостатком представленного выше инструментария оценки зрелости процессного управления является неучет процессных методологий, с помощью которых осуществляется переход на новые уровни зрелости системы процессного управления и предоставляемых ими возможностях.

**3. Стандартными этапами внедрения и развития процессного подхода являются:** а) моделирование бизнес-процессов в состоянии "как есть", их регламентация и нормирование ресурсов на выполнение бизнес-задач; б) анализ и оптимизация бизнес-процессов в состояние "как должно быть"; в) автоматизация выполнения всех бизнес-процессов; г) системное совершенствование бизнес-процессов. Зрелость процессного управления может быть определена на основе достигнутого этапа.

Необходимо отметить, что некоторые из этих этапов могут выполняться одновременно,

что вызывает определенную путаницу при развитии системы процессного управления предприятием и оценке ее зрелости. С целью разобраться в этом вопросе была сформирована авторская таблица возможного совмещения этапов развития процессного управления (см. табл. 1). В стандартные этапы внедрения процессного подхода были внесены изменения, а именно были выделены этапы по анализу и оптимизации основных и вспомогательных бизнес-процессов. Это обусловлено наличием различных процессных методологий анализа и оптимизации основных (производственных) и вспомогательных (обеспечивающих) бизнес-процессов.

Рассмотрим предложенную таблицу.

➤ Клетка «1.2». Для успешного применения процессных методологий «Бережливое производство» и «Шесть сигм» не требуются модели производственных бизнес-процессов, поэтому этапы «Моделирование бизнес-процессов, их регламентация и нормирование ресурсов на выполнение бизнес-задач» и «Анализ и оптимизация бизнес-процессов, обеспечивающих качество и необходимые характеристики товарной продукции» могут выполняться параллельно.

➤ Клетка «1.3». Оптимизация вспомогательных бизнес-процессов может быть осуществлена методологией «SCOR» в части логистических операций.

➤ Клетка «1.4». Автоматизация бизнес-процессов требует детальных знаний о технологии выполнения бизнес-процесса, поэтому этап «Моделирование бизнес-процессов, их регламентация и нормирование ресурсов на выполнение бизнес-задач» предшествует этапу «Автоматизация выполнения всех бизнес-процессов на основе моделей бизнес-процессов в рамках отдельных программных продуктов и информационных платформ».

➤ Клетки «1.5», «2.5», «3.5». Непрерывное обоснованное совершенствование основных и вспомогательных бизнес-процессов возможно, по нашему мнению, лишь при наличии сети моделей бизнес-процессов, детальных знаний о параметрах их выполнения и взаимосвязей. Это необходимо для определения влияния локальных управленческих решений на экономической эффективности сети бизнес-процессов предприятия.

Клетка «2.3». Возможны параллельные анализ и оптимизация основных (методологиями «Бережливое производство» и «Шесть сигм») и вспомогательных (методологией «SCOR») бизнес-процессов. Данные процессные методологии рассмотрены нами в [11–14].

➤ Клетки «2.4» и «3.4». Автоматизацию основных и вспомогательных бизнес-процессов

возможно осуществить сразу после их моделирования, не дожидаясь анализа и оптимизации. Однако целесообразность автоматизации в этом

случае представляется нам сомнительной, поскольку после проведения мероприятий по анализу и оптимизации необходимо будет модифицировать программное обеспечение еще раз.

Таблица 1

### Порядок выполнения работ по внедрению процессного управления (авторская разработка)

Этап	2. Анализ и оптимизация бизнес-процессов, обеспечивающих качество и необходимые характеристики товарной продукции	3. Анализ и оптимизация вспомогательных бизнес-процессов предприятия	4. Автоматизация выполнения всех бизнес-процессов на основе моделей бизнес-процессов в рамках отдельных программных продуктов и информационных платформ	5. Непрерывное обоснованное совершенствование основных и вспомогательных бизнес-процессов
<b>1. Моделирование бизнес-процессов, их регламентация и нормирование ресурсов на выполнение бизнес-задач</b>	1.2. Возможно параллельное выполнение этих задач. Оптимизация основных бизнес-процессов возможна на основе методологий «Бережливое производство» и «Шесть SIGM».	1.3. Возможно параллельное выполнение этих задач. При этом оптимизация вспомогательных бизнес-процессов возможна на основе методологии «SCOR».	1.4. Невозможно параллельное выполнение этих задач.	1.5. Невозможно параллельное выполнение этих задач.
<b>2. Анализ и оптимизация бизнес-процессов, обеспечивающих качество и необходимые характеристики товарной продукции</b>	*	2.3. Возможно параллельное выполнение этих задач. При этом оптимизация вспомогательных бизнес-процессов возможна на основе методологии «SCOR», основных – методологиями «Бережливое производство» и «Шесть SIGM».	2.4. Возможно (но нецелесообразно) параллельное выполнение этих задач.	2.5. Невозможно параллельное выполнение этих задач.
<b>3. Анализ и оптимизация вспомогательных бизнес-процессов предприятия</b>	*	*	3.4. Возможно (но нецелесообразно) параллельное выполнение этих задач.	3.5. Невозможно параллельное выполнение этих задач.
<b>4. Автоматизация выполнения всех бизнес-процессов на основе моделей бизнес-процессов в рамках отдельных программных продуктов и информационных платформ</b>	*	*	*	4.5. Возможно параллельное выполнение этих задач.

➤ Клетка «4.5». Изменение параметров выполнения бизнес-процессов после их усовершенствования должно находить свое отражение в автоматизированной системе управления, этот процесс в условиях непрерывного совершенствования будет перманентным.

Недостатком этого способа является возможность одновременного выполнения этапов внедрения процессного управления, что усложняет определение достигнутого уровня зрелости.

**Выводы.** На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ зрелости системы процессного управления на промышленных предприятиях можно осуществлять тремя способами на основе: а) технологии изучения существующих бизнес-процессов; б) классификаций уровней развития системы процессного управления; в) этапов внедрения процессного управления и применяемых методологий.

2. Недостатком первого способа является отсутствие шкалы для оценки зрелости, а также влияние субъективного фактора при экспертной оценке. Второй способ предполагает возможность применения нескольких классификаций зрелости системы процессного управления со своими специфическими недостатками. Недостатком третьего способа является возможность одновременного выполнения этапов внедрения процессного управления, что усложняет определение достигнутого уровня зрелости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коптелов А., Филатова М. Исследование АВРМР Russia «Российский рынок BPM 2015» [Электронный ресурс]. URL: <http://abrmp.org.ru/> (дата обращения 30.03.2017).
2. Каменнова М. Результаты исследования «Российский рынок BPM 2015-2016» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.i-love-bpm.ru/kamennova/rezultaty-issledovaniya-rossiyskiy-gupok-vrm-2015-2016/> (дата обращения 30.06.2017).
3. Карамышев А.Н. Сравнительный анализ методологий процессного управления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №7. С. 194–197.
4. Елиферов В.Г., Репин В.В. Бизнес-процессы: регламентация и управление. М.: ИНФРА-М, 2006. 319 с.
5. Тельнов Ю.Ф. Реинжиниринг бизнес-процессов. Компонентная методология. М.: Финансы и статистика, 2005. 320 с.
6. Август-Вильгельм Шеер. Бизнес-процессы. Основные понятия. Теория. Методы. М.: Весть-МетаТехнология, 2004. 152 с.
7. Карамышев А.Н., Махмутов И.И., Сыч С.А. Классификация состояний системы процессного управления на промышленных предприятиях // Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Камские чтения» – Набережные Челны. Изд-во Камской государственной инженерно-экономической академии, 2010. Ч.3. С. 65-68.
8. Исаевнин А.Г., Карамышев А.Н., Махмутов И.И., Сыч С.А. Методы оценки и распределения стоимости вспомогательных бизнес-процессов крупных промышленных предприятий. Изд-во Казанского федерального университета в г. Набережные Челны, 2010. 146 с.
9. CMMI Product Team. CMMI® for Development, Version 1.2. Pittsburgh: Carnegie Mellon Software Engineering Institute, 2006. 573 p.
10. Curtis, Bill, Hefley, W. E., Miller, Sally A. The People Capability Maturity Model, Guidelines for Improving the Workforce. NY.: Addison-Wesley, 2002. 272 p.
11. Карамышев А.Н., Казаева М.С., Абросимова Е.В., Федоров Д.Ф. Анализ процессной методологии управления «Бережливое производство» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №3. С. 148–150.
12. Карамышев А.Н., Казаева М.С., Абросимова Е.В., Федоров Д.Ф. Анализ процессной методологии управления «Шесть сигм» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №4. С. 160–164.
13. Карамышев А.Н. Анализ методологий процессного управления, полностью охватывающих бизнес-процессы предприятия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №5. С. 214–217.
14. Карамышев А.Н. Анализ универсальных методологий процессного управления промышленными предприятиями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №6. С. 192–195.

**Karamyshev A.N.**

## ASSESSMENT OF PROCESS-BASED MANAGEMENT SYSTEM MATURITY IN INDUSTRIAL ENTERPRISES

*One of the relevant business objectives is to determine the level of process-based management achieved by an industrial enterprise. Currently this objective is solved using Gartner's scale, CMMI Methods, BI Five-Level Maturity Model, People-CMM model; classification of states of the process-based management system in industrial enterprises. In this article the existing tools are supplemented by the approaches to business processes maturity assessment based on studies of the existing business process and the stages of process-based management introduction with account of the applied methods. These tools were analysed for advantages and disadvantages.*

**Keywords:** stages of process-based approach introduction, process-based management levels, business process maturity, management systems, industrial enterprise.

**Карамышев Антон Николаевич**, кандидат экономических наук, доцент.  
Набережночелнинский институт Казанского федерального университета.  
Адрес: Россия, 423826, Набережные Челны, 423812, д. 68/19.  
E-mail: antonkar2005@yandex.ru

Даниленко Е.П., доц.  
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова  
Коробейник В.А., магистрант  
Белгородский государственный национальный исследовательский университет

## КОМПЛЕКСНЫЕ КАДАСТРОВЫЕ РАБОТЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЕЙ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

*danilenko\_ep@mail.ru*

*В статье рассмотрен вопрос о важности проведения комплексных кадастровых работ. Определены объекты, субъекты комплексных кадастровых работ и цель их проведения. Проанализирована нормативно-правовая документация по данной проблеме. Рассмотрен план проведения комплексных кадастровых работ на территории Шебекинского района, а также их роль в повышении эффективности управления территорией Шебекинского района.*

**Ключевые слова:** комплексные кадастровые работы, объект недвижимости, кадастровый квартал, органы местного самоуправления, управленческие решения, эффективность управления.

Комплексные кадастровые работы занимают важное положение в системе государственного управления территорией муниципального образования. Они охватывают такие функции управления как: изучение, обследование, съемка и картографирование земельных ресурсов, ведение единого государственного реестра недвижимости (далее – ЕГРН), оперативные управленческие решения и

действия, информационное обеспечение платности землепользования, государственный надзор за использованием земель, разрешение земельных споров.

Главная цель проведения комплексных кадастровых работ – это наполнение ЕГРН сведениями об объектах недвижимости. Филиалам ФГБУ «ФКП Росреестра» поручается осуществлять взаимодействие с органами исполнительной власти по проведению комплексных кадастровых работ.

Под комплексными кадастровыми работами понимаются кадастровые работы, выполняемые одновременно в отношении всех расположенных на территории одного кадастрового квартала или территориях нескольких смежных кадастровых кварталов объектов комплексных кадастровых работ [2].

Объектами комплексных кадастровых работ являются:

– земельные участки, кадастровые сведения о которых не соответствуют требованиям к описанию местоположения границ земельных участков;

– земельные участки, занятые зданиями или сооружениями, площадями, улицами, проездами, набережными, скверами, бульварами, водными объектами, пляжами и другими объектами общего пользования, образование которых

предусмотрено утвержденным проектом межевания территории;

– здания, сооружения, а также объекты не завершенного строительства, права на которые зарегистрированы в порядке, установленном Федеральным законом «О государственной регистрации прав на недвижимое имущество и сделок с ним» [2].

Субъектами комплексных кадастровых работ выступают: заказчик – уполномоченный орган местного самоуправления; исполнитель – кадастровый инженер; орган кадастрового учета.

Комплексные кадастровые работы – это единственный действенный механизм уточнения границ земельных участков и закрепления их на местности. Однако выполнение комплексных кадастровых работ носит не обязательный характер и является инициативой органов местного самоуправления муниципальных образований.

На территории муниципальных образований Российской Федерации реализация мероприятия «Проведение комплексных кадастровых работ» запланирована за счет предоставления субсидий из федерального бюджета и средств бюджетов субъектов Российской Федерации, начиная с 2017 года [3]. В 2017 году Правительством РФ субсидии на выполнение комплексных кадастровых работ планируется предоставить трем试点ным регионам – Республике Тыва, Астраханской и Белгородской областям.

На реализацию мероприятий по выполнению комплексных кадастровых работ в Белгородской области выделено: из средств федерального бюджета – 7810 тыс. руб., из средств областного бюджета – 4023 тыс. руб.

План мероприятий по проведению комплексных кадастровых работ на территории Бел-

городской области на 2017 год утвержден распоряжением Правительства Белгородской области № 613-рп от 19.12.2016 года «Об организации проведения комплексных кадастровых работ на территории Белгородской области». Проведение мероприятий в Белгородской области запланировано на территории: Алексеевского района – 7 кадастровых кварталов, Новооскольского района – 2 кадастровых квартала, Ивнянского района – 6 кадастровых кварталов, Белгородского района – 25 кадастровых кварталов, Губкинского городского округа – 5 кадастровых кварталов, Шебекинского района и города Шебекино – 20 кадастровых кварталов.

Для примера рассмотрим проведение комплексных кадастровых работ на территории Шебекинского района.

Подход к установлению границ земельных участков путём выполнения комплексных кадастровых работ значительно снижает затраты (стоимость работ в расчете на один участок значительно ниже в сравнении с ситуацией, когда участки межуются по одному), а также уменьшает вероятность кадастровых ошибок.

Департаментом имущественных и земельных отношений Белгородской области утвержден перечень кадастровых кварталов, в границах которых планируется проведение комплексных кадастровых работ на территории Шебекин-

ского района (табл. 1) [6]. Выбраны 20 кадастровых кварталов, в границах которых расположены садоводческие товарищества (далее – СТ) с максимальным числом неиспользуемых земельных участков и земельных участков с неурегулированными границами.

Проведение комплексных кадастровых работ на территории Шебекинского района позволит:

- получить актуальную, полноценную и юридически значимую информацию об объектах недвижимости на территории муниципального образования;
- выявить неиспользуемые, нерационально используемые или используемые не по целевому назначению и не в соответствии с видом разрешенного использования земельные участки;
- выявить самовольные постройки и факты самовольного захвата земель;
- устраниТЬ кадастровые ошибки, допущенные ранее при определении местоположения границ земельных участков;
- разрешить существующие земельные споры и предотвратить их возникновение в будущем;
- увеличить базу налогооблагаемых объектов недвижимости;
- вовлечь в оборот неиспользуемые ранее земельные участки [7].

Таблица 1

**Перечень кадастровых кварталов, в границах которых планируется проведение комплексных кадастровых работ на территории Шебекинского района**

№ п/п	Номер кадастрового квартала	Местоположение кадастрового квартала	Категория земель	Хар-ка кадастрового квартала
1	31:17:1911005	Шебекинский район, СТ «Лесное»		
2	31:17:1911006			
3	31:17:1911007			
4	31:17:1912012	Шебекинский район, СТ «Лесок»		
5	31:17:1912010	Шебекинский район, СТ «Полесье»		
6	31:17:1912011	Шебекинский район, СТ «Изумруд»		
7	31:17:1912008	Шебекинский район, СТ «Виола»		
8	31:17:1912009			
9	31:17:1912006	Шебекинский район, СТ «Сирень»	Земли сельскохозяйственного назначения	Садоводческие товарищества
10	31:17:1912007			
11	31:17:1912005	Шебекинский район, СТ «Сельский строитель»		
12	31:17:1912014			
13	31:17:1912004	Шебекинский район, СТ «Пищевик»		
14	31:17:1912001	Шебекинский район, СТ «Изабелла»		
15	31:17:1912002			
16	31:17:1912003			
17	31:17:1911001	Шебекинский район, СТ «Кооператор»		
18	31:17:1911002			
19	31:17:1911003			
20	31:17:1911004	Шебекинский район, СТ «Салют-2»		

Комплексные кадастровые работы на территории Шебекинского района проводятся на основании итогов конкурса на выполнение комплекс-

ных кадастровых работ на территории муниципального образования по состоянию на 19.05.2017 г. (табл. 2).

Таблица 2

**Информация о проведении конкурсов на выполнение комплексных кадастровых работ на территории Шебекинского района**

№ п/п	Наименование товара (кадастровые кварталы)	Началь ная (макс.) цена контракта, руб.	Дата заключения контракта	Цена по итогам конкурса, руб.	Сумма экономии бюджетных средств, руб.	Срок исполнения работ	Исполнитель работ
1	31:17:1911001, 31:17:1911002, 31:17:1911003 – СТ «Кооператор», 31:17:1911004 – СТ «Салют-2»	396317	11.05.2017	356685	39632	20.11.2017	БОГУП «РНПЦ» ОДНО ОКНО»
2	31:17:1912006, 31:17:1912007 – СТ «Сирень», 31:17:1912011 – СТ «Изумруд»	486388	10.05.2017	389110,4	97277,6	20.11.2017	ООО «Белгородземпроект»
3	СТ «Изабелла»(31:17:1912001, 31:17:1912002, 31:17:1912003)	468373	12.05.2017	468373	0	20.11.2017	БОГУП «РНПЦ» ОДНО ОКНО»
4	СТ «Лесное» (31:17:1911005, 31:17:1911006, 31:17:1911007)	525693	04.05.2017	499000	26693	20.11.2017	ООО «БРИЗ»
5	31:17:1912008, 31:17:1912009 – СТ «Виола», 31:17:1912010 – СТ «Полесье», 31:17:1912012 – СТ «Лесок»	379942	04.05.2017	360950	18992	20.11.2017	ООО «БРИЗ»
6	31:17:1912004 – СТ «Пищевик», 31:17:1912005, 31:17:1912014 – СТ «Сельский строитель»	473287	12.05.2017	449650	23637	20.11.2017 на сайте госзакупок Дата – 20.12.2017	ООО «БРИЗ»
<b>ИТОГО:</b>		<b>2730000</b>		<b>2523768,4</b>	<b>206231,6</b>		

Комплексные кадастровые работы на территории Шебекинского района будут проводиться в период с 12 мая 2017 года по 20 ноября 2017 года [8]. Заказчик комплексных кадастровых работ – Комитет муниципальной собственности и земельных отношений администрации Шебекинского района.

Комплексные кадастровые работы на территории Шебекинского района проводятся в местной системе координат – МСК-31. Также для

проведения комплексных кадастровых работ имеется картографический материал Шебекинского района и г. Шебекино: цифровой навигационный план городов открытого пользования масштаба 1:10000 на территорию г. Шебекино, планово-топографическая основа масштаба 1:2000 на территорию г. Шебекино (1999 г.) на бумажных носителях в местной системе координат (табл. 3).

Таблица 3

**Сведения о наличии картографического материала на территорию Шебекинского района и г. Шебекино**

№ п/п	Номер и наименование кадастрового района	Территория, на которую создан картографический материал	Вид картографического материала	Масштаб	Формат	Система координат	Год создания
1	31:17 Шебекинский	Шебекинский район	ЦТК ОП	1:25000	цифровой	МСК-31 (2-я зона)	2016
		п. Маслова Пристань	планово-карто-графическая основа	1:2000	аналог на бумажных носителях	местная	1999
2	31:18 г. Шебекино	г. Шебекино	планово-карто-графическая основа	1:2000	аналог на бумажных носителях	местная	1999
			ЦТК ОП	1:25000	цифровой	МСК-31 (2-я зона)	2016
			ЦИПГ ОП	1:10000	цифровой	МСК-31 (2-я зона)	2011

Как было указано выше, в Шебекинском районе планируется проведение комплексных кадастровых работ в 20 кадастровых кварталах общей площадью 254,3 га. Сведения ЕГРН содержат сведения о 1401 земельном участке в пределах этих кадастровых кварталов, из которых 1323 земельных участка требуют уточнения местоположения границ (табл. 4).

В результате выполнения комплексных кадастровых работ обеспечивается подготовка карты-плана территории, содержащей необходимые для кадастрового учета сведения о земельных участках в границах территории Шебекинского района [4].

Полученная информация о соответствующих объектах недвижимости является для муниципалитета важным условием для эффективного использования, оборота и налогообложения недвижимости, а также упорядоченности в земельно-имущественной сфере.

Комплексные кадастровые работы, как одна из составляющих бюджетного фактора экономического развития, оказывают влияние на налоговую сферу муниципального образования, основу которых составляет земельный налог. Земельные

участки, сведения о границах которых содержатся в ЕГРН, позволяют рассчитывать налоговую базу исходя из фактического землепользования [1]. Комплексные кадастровые работы позволяют избежать неуплаты налогов, в случае если фактическое землепользование по площади больше, чем по документам. А в случае пользования меньшей площади – освободит собственников, землевладельцев и землепользователей от лишних необоснованных затрат.

Таким образом, комплексные кадастровые работы являются важнейшим инструментом, предложенным региональным властям для оптимального территориального планирования, наполнения бюджетов и повышения инвестиционной привлекательности.

Проведение комплексных кадастровых работ повышает эффективность управления территорией муниципального образования, а при масштабном проведении обеспечивает восполнение, исправление и актуализацию ЕГРН и, как следствие, повышение уровня юридической защиты прав законных интересов правообладателей объектов недвижимости.

**Объекты, подлежащие комплексным кадастровым работам на территории  
Шебекинского района**

Таблица 4

№ п/п	Номер кадаст- рового квар- тала	Площадь ка- дастро- вого квар- тала, га	Кате- гори- зье- мель	Общее кол-во ЗУ, шт.	Кол-во ЗУ без установ- ленных границ, шт.	Общее кол-во ОКС, шт.	Кол-во ЗУ с ошиб- ками в местопо- ложении границ, шт.	Итого объек- тов, подле- жащих вклю- чению в кон- тракт, шт.
1	31:17:1911005	21,0	Земли сельскохозяйственного назначения	99	96	-	2	98
2	31:17:1911006	8,3		33	32	-	1	33
3	31:17:1911007	9,6		31	31	-	-	31
4	31:17:1912012	3,2		31	31	-	-	31
5	31:17:1912010	12,9		54	50	-	4	54
6	31:17:1912011	10,7		112	103	-	9	112
7	31:17:1912008	5,2		83	80	-	3	83
8	31:17:1912009	8,0		54	53	-	1	54
9	31:17:1912006	8,1		83	80	-	3	83
10	31:17:1912007	11,5		87	84	-	2	86
11	31:17:1912005	6,2		102	101	-	1	102
12	31:17:1912014	10,4		54	52	-	1	53
13	31:17:1912004	15,6		115	105	-	6	111
14	31:17:1912001	23,8		97	93	-	3	96
15	31:17:1912002	14,9		92	86	-	3	89
16	31:17:1912003	5,2		71	71	-	-	71
17	31:17:1911001	5,7		49	47	-	-	47
18	31:17:1911002	6,8		38	37	-	1	38
19	31:17:1911003	61,4		61	38	12	1	51
20	31:17:1911004	5,8		55	53	-	2	55
<b>ИТОГО:</b>				<b>1401</b>	<b>1323</b>	<b>12</b>	<b>43</b>	<b>1378</b>

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая): ФЗ от 05.08.2000 №117-ФЗ [Электронный ресурс] // URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 14.06.2017)

2. О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном кадастре недвижимости» и отдельные законодательные акты Российской Федерации: ФЗ от 22.12.2014 № 447-ФЗ (ред. от 03.07.2016) Электронный ресурс] // URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 14.06.2017)

3. Постановление Правительства РФ от 10.10.2013 № 903 (ред. от 22.12.2016) «О федеральной целевой программе «Развитие единой

государственной системы регистрации прав и кадастрового учета недвижимости (2014 - 2020 годы)» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 14.06.2017)

4. Приказ Минэкономразвития России от 21.11.2016 № 734 «Об установлении формы карты-плана территории и требований к ее подготовке, формы акта согласования местоположения границ земельных участков при выполнении комплексных кадастровых работ и требований к его подготовке» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 14.06.2017)

5. Распоряжение Правительства Белгородской области от 19.12.2016 № 613-рп «Об организации проведения комплексных кадастровых работ на территории Белгородской области» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 14.06.2017)

6. Распоряжение Департамента имущественных и земельных отношений Белгородской области от 27.12.2016 № 483-р «Об утверждении перечня кадастровых кварталов, в границах которых планируется проведение комплексных кадастровых работ на территории Белгородской области» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 14.06.2017)

7. Даниленко Е.П., Коробейник В.А. Оценка эффективности работы органов местного самоуправления при управлении территорией города Шебекино // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №10. С. 230-236.

8. Кара К.А., Ширина Н.В. Наполненность государственного кадастра недвижимости сведениями о границах и зонах Белгородской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №12. С. 215-221.

9. Официальный сайт Администрации города Шебекино. – [Электронный ресурс] // URL: <http://gorod.shebekino.ru> (дата обращения: 14.06.2017)

---

**Danilenko E.P., Korobeinik V.A.**

### **COMPREHENSIVE CADASTRE WORKS AS A TOOL TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE MANAGEMENT OF THE TERRITORY OF MUNICIPAL EDUCATION**

*The article considers the importance of complex cadastral work. The objects, subjects of complex cadastral works and the purpose of their conducting are determined. The regulatory and legal documentation on this issue has been analyzed. The plan of complex cadastral works on the territory of Shebekinsky district, as well as their role in improving the management of the Shebekinsky district territory, is considered.*

**Keywords:** complex cadastral works, real estate object, cadastral quarter, local government bodies, management decisions, management efficiency.

---

**Даниленко Елена Петровна**, доцент кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: danilenko\_ep@mail.ru

**Коробейник Виктория Александровна**, магистрант кафедры природопользования и земельного кадастра.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Победы, д. 85.

E-mail: vikul-2012@mail.ru

Научное издание

**«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»  
№ 9, 2017 г.**

Научно-теоретический журнал

**Ответственный за выпуск Н.И. Алфимова  
Компьютерная верстка А.В. Федоренко  
Дизайн обложки Е.А. Гиенко**

**Учредитель журнала –** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС77-26533

Сдано в набор 10.07.17. Подписано в печать 31.08.17. Формат 60×84/8  
Усл. печ. л. 24,18. Уч.-изд. л. 26.  
Тираж 1000 экз. Заказ 203. Цена договорная.  
Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 336 Лк.  
Номер свидетельства в редакции научно-теоретического журнала  
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова».  
Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова

