

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

Научно-теоретический журнал
Издается с марта 1958 г.
Выходит один раз в месяц

№ 10 (646)
Октябрь 2012 г.

Главный редактор В.Г. Себешев
Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, В.И. Костин (зам. гл.
редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора),
Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов,
Ю.П. Панибратов, Ю.П. Правдинец, В.Г. Себе-
шев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов, Е.М. Чернышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.
Тел./факс 266-28-59.
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 29.10.12. Формат 70×108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1333.

ООО «Партнеры Сибири»,
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА- ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Бердов Г.И., Ильина Л.В. Взаимодействие силикат-
ных клинкерных минерала-
лов с водными растворами
электролитов 3

Степаненко И.В. Тверде-
ние бетонов в условиях
контактного подвода тепла 10

**Овчаренко Г.И., Гильмия-
ров Д.И., Викторов А.В.,
Фок Н.А.** Новая техноло-
гия переработки кислых зо-
лошлаковых отходов ТЭЦ в
строительные материалы . 14

**Ковков И.В., Абдрахи-
мов В.З., Колпаков А.В.** Исследование фазового со-
става керамических мате-
риалов на основе алюмосо-
держащих отходов 20

ЭКОНОМИКА И ОРГА- НИЗАЦИЯ СТРОИ- ТЕЛЬСТВА

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИ- ТЕЛЬНОГО ПРОИЗ- ВОДСТВА

Калугин Ю.Б. Календар-
ное планирование работ с
вероятностными временны-
ми параметрами в иерархи-
ческих структурах 30

**Устинов Ю.Ф., Коно-
нов А.Д., Кононов А.А.,
Гильмутдинов В.И.** Сис-
тема автоматического уп-
равления основным отва-
лом автогрейдера 40

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

**Логачев И.Н., Лога-
чев К.И., Аверкова О.А.**

Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. С о б щ е н и е I. Уравнения динамики эжектируемого и рециркулируемого воздуха	46
Бройда В.А. Экономия тепловой энергии за счет стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции	54
Адеев А.А., Лугин И.В. Динамика температуры пожарно-дымовых газов в тоннеле метрополитена при горении поезда	59
Кононова М.С. О влиянии температуры теплоносителя на технико-экономические показатели проектируемых тепловых сетей	67
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Веригин Ю.А., Кульсейтов Ж.О., Жандарбекова А.М. К решению вопроса сокращения объемов текущего ремонта коробки передач погрузчиков моделей L-34В и 534С	74
Грузин А.В., Куликов А.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Принципиальная схема дроссельно-беззолотникового пневматического ударного механизма и его физико-математическое описание	81
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Гордеева Т.Е. Применение метода двух моментов для определения надежности конструкций	88
Данилов М.Н., Федорова Н.Н. Конечно-элементное моделирование многослойных ограждающих конструкций	92
Родионов И.К. Усиление растянутых стержней стальных ферм покрытий в аспекте сварочных технологий	101
Хархардин А.Н., Строкова В.В., Кожухова М.И. Критический размер микроНаночастиц, при котором проявляются их необычные свойства	109
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Миряев Б.В. Экспериментальное исследование треугольных трехслойных панелей при совместном действии продольных сил и поперечной нагрузки	116
Королев К.В., Самолетов Э.А., Смолин Ю.П. Экспериментальные исследования коэффициента порового давления	122

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.54.004.4

Г.И. БЕРДОВ, Л.В. ИЛЬИНА

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИЛИКАТНЫХ КЛИНКЕРНЫХ МИНЕРАЛОВ С ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Исследовано взаимодействие силикатных клинкерных минералов (C_3S и C_2S) с водными растворами солей, кислот, щелочей с концентрацией от 0,01 до 0,1 М. Определен выход ионов кальция в раствор из минералов и изменение pH раствора. Установлено существенное изменение структуры минералов при воздействии растворов солей с зарядом катиона, равным 3.

Ключевые слова: портландцементный клинкер, нормальное хранение, гранулометрический анализ, механическая прочность, минеральные добавки.

Цемент является полиминеральным вяжущим веществом. При взаимодействии с водой отдельные минералы оказывают взаимное влияние друг на друга, хотя преобладающей будет роль основных минералов клинкера — трех- и двухкальциевого силикатов [1, 2].

Технические свойства цемента во многом определяются специфическими особенностями минералов цементного клинкера [3]:

- их способностью образовывать твердые растворы с разнообразными компонентами;
- дефектностью кристаллической структуры;
- неустойчивостью ряда твердых растворов;
- сложным полиморфизмом.

Характерны следующие замещения в катионной части структуры C_3S и C_2S : октаэдрически координированный ион Ca^{2+} может изоморфно замещаться ионами Sr^{2+} , Ba^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} . Замещения ионом Mg^{2+} более редки. Характерны изоморфные замещения вдоль диагональных рядов периодической системы элементов. Так, ион Ca^{2+} может быть замещен ионами Na^+ , K^+ , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} , Y^{3+} , Lu^{3+} и др., а ион Si^{4+} — ионами Al^{3+} , Fe^{3+} , B^{3+} , P^{3+} , Cr^{6+} [3]. При этом компенсация зарядов осуществляется за счет количества обменивающихся ионов и сопровождается возникновением в структуре вакансий или атомов в межузлиях.

Эти особенности клинкерных минералов могут проявляться при их взаимодействии с растворами электролитов.

Добавки электролитов в воду затворения часто используются для регулирования взаимодействия цемента с водой. Вместе с тем их выбор не всегда является достаточно обоснованным, а механизм действия неясным. В данной работе приведены результаты исследования взаимодействия с растворами солей силикатных клинкерных минералов C_3S , $\beta\text{-}C_2S$,

полученных с Подольского опытного завода. При выполнении экспериментов активное участие приняла канд. техн. наук О.С. Мадзаева.

Удельная поверхность клинкерных минералов составляла около 300 м²/кг. Изучалось их взаимодействие с водой и растворами солей, имеющих разные катионы. В качестве таковых взяты хлориды, хорошо растворимые в воде. У выбранных солей заряд катиона был равен +1 (Na^+ , K^+) и +3 (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}). Молярность раствора составляла 0,01; 0,05 и 0,1 М. Для сравнения исследовалось действие на клинкерные минералы дистиллированной воды; растворов соляной кислоты, имеющих молярность 0,0001; 0,001; 0,01 и 0,1 М; растворов гидроксида натрия с молярностью 0,01; 0,05 и 0,1 М. Навеска минерала или цемента массой 1 г взаимодействовала с исследуемым раствором, объем которого составлял 50 мл.

Так как протекание физико-химических процессов при взаимодействии твердых веществ с растворами зависит от температуры, эксперименты проводились при 20 и 100 °С. Оценивалось изменение pH растворов в результате взаимодействия с клинкерными минералами. После взаимодействия минералов с растворами трилонометрически определялось содержание ионов Ca^{2+} в растворе (ммоль-экв на 1 г минерала).

Определялось также изменение структуры клинкерных минералов после взаимодействия. Раствор фильтровался, и твердый остаток высушивался на воздухе. Затем снимались рентгенограммы на установке ДРОН-3. Полученные результаты состоят в следующем.

Трехкальциевый силикат (C_3S). При взаимодействии с дистиллированной водой исходное значение pH, равное 6,0, быстро увеличивается до 12,1. Это значение регистрируется уже через 5 мин после взаимодействия при 20 °С (табл. 1). Выдержка в течение 60 мин при 100 °С не приво-

Таблица 1
Изменение pH растворов электролитов и содержание в них ионов Ca^{2+} при взаимодействии с C_3S

Соединение, находящееся в растворе	Концентрация раствора, моль/л	pH раствора			Содержание в растворе ионов Ca^{2+} , ммоль-экв/г	
		исходного	после взаимодействия с C_3S в течение			
			5 мин при 20 °С	60 мин при 100 °С		
1	2	3	4	5	6	
HCl	—	6,0	12,1	12,1	0,44	
	0,0001	3,7	12,0	12,5	0,75	
	0,001	3,1	12,1	12,6	0,91	
	0,01	2,1	11,6	12,3	1,30	
	0,1	1,1	9,6	10,1	4,41	
NaCl	0,01	6,3	12,4	12,2	0,70	
	0,05	6,1	12,0	12,1	0,67	
	0,1	6,0	12,1	12,1	0,80	
KCl	0,01	5,9	11,6	12,0	0,93	
	0,05	6,1	11,9	12,3	1,00	
	0,1	6,5	11,8	12,4	0,93	
NaOH	0,01	12,1	12,2	12,3	0,48	
	0,05	12,6	12,4	12,0	0,09	
	0,1	12,8	12,3	12,7	0,00	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
AlCl_3	0,01	3,9	11,4	11,5	1,33
	0,05	3,6	6,5	10,8	4,15
	0,10	3,2	4,2	8,0	8,75
FeCl_3	0,01	2,4	11,8	12,1	3,50
	0,05	2,0	8,2	11,4	6,50
	0,10	1,8	4,4	10,3	11,00
CrCl_3	0,01	3,2	11,0	12,0	1,55
	0,05	2,8	5,7	11,1	5,50
	0,10	2,7	6,1	9,9	10,00

дит к дальнейшему увеличению рН. Содержание ионов Ca^{2+} в воде после 60 мин кипячения навески составляет 0,44 моль-экв на 1 г минерала.

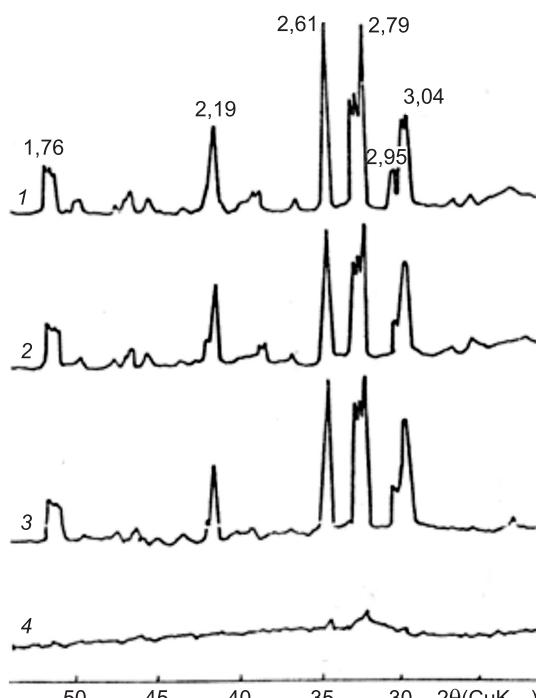
Изменение рН раствора и выхода иона Ca^{2+} в раствор характерно в случае действия HCl с концентрацией более 0,01 моль/л и особенно при действии растворов с многозарядными катионами (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}). Действие NaOH при концентрации раствора более 0,05 моль/л практически подавляет выход ионов Ca^{2+} в раствор.

Действие электролитов, содержащих многозарядные катионы, имеет специфические особенности, существенно отличается от действия кислоты или солей с однозарядными катионами. Такое заключение можно сделать, сравнивая рентгенограммы C_3S в исходном состоянии и после взаимодействия с водой, 0,1 М растворами соляной кислоты и CrCl_3 .

Уже после 40 мин (рис. 1) взаимодействия при комнатной температуре с 0,1 М раствором CrCl_3 регистрируется исчезновение основных рефлексов C_3S . Действие воды и 0,1 М раствора HCl в этих условиях сходно, но основные рефлексы C_3S на дифрактограмме сохраняются более четко, чем в случае взаимодействия в течение 60 мин при 100 °С.

Аналогичные глубокие изменения структуры отмечены и в случае взаимодействия C_3S с растворами других солей, имеющих катионы с зарядом, равным +3 (AlCl_3 , FeCl_3).

Двухкальциевый силикат ($\beta\text{-C}_2\text{S}$). При взаимодействии $\beta\text{-C}_2\text{S}$ с дистиллированной водой значение рН увеличивается от исходного уровня, равного 6,0 до 11,6, после 5 мин

Рис. 1. Дифрактограмма образцов C_3S

1 — в исходном состоянии, после 40 мин взаимодействия при 20 °С; 2 — с водой; 3 — с 0,1 М раствором HCl ; 4 — в 0,1 М растворе CrCl_3 (θ — град., межплоскостные расстояния в 10^{-10} м)

взаимодействия (табл. 2). Кипячение навески в течение одного часа в дистиллированной воде не приводит к дальнейшему увеличению значения pH. Содержание ионов Ca^{2+} в воде составляет при взаимодействии с минералом 0,18 ммоль-экв/г, что в 2,5 раза меньше, чем в случае C_3S . Это связано, по-видимому, с тем, что при взаимодействии с C_3S осуществляется более интенсивный гидролиз минерала и переход в раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Влияние растворов электролитов во многом аналогично отмеченному выше для C_3S . Содержание ионов Ca^{2+} в растворах хлоридов с трехзарядными катионами при взаимодействии с $\beta\text{-C}_2\text{S}$ практически таково же, что и в случае C_3S (см. табл. 1). Этот факт является весьма примечательным, так как взаимодействие $\beta\text{-C}_2\text{S}$ с водой и растворами HCl значительно менее интенсивно, чем C_3S .

Наличие в растворе трехзарядных катионов интенсифицирует гидратацию $\beta\text{-C}_2\text{S}$ больше, чем C_3S , сближая их между собой. Можно ожидать значительного ускорения гидратации цементов с высоким содержанием

Таблица 2

Изменение pH растворов электролитов и содержание в них ионов Ca^{2+} при взаимодействии с $\beta\text{-C}_2\text{S}$

Соединение, находящееся в растворе	Концентрация раствора, моль/л	pH раствора			Содержание в растворе ионов Ca^{2+} , ммоль-экв/г	
		исходного	после взаимодействия с C_3S в течение			
			5 мин при 20 °C	60 мин при 100 °C		
HCl	—	6,0	11,6	11,5	0,18	
	0,0001	3,7	11,7	11,7	0,20	
	0,001	3,1	11,5	11,5	0,28	
	0,01	2,1	10,8	10,1	0,50	
	0,1	1,1	9,8	9,1	0,65	
NaCl	0,01	6,3	11,5	11,2	0,13	
	0,05	6,1	11,8	11,3	0,18	
	0,1	6,0	11,7	11,3	0,30	
KCl	0,01	5,9	11,5	11,3	0,13	
	0,05	6,1	11,2	11,1	0,20	
	0,1	6,4	11,7	11,5	0,21	
NaOH	0,01	12,2	12,0	12,0	0,00	
	0,05	12,6	12,4	12,3	0,05	
	0,1	12,8	12,6	12,4	0,03	
AlCl_3	0,01	3,9	5,0	9,2	0,65	
	0,05	3,6	4,3	8,5	5,88	
	0,10	3,2	4,1	7,0	9,55	
FeCl_3	0,01	2,4	11,1	9,7	1,00	
	0,05	2,0	8,2	9,1	4,40	
	0,10	1,8	2,9	7,7	8,00	
CrCl_3	0,01	3,2	10,1	9,5	1,25	
	0,05	2,8	6,4	8,9	5,25	
	0,10	2,7	5,2	8,2	10,00	

белита при наличии в воде затворения трехзарядных катионов. Так, сравнивая количество ионов Ca^{2+} в воде и 0,1 М растворах хлоридов, можно отметить, что оно увеличивается в следующее число раз:

	AlCl_3	FeCl_3	CrCl_3
C_3S	20	25	23
$\beta\text{-C}_2\text{S}$	54	48	57

Рентгенофазовый анализ показывает (рис. 2) глубокие изменения структуры $\beta\text{-C}_2\text{S}$ при действии растворов AlCl_3 , FeCl_3 , CrCl_3 как в течение одного часа при 100 °C, так и через 40 мин при 20 °C. Практически исчезают рефлексы минерала, что аналогично изменению структуры C_3S и не наблюдается при действии на $\beta\text{-C}_2\text{S}$ воды и 0,1 М раствора HCl.

Проанализируем возможные причины отмеченных особенностей взаимодействия клинкерных минералов с растворами солей.

Обсуждение результатов. Анализируя литературные данные и результаты экспериментальных исследований, можно выделить основные процессы, происходящие на начальных стадиях взаимодействия дисперсных строительных материалов с водой, разделив их на две группы.

1. Контактирование дисперсного вещества с водой:

- смачивание поверхности твердого тела;
- заполнение пор водой вследствие действия капиллярных сил.

2. Собственно взаимодействие дисперсного вещества с водой:

— адсорбция воды и растворенных в ней веществ на поверхности твердого тела;

— растворение твердого тела с образованием истинных или коллоидных растворов;

— гидратация и гидролиз соединений, входящих в состав дисперсных материалов;

— образование заряженных слоев на границе раздела фаз «твердое тело — жидкость»;

— ионообменные взаимодействия твердого тела с растворенными в воде соединениями.

Ионный обмен при действии на силикатные материалы растворов солей и кислот рассматривается как доминирующий процесс. Эти представления широко используются при анализе химической устойчивости силикатных минералов, прежде всего стекол.

Применительно к вяжущим веществам представления об ионообменном взаимодействии используются в основном при анализе изоморфных

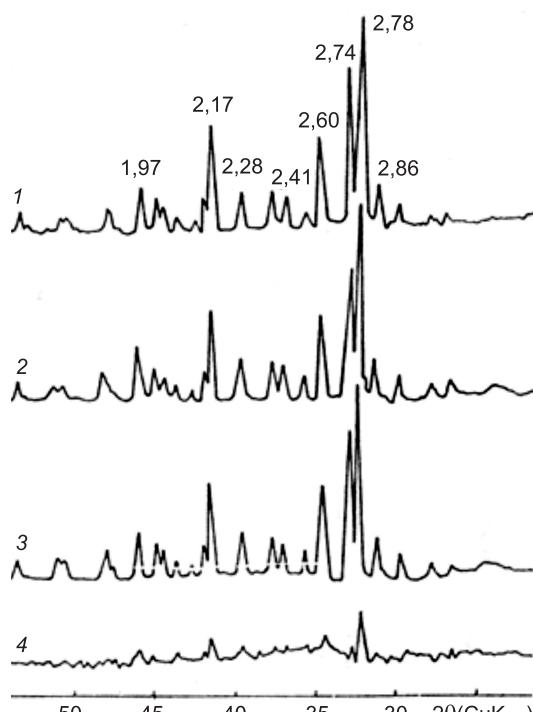


Рис. 2. Дифрактограмма образцов $\beta\text{-C}_2\text{S}$
 1 — в исходном состоянии, после 40 мин взаимодействия при 20 °C; 2 — с водой; 3 — с 0,1 М раствором HCl;
 4 — с 0,1 М раствором CrCl_3
 (θ — град., межплоскостные расстояния в 10^{-10} м)

замещений в структуре клинкерных минералов, осуществляемых в процессе синтеза цемента. Вместе с тем ионообменные процессы происходят и при гидратации цемента.

При взаимодействии с растворами солей возможность ионов твердого тела к обмену с ионами из раствора определяется особенностями его структуры. Из числа силикатов наиболее предрасположены к ионному обмену те, которые образованы изолированными тетраэдрами $[SiO_4]^{4-}$, связанными между собой через ионы металлов. К числу таких соединений относятся C_3S и $\beta\text{-}C_2S$ [4].

Ионный обмен между твердым телом и раствором может быть как изовалентным, так и гетеровалентным. Гетеровалентный изоморфизм осуществляется в соответствии с рядами, расположенными по диагоналям системы Д.И. Менделеева¹. Компенсация зарядов обеспечивается за счет числа обменивающихся ионов и сопровождается возникновением в кристаллической решетке вакансий или внедрением в нее дополнительных катионов. При этом ионы с более высокими зарядами легче входят в кристаллическую решетку, чем ионы с меньшим зарядом взамен многозарядных¹ [4].

Интенсивное протекание ионного обмена между ортосиликатом магния ($2MgO \cdot SiO_2$) и кипящими водными растворами солей алюминия и хрома показано ранее с использованием радиоактивных изотопов². При этом происходит гетеровалентный обмен:



В рассматриваемом случае экспериментальные результаты могут быть обусловлены протеканием гетеровалентного обмена ионов Ca^{2+} на ионы Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} . Обмен ионов Ca^{2+} на ионы Na^+ и K^+ будет затрудняться необходимостью вхождения дополнительных ионов в структуру твердого тела. Протекание ионного обмена приводит к изменению кристаллических решеток C_3S и $\beta\text{-}C_2S$. Оно настолько глубоко, что рефлексы исходных минералов не обнаруживаются на рентгенограммах. Аналогичная картина наблюдалась ранее на ортосиликате магния². Такие структуры А.Е. Ферсман называл мутабильными.

Интенсификация выхода ионов Ca^{2+} , изменение структуры минералов при наличии в воде затворения многозарядных катионов оказывают существенное влияние на процесс взаимодействия цемента с водой.

Это обуславливает более глубокое использование потенциальных возможностей цемента как вяжущего материала, повышение прочности цементного камня, восстановление активности цемента, утраченной, например, в случае его вынужденного длительного хранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Горчаков, Г.И. Строительные материалы [Текст] / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. — М. : Стройиздат, 1986. — 688 с.
- Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. — М. : Высш. школа, 1989. — 384 с.
- Бойкова, А.И. Изоморфные примеси в решетках клинкерных фаз — главный фактор их химической активации [Текст] / А.И. Бойкова // Цемент. — 1986. — № 9. — С. 3–7.
- Соболев, В.С. Введение в минералогию силикатов [Текст] / В.С. Соболев. — Львов : Изд-во Львов. ун-та, 1949. — 96 с.

¹ Ферсман А.Е. Геохимия. Л.: ОНТИХимтеорет, 1937. Т. III. 194 с.

² Бердов Г.И., Осицова Л.В., Мадзаева О.С. Взаимодействие керамики с растворами солей // Стекло и керамика. 1987. № 20. С. 21–22.

*БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*
*ИЛЬИНА Лилия Владимировна, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 10.09.12

Berdov Gennadiy Illich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Ilina Liliya Vladimirovna, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

INTERACTION SILIKATE CLINKER MINERALS FROM AQUEOUS ELECTROLYTE SOLUTION

The interaction of silicate clinker minerals (C_3S and C_2S) with aqueous solutions of salts, acids, alkalis, with a concentration of 0,01 to 0,1 M. We define the output of calcium ions in a solution of minerals and pH change of the solution. The essential change in the structure of minerals under the influence of the salt solutions with the charge of the cation of 3.

Key words: portland cement clinker, the normal storage, grain size analysis, mechanical strength, mineral supplements.

REFERENCES

1. Gorchakov, G.I. Construction materials [Text] / G.I. Gorchakov, Yu.M. Bazhenov. — M. : Stroyizdat, 1986. — 688 p.
 2. Kuznetsova, T.V. Physical chemistry of binders [Text] / T.V. Kuznetsova, I.V. Kudryashov, V.V. Timashev. — M. : Higher School, 1989. — 384 p.
 3. Boikova, A.I. Isomorphic impurities in lattices of clinker phases — the main factor of their chemical activation [Text] / A.I. Boikova // Cement. — 1986. — N 9. — P. 3–7.
 4. Sobolev, V.S. Introduction to mineralogy of silicates [Text] / V.S. Sobolev. — Lviv : Univ Lviv. University Press, 1949. — 96 p.
-

УДК 666.97.015

И.В. СТЕПАНЕНКО

ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ПОДВОДА ТЕПЛА

Исследован процесс структурообразования цементных систем в условиях контактного подвода тепла. Представлены технологические меры повышения свойств и однородности прогреваемого бетона (железобетона).

Ключевые слова: цементное тесто, бетоны, тепловая обработка, усадочные процессы, контракция, структурообразование, трещиностойкость, однородность бетонов, пленочный нагреватель, повторная вибрация.

Известно, что тепловой обработке железобетонных изделий, производимой путем контактного подвода тепла, свойственны как положительные (ускорение твердения, повышение обрачиваемости технологического оборудования и производительности линий и др.), так и негативные (недобор прочности, обезвоживание открытых поверхностей, трещинообразование бетона, неоднородность свойств конструкции по объему) аспекты. Безусловно, один из важнейших деструктивных факторов — неоднородность распределения теплового поля в массиве композита, соответственно неизбежен градиент тепломассообменных и экзотермических явлений [1, 2]. При этом особую роль играет различная интенсивность контракционных проявлений в различных микрообъемах цементного камня [3], приводящая к неравномерной усадке, нарушению сплошности твердеющего материала и микротрещинообразованию.

Одним из ярких параметров косвенной оценки контракционного эффекта, обеспечивающего изменение структурных связей цементной системы, является пластическая прочность. В связи с этим автором выполнен эксперимент, заключающийся в изучении кинетики структурообразования в характерных точках прогреваемого цементного материала.

Цель работы — уточнение взаимосвязи «температура — характер структурообразования» для более полного представления физической сущности деструктивных процессов и разработки соответствующих практических мер повышения свойств и однородности прогреваемого бетона (железобетона).

В качестве вяжущего использовали новороссийский ПЦ500-Д20 и обычную, питьевую воду. Применили приготовленное стандартным методом цементное тесто с $B/C = 0,26$ и $0,30$. Для проведения работ использовали специально изготовленную из экструдированного пенополистирола форму с внутренними размерами $350 \times 120 \times 100$ мм, оборудованную продольной греющей стенкой посредством пленочного нагревателя. Форма условно разделена по ширине на три зоны (2, 6 и 9 см от нагревателя) с вмонтированными беспроводными термохронами (с точностью замеров $\pm 0,2$ °C). Уложенное в форму, тщательно уплотненное на виброплощадке и накрытое полистирольной крышкой цементное тесто после

30-минутного¹ выдерживания прогревали по заданному контроллером температурному режиму. С интервалом 5 мин (с момента начала прогрева) коническим пружинным пластометром в комплекте с прессом ПСУ-10 по методике [4] через специально предусмотренное в крышке закрывающееся окно погружали конус и определяли величину пластической прочности. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

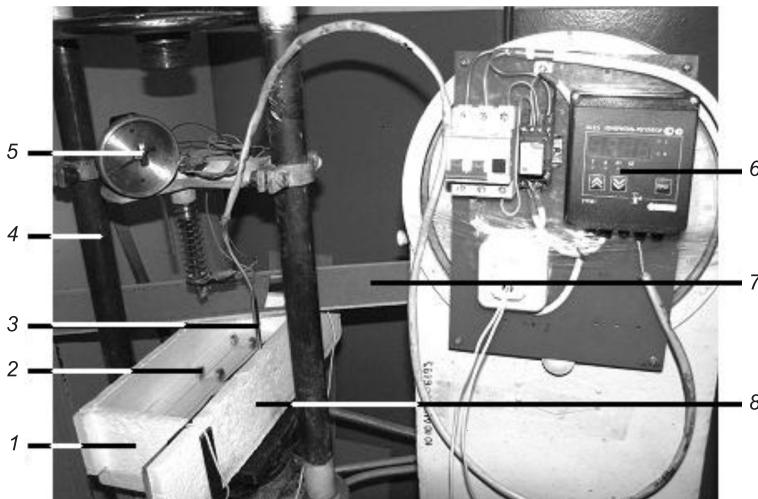


Рис. 1. Общий вид термопластометрической установки

1 — форма; 2 — термохрон; 3 — термопара контрольная; 4 — пресс гидравлический; 5 — пластометр пружинный; 6 — контроллер; 7 — крышка; 8 — стенка с нагревателем

Анализируя полученные результаты (рис. 2, 3), отметим:

1) даже при столь «тепличных» условиях эксперимента разброс температуры достигает 25...30 °C, причем через 1,5...2,0 ч прогрева устанавливался относительно стационарный температурный режим прогрева, обусловленный неизбежными и стабильными теплопотерями формы;

2) величина водозатворения, изменяя теплофизические свойства цементных составов, заметно влияет на режим прогрева, обеспечивая повышенные температурные параметры твердения вяжущего при низких значениях водоцементного фактора и наоборот;

3) просматривается вполне закономерная взаимосвязь влияния температуры на интенсивность структурообразования: в прилегающем к нагревателю слое наблюдаются значительно более высокая температура и скорость набора пластической прочности по сравнению с удаленными зонами;

4) пластограммы имеют восходящий вид с отчетливо выраженными переломными точками, свидетельствующими о протекающих в данные моменты быстротечных структурных перестройках, что вполне согласуется с положением о стадийном характере твердения цементных систем²;

5) стадийность потребления цементными минералами порций воды затворения приводит к развитию в межзерновых пустотах вакуума, опре-

¹ Продолжительность предварительного выдерживания цементных составов принята применительно к технологии объемных элементов на Краснодарском ЗАО «ОБД».

² Пшеничный Г.Н. Хроническая проблема бетоноведения // Техника и технология силикатов. 2011. Т. 18, № 3. С. 4–11.

деляющего стяжение клинкерных частиц, что и регистрируется моментами «лавинообразного» упрочнения системы;

6) имеющий место температурный перепад по объему прогреваемого контактным методом бетона связан с различной интенсивностью гидратационных процессов в различных зонах композита, градиентом усадочных деформаций и микротрецинообразованием.

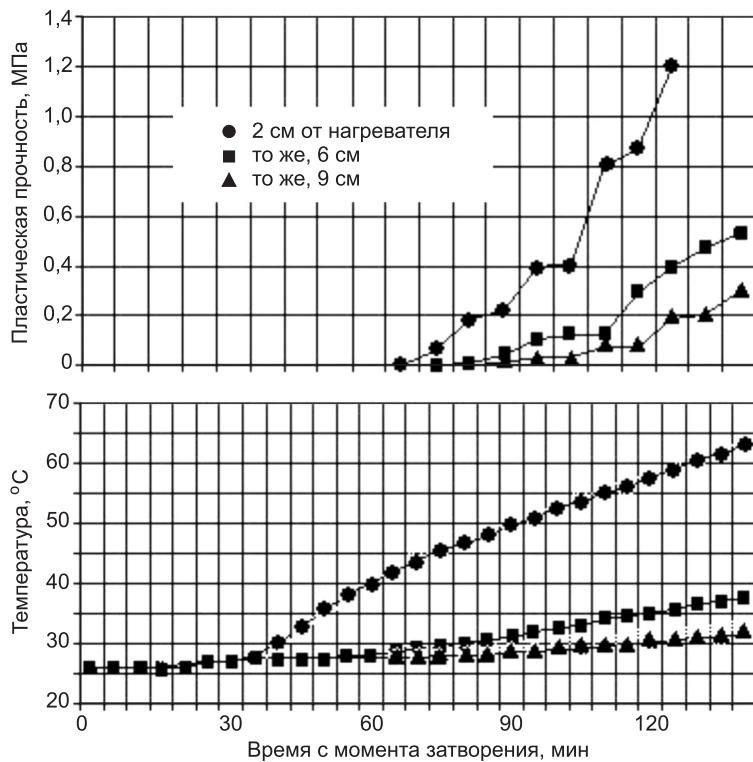


Рис. 2. Кинетика пластической прочности и температуры в различных зонах прогреваемого образца с $B/C = 0,26$

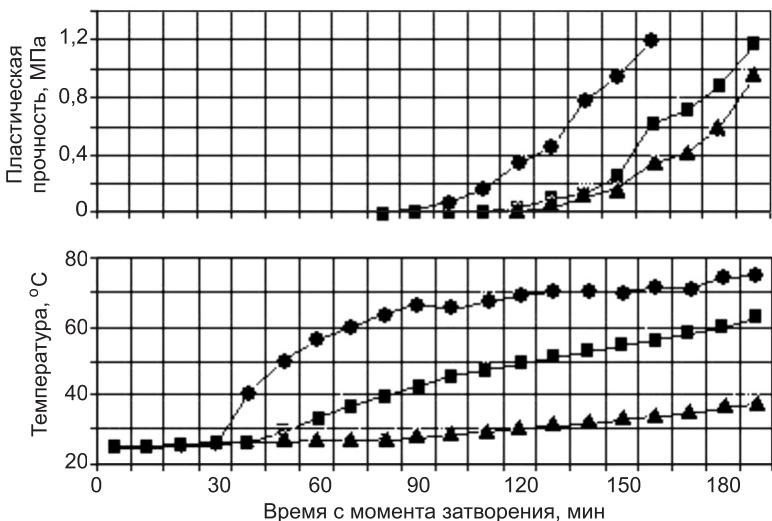


Рис. 3. Кинетика пластической прочности и температуры в различных зонах прогреваемого образца с $B/C = 0,30$

Услов. обозн. см. на рис. 2

Таким образом, наряду с вышеотмеченными массообменными и экзотермическими явлениями огромную деструктивную роль в снижении прочности прогреваемого бетона играют неравномерно протекающие гидратационные, структурообразующие и усадочные процессы, соответственно образование микротрещин. Для повышения прочности и однородности бетонов следует использовать комплекс технологических приемов, способствующих снижению величины температурных неоднородностей при тепловой обработке (использование двустороннего подвода тепла, разработка системных контроллеров теплового поля, разработка моделей передачи тепла в зависимости от параметров бетонной смеси). Особое внимание следует уделять силовым активационным приемам, например, повторному (циклическому) вибрированию, позволяющему частично «затечить» неизбежные микродефекты и существенно повысить прочность контактной зоны бетонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов, С.А. Ускорение твердения бетона [Текст] / С.А. Миронов, Л.А. Малинина. — М. : Стройиздат, 1964. — 347 с.
2. Заседателев, И.Б. Тепло-массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений [Текст] / И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов. — М. : Стройиздат, 1973. — 168 с.
3. Малинина, Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона [Текст] / Л.А. Малинина. — М. : Стройиздат, 1977. — 160 с.
4. Пшеничный, Г.Н. Пластометр пружинный [Текст] / Г.Н. Пшеничный, В.П. Ганин, Г.А. Шкатуло // Бетон и железобетон. — 1985. — № 4. — С. 26.

СТЕПАНЕНКО Иван Викторович, асп.

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

Получено 09.07.12

Stepanenko Ivan Viktorovich, post-graduate student, Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia

HARDENING OF CONCRETE IN CONDITIONS OF CONTACT HEAT INPUT

The process of structure formation in cement systems, the contact heat input. Presents technological measures to improve the properties and the homogeneity of the heated concrete (concrete).

Key words: cement paste, concrete, heat treatment, shrinkage processes, contraction, structure, fracture toughness, homogeneity of concrete, a film heater, re-vibration.

REFERENCES

1. Mironov, S.A. Acceleration of concrete hardening [Text] / S.A. Mironov, L.A. Malinina. — M. : Stroyizdat, 1964. — 347 p.
2. Zasedatelev, I.B. Heat-mass transfer in concrete specialty industrial facilities [Text] / I.B. Zasedatelev, V.G. Petrov-Denisov. — M. : Stroyizdat, 1973. — 168 p.
3. Malinina, L.A. Heavy steam curing of concrete [Text] / L.A. Malinina. — M. : Stroyizdat, 1977. — 160 p.
4. Pshenichnyi, G.N. Plastometer spring [Text] / G.N. Pshenichnyi, V.P. Ganin, G.A. Shkatulo // Concrete and reinforced concrete. — 1985. — N 4. — P. 26.

УДК 691.33:621.311.22:697.34

Г.И. ОВЧАРЕНКО, Д.И. ГИЛЬМИЯРОВ, А.В. ВИКТОРОВ, Н.А. ФОК

**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ
КИСЛЫХ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ
В СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Предложена новая технология переработки кислых золошлаковых отходов ТЭЦ с повышенным содержанием недогоревшего угля с обезвоживанием пульпы из ГЗУ, грануляцией и дожиганием золошлаков в котлах кипящего слоя с возвратом воды и тепла на ТЭЦ, с получением качественного минерального сырья, которое может применяться для изготовления различных качественных строительных материалов. Данна экономическая оценка реализации новой технологии.

Ключевые слова: кислые золошлаки ТЭЦ, обезвоживание, грануляция, дожигание, строительные материалы.

Использование зол и золошлаковых отходов (ЗШО) ТЭЦ во многих странах мира превышает 40–60 % от их выхода. В Китае распространено строительство заводов при ТЭЦ по полной переработке ЗШО в строительные материалы. В России объем перерабатываемых золошлаковых материалов не превышает 10 % от их текущего выхода. Причины такого положения дел в России — многочисленны. Одна из главных заключается в широком распространении ТЭЦ малой и средней мощности с системой улавливания золы в скрубберах (мокрые циклоны), после которых можно отбирать либо золошлаковую пульпу с коэффициентом разбавления водой около 100 из систем гидрозолоудаления (ГЗУ), либо золошлаковую смесь из отвала с влажностью более 40 %, представляющую собой грязеподобный налипающий продукт. Оба варианта сложны и неэффективны.

Не менее важной причиной является высокое содержание в таких золошлаках недогоревшего ококсованного угля, называемого энергетиками мхнедожогом или потерями при прокаливании (п.п.п.). Эта величина для ЗШО указанных ТЭЦ достигает 25–30 %, составляя в среднем 15–20 % [1], что не позволяет использовать эти отходы в качестве минерального сырья для производства различных строительных материалов.

Широкое использование ЗШО ТЭЦ в России сегодня становится все более актуальной задачей, так как перевод энергетического комплекса на рыночные отношения заставляет собственников ТЭЦ снижать тарифы на электрическую и тепловую энергию, а значит снижать многочисленные издержки, в том числе по содержанию систем ГЗУ, золоотвалов, оборотного водоснабжения, «экологическим» выплатам и т.п.

Цель настоящей работы — предложить технологическую схему переработки золошлаковых отходов, обеспечивающую снижение издержек ТЭЦ и получение качественного минерального сырья для производства различных строительных материалов.

Оценку состава и свойств ЗШО осуществляли для отходов ТЭЦ Барнаула, Бийска, Рубцовска, сжигающих кузнецкий каменный уголь марки

© Овчаренко Г.И., Гильмияров Д.И., Викторов А.В., Фок Н.А., 2012

СС и в целом характеризующих сложившуюся ситуацию в Сибири. В золоотвале Барнаульской ТЭЦ-2 находятся отходы с содержанием п.п.п. от 8 до 26,9 % (см. таблицу) со среднегодовым количеством мхнедожога в 19,5 % по отчету ТЭЦ-2 за 2009 г. Аналогичная картина наблюдается и для ТЭЦ Бийска и Рубцовска. Количество шлаковой составляющей в этих отходах не превышает 5 % и это не влияет на содержание п.п.п. в материале.

Химический состав использованных зол и золошлаков ТЭЦ-2

Наименование материала	Потери при прокаливании (п.п.п.)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Сумма
1. ЗШО ТЭЦ-2 проба 2	26,87	44,43	18,38	1,81	4,64	1,29	0,57	96,87
2. ЗШО ТЭЦ-2 проба 2 после прокаливания	—	54,38	26,28	6,87	5,16	1,36	0,57	95,16
3. ЗШО ТЭЦ-2 проба 3	25,12	46,28	18,97	1,18	2,94	0,73	0,41	95,63
4. ЗШО ТЭЦ-2 проба 3 после прокаливания	—	58,07	26,89	6,71	4,25	0,27	0,16	96,35
5. КУЗ ТЭЦ-2	8,32	56,10	21,16	6,06	4,38	0,90	0,98	97,90
6. Шлак ТЭЦ-2	0,30	62,12	23,21	9,28	3,53	1,06	0,30	99,80

Примечание. КУЗ — каменноугольная зола, отобранная после скруббера.

Оценку влияния содержания п.п.п. в ЗШО на свойства строительного материала рассматривали на примере известково-зольного силикатного кирпича, полученного по стандартной автоклавной технологии (рис. 1).

Зольная составляющая разбавлялась молотым шлаком ТЭЦ-2 для получения кислого компонента с разным содержанием п.п.п. В эксперименте использовалась кальциевая известь с содержанием активных CaO и MgO около 90 %. В качестве контроля выступали заводские известково-кварцевые образцы.

Как видно из рис. 1, уже при 5 % содержания п.п.п. в золошлаках прочность материала падает в 1,6–1,8 раза, а при 10 % — в 2,5 раза. И только полное выжигание угольных остатков при 800 °C и дополнительный помол прокаленных золошлаков позволяют получить материал с высокими строительно-техническими свойствами, превышающими контрольный состав (рис. 2). Аналогичные результаты получены нами и при использовании прокаленных ЗШО в качестве активной минеральной добавки для цементов и бетонов.

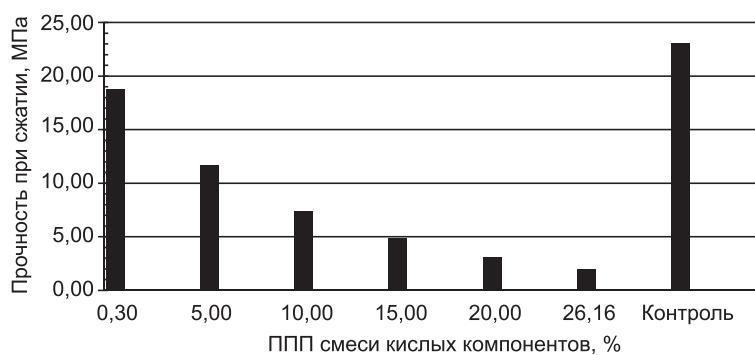


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии кирпича от п.п.п. кислого компонента

$$z = 0,00159 \cdot x \cdot y + 0,19502 \cdot x + 4,69 \cdot y - 11,913 - 0,99 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 0,18425 \cdot y^2$$

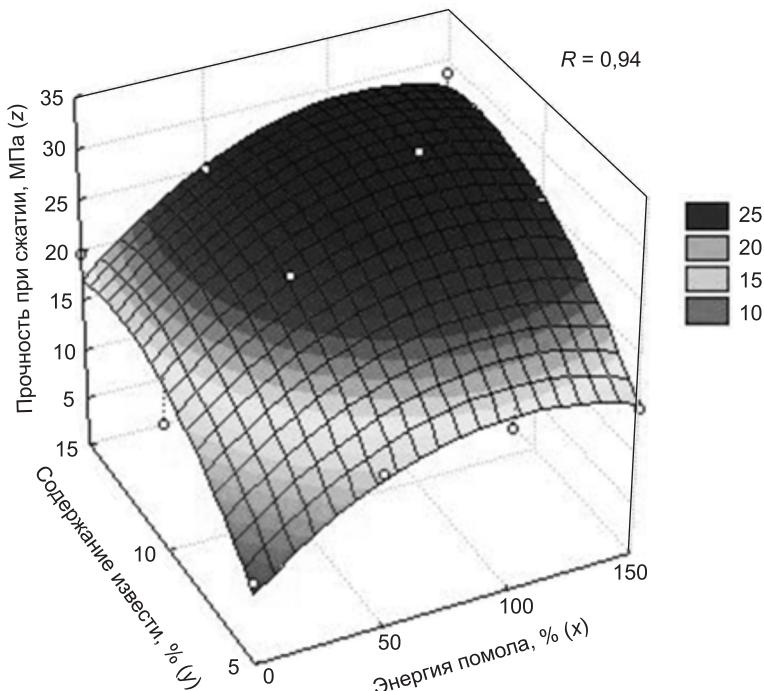


Рис. 2. Зависимость прочности составов из прокаленной пробы ЗШО с начальным содержанием п.п.п. = 26,87 % от энергии помола сырья и содержания извести (за 100 % приняты затраты энергии на помол смеси клинкера и гипса до тонкости выпускаемого заводом цемента)

Таким образом, образующиеся на тепловых станциях отходы от сжигания каменного угля с любым содержанием п.п.п. целесообразно прокаливать и желательно молоть для эффективного использования их в производстве различных строительных материалов.

Для того чтобы передел прокаливания не был затратным, рассмотрен вариант дожигания золошлаков ТЭЦ в котлах кипящего слоя с получением дополнительной тепловой энергии, которую можно вернуть на ТЭЦ, либо использовать в технологии получения строительного материала.

В настоящее время технология дожигания топливосодержащих отходов в котлах кипящего слоя достаточно широко внедрена и только в Барнауле существуют три организации по проектированию и строительству таких котельных установок. Для устойчивой работы котла необходима калорийность отхода в пределах 1,5–1,8 ккал / кг (6,3–7,5 кДж / кг) и формирование его в виде гранул до 5–7 мм в диаметре. Часто в ЗШО содержание п.п.п. достаточно для устойчивой работы котла. В случае низкого содержания мехнедожога в отходе в схеме предусматривается дополнительное введение молотого угля в пределах 10–15 %. Особенность работы котла кипящего слоя заключается в том, что в нем температура горения не превышает 800 °С и топливо выгорает до содержания не более 0,5 %.

Нами исследованы варианты связок для грануляции ЗШО в виде угля, суглинка, извести, жидкого стекла. Эксперименты показали, что кроме угля все остальные связки могут с успехом применяться для этого передела [2].

Целесообразным условием реализации данной технологии является расположение передела грануляции и дожигания ЗШО вблизи ТЭЦ. Это предполагает обезвоживание золошлаковой пульпы из ГЗУ рядом с ТЭЦ и направление воды в коротком цикле обратно на ТЭЦ. Сегодня рассматриваемые станции работают без оборотного водоснабжения и затрачивают дополнительные средства на воду (более 10 млн м³ в год для средней ТЭЦ), которая, фильтруясь через золоотвалы, загрязняет Обь и другие реки.

Несмотря на большое разбавление ЗШО в ГЗУ водой, сегодня существуют эффективные технологии по обезвоживанию таких материалов до влажности не более 30 %, включающие, как правило, радиальные отстойники и фильтр-пресссы. Продвинутые в этих технологиях страны (например, Испания) готовы поставить комплект такого оборудования на ТЭЦ стоимостью не более 50 млн руб. Следует заметить, что если оплачивать воду для ГЗУ по расценкам ЖКХ, то она для ТЭЦ-2 будет стоить более 100 млн руб. в год.

Таким образом, предлагаемая технология должна содержать следующие переделы:

- 1 — обезвоживание золошлакового шлама из ГЗУ с получением кека влажностью не более 30 % и возвратом осветленной воды на ТЭЦ;
- 2 — грануляция кека ЗШО с добавками — связками и углем;
- 3 — дожигание гранулята в котлах кипящего слоя с возвратом тепла на ТЭЦ или в технологии производства стройматериалов;
- 4 — производство стройматериалов из качественного минерального сырья (рис. 3).

Полученные от производителей коммерческие предложения на поставку и монтаж оборудования, а также собственные экономические выкладки показывают следующие затраты на реализацию подобной схемы для ТЭЦ с выходом золошлаков около 200 тыс. т и сточных вод ГЗУ около 10 млн м³ в год:

1. Стоимость оборудования испанских производителей для обезвоживания золошлаков из ГЗУ — 50 млн руб.

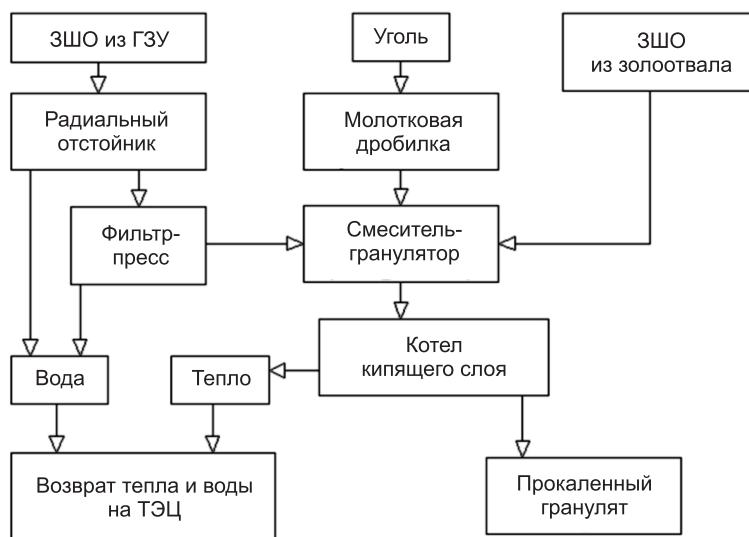


Рис. 3. Технологическая схема переработки кислых золошлаковых отходов ТЭЦ в качественное минеральное сырье

2. Ориентировочная стоимость оборудования для передела грануляции и дожигания (котлы кипящего слоя) — 50 млн руб.

3. Стоимость оборудования завода силикатного кирпича производительностью 60 млн шт. условного кирпича в год (Китай) — 120 млн руб.

Таким образом, ориентировочные затраты на оборудование составляют 220 млн руб. и на половину компенсируются ежегодной платой за воду. Появляется дополнительная продукция в объеме около 60 млн шт. силикатного кирпича, которая может обеспечить прибыль около 50–60 млн руб. в год. При этом уменьшаются затраты на содержание системы ГЗУ, золоотвала и экологические платежи.

Выводы. 1. Предложена технологическая схема по переработке зошлаковых отходов ТЭЦ из ГЗУ и золоотвалов с их обезвоживанием и дожиганием мхнедожога, а также их эффективным дальнейшим использованием в качестве сырья для производства стройматериалов.

2. Предложенная технология позволяет отказаться от протяженных трасс ГЗУ, обеспечить водооборот стоков, законсервировать золоотвалы и переработать находящиеся в них зошлаки с получением дополнительного тепла и качественного минерального сырья.

3. Оценена стоимость оборудования для реализации предложенной технологии, которая показывает возможность того, что проект может окупиться за 2–3 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко, Г.И. Переработка кислых зол и зошлаков ТЭЦ в силикатный кирпич [Текст] / Г.И. Овчаренко, Н.А. Фок, Д.И. Гильмияров // Ползуновский вестник. — 2011. — № 1. — С. 148–152.
2. Фок, Н.А. Исследование различных видов связок на процесс грануляции зошлаков [Текст] / Н.А. Фок, Д.И. Гильмияров, А.А. Михайлена // Ползуновский вестник. — 2012. — № 1/2. — С. 109–113.

ОВЧАРЕНКО Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: egogo1980@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

ГИЛЬМИЯРОВ Данил Игоревич, асп.; E-mail: dan7658@yandex.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

VIKTOROV Artem Viktorovich, асп.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

ФОК Наталья Анатольевна, асп.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 18.09.12

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: egogo1980@mail.ru, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Gilmiyarov Danil Igorevich, post-graduate student; E-mail: dan7658@yandex.ru, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Viktorov Artem Viktorovich, post-graduate student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Fok Natalia Anatolyevna, post-graduate student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

NEW TECHNOLOGY OF PROCESSING OF THE ACIDIC SLAG-ASHES WASTE OF THERMAL POWER STATION IN CONSTRUCTION MATERIALS

The new technology of processing of the acidic slag-ashes waste of thermal power station with the high content of not burned down coal with pulp water removal from drains, granulation and reburning of the slag-ashes waste in a boiler fluid bed with water and heat return to power station, with production high-quality mineral raw materials which can be applied to manufacturing of various quality construction materials is offered. The economic mark of realization of new technology is given.

Key words: acidic slag-ashes waste of thermal power station, water removal from drains, granulation, reburning, construction materials.

REFERENCES

1. Ovcharenko, G.I. Processing of the acidic ashes and slag-ashes of thermal power station in the silicate brick [Text] / G.I. Ovcharenko, N.A. Fok, D.I. Gilmiyarov // Polzunovsky vestnik. — 2011. — N. 1. — P. 148–152.
 2. Fok, N.A. Research of influence of various types of binding on process of granulation ash-slag materials [Text] / N.A. Fok, D.I. Gilmiyarov, A.A. Mikhaylenko // Polzunovsky vestnik. — 2012. — N 1/2. — P. 109–113.
-

УДК 691.4.002.3

И.В. КОВКОВ, В.З. АБДРАХИМОВ, А.В. КОЛПАКОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ АЛЮМОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

Использование алюмосодержащих отходов, содержащих Al_2O_3 более 50 %, в керамических массах способствует образованию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и муллита, которые повышают физико-механические и химические свойства изделий. Использование алюмосодержащих отходов, содержащих Al_2O_3 менее 30 %, в керамических массах не способствует образованию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, но способствует образованию муллита. При использовании алюмосодержащих отходов, содержащих повышенное количество щелочей ($\text{R}_2\text{O} > 11 \%$), не образуется кристобалит, который отрицательно действует на физико-механические показатели керамических композиционных материалов.

Ключевые слова: керамический композиционный материал, алюмосодержащие отходы, фазовый состав, рентгенограммы, корунд, муллит, кристобалит, диопсид, монтичеллит, аортит, оксид хрома, кварц, жидккая фаза.

В производстве керамических строительных материалов вопросу фазового состава, спеканию и физико-химическим процессам при обжиге изделий придается особое значение, так как именно они определяют главным образом эксплуатационные свойства изделий. Физико-механические и химические свойства керамических материалов зависят от фазового состава, а именно от содержания в изделиях стеклофазы, муллита, волластонита, аортита, гематита, магнетита, кристобалита, кварца и других минералов.

Керамические строительные материалы по структуре представляют собой композиционные материалы со стекловидной аморфной непрерывной фазой — матрицей, наполненной мелкими кристаллами муллита, кристобалита и др., средний размер которых в кислотоупорах равен $1\text{--}2 \cdot 10^{-6}$ м, а толщина прослоек стеклофазы не превышает $1\text{--}2 \cdot 10^{-7}$ м [1]. Объем кристаллических фаз в композиционных керамических материалах достигает 75–85 %.

Физико-химические процессы структурообразования в композиционных керамических материалах с применением техногенного сырья существенно отличаются от аналогичных процессов, происходящих при использовании традиционного природного сырья. Эти отличия обусловлены наложением дополнительных эффектов на известные, в связи с чем чрезвычайно осложняют исследование новых материалов и требуют более подробного изучения используемого техногенного сырья.

Цель работы: исследование фазового состава керамических композиционных материалов из алюмосодержащего техногенного сырья без применения природных традиционных материалов.

Введение в составы керамических масс алюмосодержащих отходов, за счет повышенного содержания в них Al_2O_3 , позволяет значительно по-

высить кислотостойкость, термостойкость и морозостойкость керамических композиционных материалов [2–4].

В настоящей работе для получения керамического композиционного материала в качестве глинистого компонента использовалась глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд¹, а в качестве алюмосодержащих отощителей: алюмосодержащие шлаки от производства металлического хрома; шлаки от выплавки безуглеродистого феррохрома²; шлаки от выплавки ферротитана³; шлам производства травления алюминия⁴; алюмосодержащий шлам, получаемый при очистке стоков производств этил- и изопропилбензола⁵; шлам никельскелетного катализатора⁶; отработанный катализатор ИМ-2201⁷; алюмохромистые отходы травления алюминиевых сплавов и обожженных солевых алюминиевых шлаков, химический состав которых представлен в табл. 1.

Керамическую массу из составов, представленных в табл. 2, готовили пластическим способом при влажности 20–22 %, из которой формовали образцы размером 100×100×10 мм. Образцы высушивали до остаточной влажности не более 5 %, а затем обжигали при температуре 1100 °С. Физико-механические свойства образцов представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, с повышением в составах керамических масс оксида алюминия и щелочей механическая прочность образцов увеличивается; термостойкость образцов увеличивается с повышением оксида алюминия и уменьшением щелочей; водопоглощение снижается с увеличением в составах щелочей и уменьшением оксида алюминия.

Рентгенофазовый состав керамических составов № 1–9 определялся на дифрактометре ДРОН-6 с использованием СоKa-излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град./мин. На рисунке представлены рентгенограммы образцов из составов № 1–9.

На дифрактограмме порошка состава № 1 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,160; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и 0,348 нм), присутствие линий ($d/n = 0,181; 0,217$ и 0,363 нм) обусловлено Cr_2O_3 , линии кварца ($d/n = 0,185; 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и 0,458 нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии гематита ($d/n = 0,243; 0,251$ и 0,269 нм), линии кристобалита

¹ Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование отходов обогащения цветной металлургии в производстве кислотоупорных изделий // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2004. № 4. С. 13–19.

² Пат. № 2430064 Российская Федерация. RU. МПК C04B 33/138. Керамическая масса для получения кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.К. Семенычев, В.З. Абдрахимов. Опубл. 27.09.2011. Бюл. 27.

³ Пат. № 2430063 Российской Федерации. RU. МПК C04B 33/138. Керамическая масса для получения кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.К. Семенычев, В.З. Абдрахимов. Опубл. 27.09.2011. Бюл. 27.

⁴ Пат. № 2443654 Российской Федерации. RU. МПК C04B 33/132. Керамическая масса для изготовления клинкерных керамических изделий / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. Опубл. 27.02.2012. Бюл. 6.

⁵ Пат. № 2387613 Российской Федерации. RU. МПК C04B 33/132. Керамическая масса для получения кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. Опубл. 27.04.2010. Бюл. 12.

⁶ Пат. № 2410355 Российской Федерации. RU. МПК C04B 33/132. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича / В.З. Абдрахимов, И.В. Ковков. Опубл. 27.04.2010. Бюл. 12.

⁷ Абдрахимов В.З. Экологические и практические аспекты использования высоко-глиноземистых отходов нефтехимии в производстве кислотоупоров // Новые огнеупоры. 2010. № 1. С. 40–43.

Таблица 1

Химические составы алюмосодержащих отходов производств

Отход	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	П.п.п.
1. Алюмосодержащие шлаки от производства металлического хрома	4–5	70–75	—	1–2	5–7	—	5–7	2–4	—
2. Шлаки от выплавки безуглеродистого феррохрома	5,6	54,8	—	1,85	13,8	14,7	5,3	2,3	—
3. Шлаки от выплавки ферротитана	2,4	72,06	10,3	0,34	11,4	3,5	—	—	—
4. Шлам производства травления алюминия (Самарский металлургический завод)	4,4	59–80	—	2,8	2–5	1–2	—	0,5–5	8–15
5. Алюмосодержащий шлам, получаемый при очистке стоков производств этил- и изопропилбензола	2,3	63,1	—	1	4,4	4,2	—	17,2	5,3
6. Шламы никельскелетного катализатора	5,2	26,7	—	0,8	2,9	1,3	—	24,7	37,1
7. Отработанный катализатор ИМ-2201	8,40	74,5	—	0,75		0,50	14,5	0,47	—
8. Алюмохромистые отходы травления алюминиевых сплавов	7,3	68,4	—	1,5	—	0,7	10,2	11,8	—
9. Обожженные солевые алюминиевые шлаки	4,55	75,1	—	1,6	2,56	7,61	—	5,13	3,45
10. Глинистая часть «хвостов» гравитации	57,04	21,39	1,9	6,21	2,02	1,42	—	1,82	7,04

Таблица 2

Составы керамических масс с использованием алюмосодержащих отходов производств

Компонент	Содержание компонентов, мас. %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Алюмосодержащие шлаки от производства металлического хрома	40								
2. Шлаки от выплавки безуглеродистого феррохрома		40							
3. Шлаки от выплавки ферротитана			40						
4. Шлам производства травления алюминия				40					
5. Алюмосодержащий шлам, получаемый при очистке стоков производств этил- и изопропилбензола					40				
6. Шламы никельскелетного катализатора						40			
7. Отработанный катализатор ИМ-2201							40		
8. Алюмохромистые отходы травления алюминиевых сплавов								40	
9. Обожженные солевые алюминиевые шлаки									40
10. Глинистая часть «хвостов» гравитации	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Таблица 3

Физико-механические свойства керамических материалов из полученных составов

Показатель	Состав керамических масс								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Механическая прочность на сжатие, МПа	52,8	43,6	47,8	51,1	42,4	47,5	50,8	45,7	53,4
Термостойкость, циклы	9	6	8	8	3	2	10	5	7
Водопоглощение, %	5,3	5,1	6,4	5,1	3,1	2,5	6,2	3,8	4,9

($d/n = 0,2834; 0,313$ и $0,403$ нм), линии анортита ($d/n = 0,321; 0,375$ и $0,483$ нм).

Несмотря на то, что в литературе было описано большое количество полиморфных модификаций оксида алюминия, в настоящее время достоверно доказано существование только двух α - и γ -модификаций [3]. В составе неметаллических включений присутствует обычно высокотемпературная α -модификация, которая является аналогом природного минерала корунда. Температура плавления корунда 2050 °C, превращение низкотемпературной γ - в α -модификацию происходит при температурах выше 1000 °C.

В составе алюмосодержащих шлаков от производства металлического хрома повышенное содержание щелочных R_2O и щелочноземельных RO оксидов (см. табл. 1), которые в первую очередь взаимодействуют с SiO_2 , поэтому после охлаждения керамического композиционного материала вся система будет обогащаться корундом и обедняться муллитом, так как часть SiO_2 , которая должна бы пойти на образование муллита, будет связана в стекловидной фазе [4].

Корунд в отличие от муллита снижает термическую стойкость, но в то же время повышает механическую прочность и морозостойкость керамических композиционных материалов.

Из всех известных оксидов хрома в составе неметаллических включений наиболее часто встречается оксид хрома Cr_2O_3 [3]. Температура плавления оксида хрома 2150 – 2430 °C. Оксид хрома обладает высокой химической стойкостью, в кислотах и щелочах не растворяется. Стандартные реактивы, применяемые для травления, не действуют.

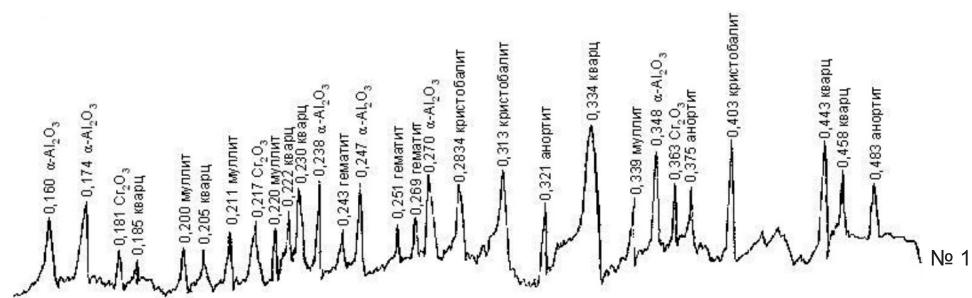
Муллит — единственное устойчивое соединение в системе Al_2O_3 – SiO_2 . Силлимант и андалузит ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) стабильны только в земной коре, а при нагревании распадаются на муллит и кремнезем [3]. Муллит — один из часто встречающихся минералов в обожженных керамических материалах. Высокие показатели по огнеупорности, плотности, химической стойкости и механической прочности привлекли внимание исследователей как к получению синтетического муллита, так и исследованию его структуры^{8–10}.

Гематит является самым низкотемпературным оксидом железа, поэтому он может образовываться в области низких температур (ниже

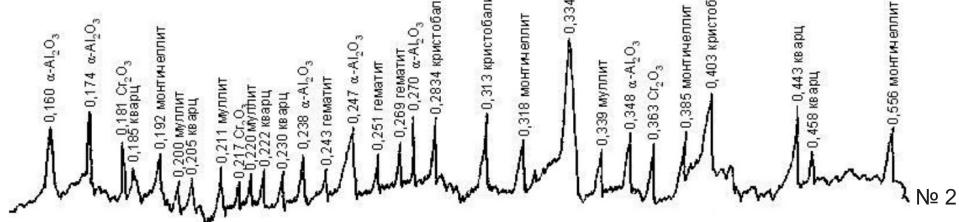
⁸ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Исследование кристаллизации муллита при обжиге кислотоупоров // Новые огнеупоры. 2012. № 4. С. 39–45.

⁹ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Формирование муллита при обжиге кислотоупоров // Материаловедение. 2003. № 4. С. 26–31.

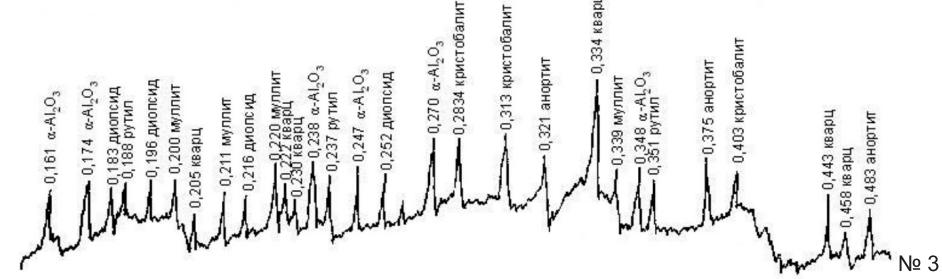
¹⁰ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Синтез муллита из техногенного сырья и пириофиллита // Журнал неорганической химии. РАН. 2007. Т. 52, № 3. С. 395–400.



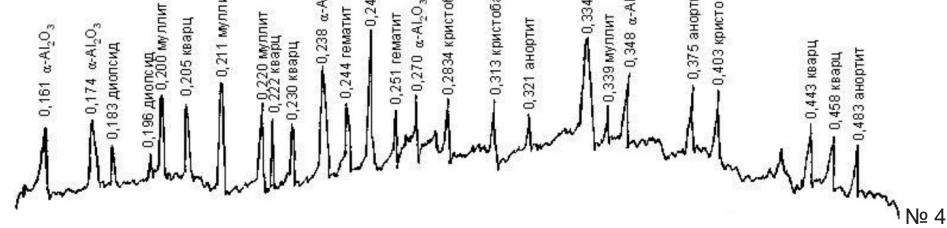
№ 1



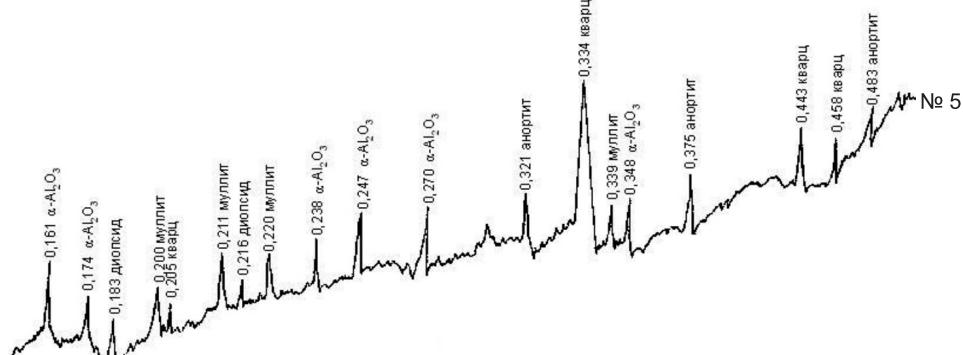
№ 2



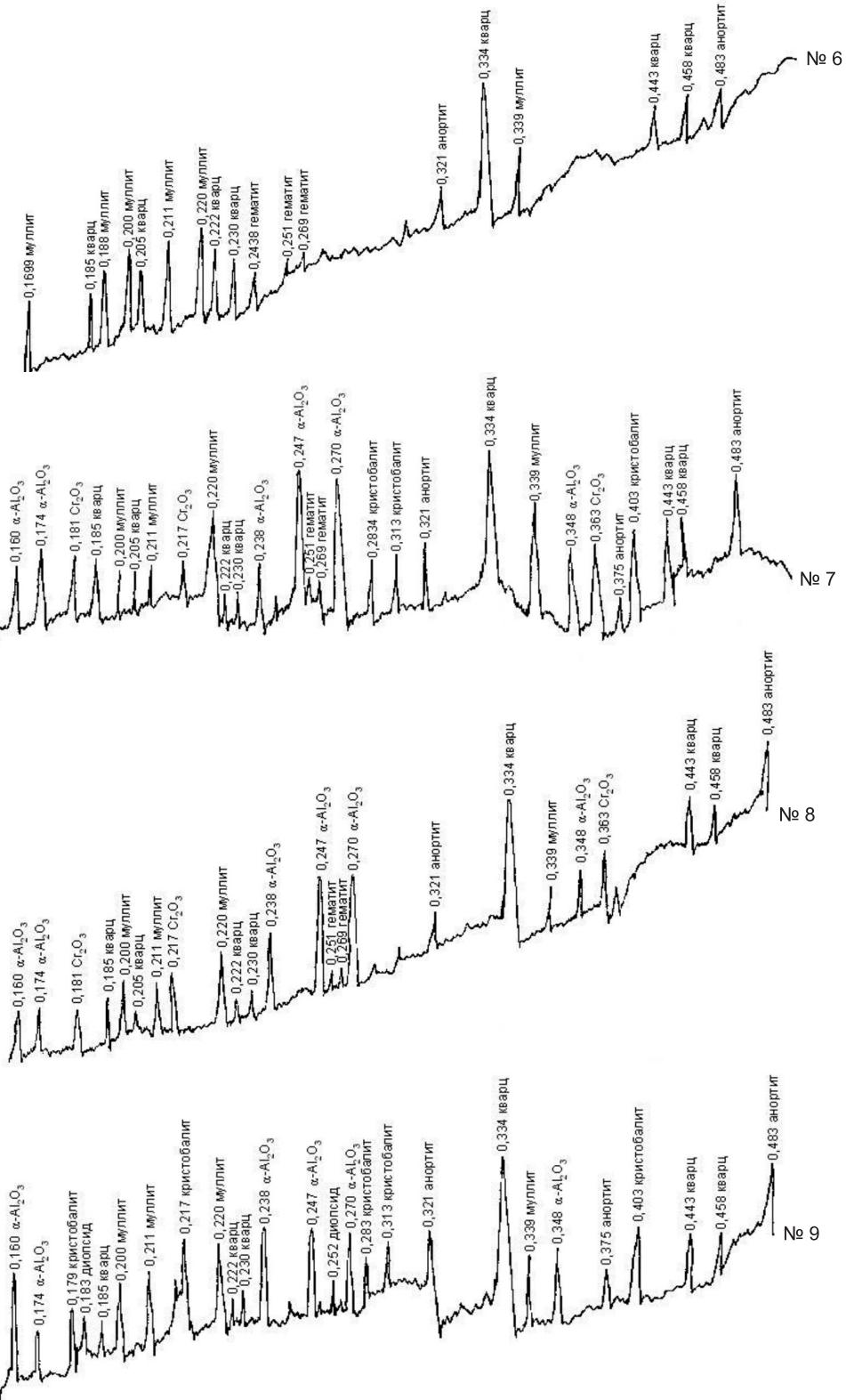
№ 3



№ 4



№ 5



Рентгенограммы составов № 1–9

500 °C) [3]. При температуре 550 °C происходит потеря магнитных свойств и изменение решетки, что связано с переходом β -фазы в устойчивую α -форму. Гематит в керамических материалах способствует образованию железистого стекла, которое инициирует образование муллита¹¹.

Содержание кристобалита снижает механическую прочность изделий, а образование его из аморфного кремнезема, выделившегося в результате муллитизации, обусловливает проницаемость изделий¹². В связи с этим необходимо найти способы регулирования процессов фазообразования, происходящих при обжиге керамических изделий, в частности, найти способы устранения процесса формирования кристобалита в плотноспекшихся керамических изделиях¹³.

Объемный эффект при переходе α -кварца в α -кристобалит составляет 15,4 %, что способствует разрыхлению поверхности кристаллической решетки¹². У разрыхленных и богатых дефектами, а также аморфных веществ, твердофазовые реакции протекают быстрее благодаря ускоренной самодиффузии и гетеродиффузии^{12, 13}.

Анортит — полевой шпат $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, являющийся конечным членом плагиоклазов, обладает всеми свойствами, присущими полевошпатовым минералам, и в составе неметаллических материалов встречается только в устойчивой модификации [3]. Процессы формирования кристаллических новообразований анортита и его влияние на рост прочности при обжиге керамических материалов в литературе встречаются недостаточно¹².

На дифрактограмме порошка состава № 2 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,160; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линий ($d/n = 0,181; 0,217$ и $0,363$ нм) обусловлено Cr_2O_3 , линии кварца ($d/n = 0,185; 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии гематита ($d/n = 0,243; 0,251$ и $0,269$ нм), линии кристобалита ($d/n = 0,2834; 0,313$ и $0,403$ нм), линии монтichelлита ($d/n = 0,192; 0,318; 0,385$ и $0,556$ нм), анортит в данном составе не образуется.

Образование монтichelлита ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) при обжиге образцов из состава № 2 связано с повышенным содержанием в шлаках от выплавки безуглеродистого феррохрома оксида магния ($\text{MgO} = 14,7\%$, см. табл. 1).

Монтichelллит принадлежит к обширной группе оливинов, представляющих собой ортосиликаты двухвалентных металлов, образующих между собой непрерывные ряды твердых растворов. В составе неметаллических включений встречается довольно часто [3]. Температура плавления монтichelлита 1300 °C. Монтichelллит образуется в силикатных расплавах, богатых оксидами магния и кальция. В значительных количествах присутствует в основных доменных, феррохромовых и сталеплавильных (преимущественно мартеновских) шлаках. Процессы формирования кри-

¹¹ Абдрахимов В.З. Исследование роли оксида железа на формирование фазового состава при обжиге керамических композиционных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 9. С. 40–44.

¹² Абдрахимов В.З. Исследование влияния железосодержащего традиционного природного и техногенного сырья на спекание керамических материалов. Влияние ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} на образование низкотемпературного муллита. Самара: Самар. гос. архит.-строит. ун-т, 2009. 356 с.

¹³ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов А.В., Абдрахимов В.З. Полиморфные превращения SiO_2 в глинистых материалах различного химико-минералогического состава // Материаловедение. 2002. № 7. С. 35–41.

сталлических новообразований монтичеллита (как и аортита) и его влияние на рост прочности при обжиге керамических материалов в литературе встречаются крайне редко¹².

На дифрактограмме порошка состава № 3 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,160; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линии кварца ($d/n = 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии кристобалита ($d/n = 0,2834; 0,313$ и $0,403$ нм), линии аортита ($d/n = 0,321; 0,375$ и $0,483$ нм), линии диопсида ($d/n = 0,183; 0,196; 0,216$ и $0,252$ нм), линии рутила ($d/n = 0,188; 0,237; 0,351$ нм). Новыми кристаллами в данном составе являются диопсид и рутил.

Диопсид ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$) — силикат из группы пироксенов, кристаллизуется в моноклинной системе. Температура эвтектического плавления диопсида 1520 °С. Процессы формирования кристаллических новообразований диопсида (как аортита и монтичеллита) и его влияние на рост прочности при обжиге керамических материалов в литературе встречаются недостаточно¹².

Диоксид титана (TiO_2) существует в трех кристаллических модификациях: рутил, брукит и анатаз [3]. В составе неметаллических включений диоксид титана присутствует преимущественно в виде рутила. Температура плавления рутила 1825 °С. Рутил — химически стойкий и прочный минерал, обладает высокой твердостью (7–8). В шлаках преобладающей формой рутила являются крестообразные дендриты.

На дифрактограмме порошка состава № 4 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,161; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линии кварца ($d/n = 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии кристобалита ($d/n = 0,2834; 0,313$ и $0,403$ нм), линии аортита ($d/n = 0,321; 0,375$ и $0,483$ нм), линии диопсида ($d/n = 0,183$ и $0,196$ нм), линии гематита ($d/n = 0,244$ и $0,251$ нм). Появление новых минералов не отмечается.

На дифрактограмме порошка состава № 5 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,161; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линии кварца ($d/n = 0,205; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии диопсида ($d/n = 0,183$ и $0,216$ нм), линии аортита ($d/n = 0,321; 0,375$ и $0,483$ нм).

Повышенное содержание в алюмосодержащих шламах щелочей ($\text{R}_2\text{O} = 17,2$ %, см. табл. 1), получаемых при очистке стоков производств этил- и изопропилбензола, способствует образованию жидкой фазы. О повышенном содержании стеклофазы в исследуемом керамическом композиционном материале свидетельствует соотношение интегральных площадей аморфного гало и дифракционных отражений на рентгенограммах (см. рисунок, № 5).

В отличие от образцов из составов № 1–4, в образцах состава № 5 не происходит заметного образования кристобалита, что, по-видимому, обусловливается увеличением количества стеклофазы и снижением относительного содержания кварца в керамической массе.

На дифрактограмме порошка состава № 6 отмечаются характерные интенсивные линии муллита ($d/n = 0,1699; 0,188; 0,200; 0,211; 0,220$ и $0,339$ нм), присутствие линии кварца ($d/n = 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии гематита ($d/n = 0,2438; 0,251$ и $0,269$ нм), линии аортита ($d/n = 0,321$ и $0,483$ нм).

Повышенное содержание в шламе никельскелетного катализатора щелочей ($R_2O = 24,7\%$, см. табл.1), как и в составе № 5, способствует образованию жидкой фазы. О повышенном содержании стеклофазы в исследуемом керамическом композиционном материале свидетельствует, как и в составе № 5, соотношение интегральных площадей аморфного гало и дифракционных отражений на рентгенограммах (см. рисунок, № 6). В образцах состава № 6, как и в составе № 5, не происходит заметного образования кристобалита, что, по-видимому, обусловливается увеличением количества стеклофазы и снижением относительного содержания кварца в керамической массе.

На дифрактограмме порошка состава № 7 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,160; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линии ($d/n = 0,181; 0,217$ и $0,363$ нм) обусловлено Cr_2O_3 , линии кварца ($d/n = 0,185; 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии гематита ($d/n = 0,251$ и $0,269$ нм), линии кристобалита ($d/n = 0,2834; 0,313$ и $0,403$ нм), линии анортита ($d/n = 0,321; 0,375$ и $0,483$ нм).

На дифрактограмме порошка состава № 8 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,160; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линии ($d/n = 0,181; 0,217$ и $0,363$ нм) обусловлено Cr_2O_3 , линии кварца ($d/n = 0,185; 0,205; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии гематита ($d/n = 0,251$ и $0,269$ нм), линии анортита ($d/n = 0,321$ и $0,483$ нм).

Повышенное содержание в алюмохромистых отходах травления алюминиевых сплавов щелочей ($R_2O = 11,8\%$, см. табл. 1), как и в составах № 5, 6, способствует образованию жидкой фазы.

О повышенном содержании стеклофазы в исследуемом керамическом композиционном материале свидетельствует, как и в составах № 5, 6, соотношение интегральных площадей аморфного гало и дифракционных отражений на рентгенограммах (см. рисунок, № 8). В образцах состава № 8, как и в составах № 5, 6, не происходит заметного образования кристобалита, что, по-видимому, обусловливается увеличением количества стеклофазы и снижением относительного содержания кварца в керамической массе.

На дифрактограмме порошка состава № 9 отмечаются характерные интенсивные линии $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($d/n = 0,160; 0,174; 0,238; 0,247; 0,270$ и $0,348$ нм), присутствие линии ($d/n = 0,179; 0,217; 0,283; 0,313$ и $0,403$ нм) обусловлено кристобалитом, линии диопсида ($d/n = 0,183$ и $0,252$ нм), линии кварца ($d/n = 0,185; 0,222; 0,230; 0,334; 0,443$ и $0,458$ нм), линии муллита ($d/n = 0,200; 0,211; 0,220; 0,339$ нм), линии анортита ($d/n = 0,321; 0,375$ и $0,483$ нм).

Таким образом, использование алюмосодержащих отходов, включающих Al_2O_3 более 50 %, в керамических массах способствует образованию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и муллита, которые повышают физико-механические и химические свойства изделий. Использование алюмосодержащих отходов с Al_2O_3 менее 30 % в керамических массах не способствует образованию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, но способствует образованию муллита. При использовании алюмосодержащих отходов с повышенным количеством щелочей ($R_2O > 11\%$) не образуется кристобалит, который отрицательно действует на физико-механические показатели керамических композиционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б д р а х и м о в, В.З. Вопросы экологии и утилизации техногенных отложений в производстве керамических композиционных материалов [Текст] / В.З. Абдрахимов. — Самара : Самар. акад. гос. и муницип. управления, 2010. — 160 с.
2. А б д р а х и м о в, В.З. Химическая технология керамического кирпича с использованием техногенного сырья [Текст] / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. — Самара : Самар. гос. архит.-строит. ун-т, 2007. — 431 с.
3. Л и т в и н о в а, Т.И. Петрография неметаллических включений [Текст] / Т.И. Литвинова, В.П. Пирожкова, А.К. Петров. — М. : Металлургия, 1972. — 184 с.
4. Б у д н и к о в, П.П. Химическая технология керамики и огнеупоров [Текст] / П.П. Будников, В.Л. Балкевич, А.С. Бережной, И.А. Булавин, Г.В. Куклев, Д.Н. Полубояринов, Р.Я. Попильский. — М. : Изд-во литературы по строительству, 1972. — 551 с.

*КОВКОВ Илья Валерьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kovkoviv@mail.ru
Самарская академия государственного и муниципального управления
АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru
Самарская академия государственного и муниципального управления
КОЛПАКОВ Александр Викторович, асп.; E-mail: roland.alex@mail.ru
Самарская академия государственного и муниципального управления*

Получено после доработки 17.09.12

Kovkov Ilya Valeryevich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: kovkoviv@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia
Abdrakhimov Vladimir Zakirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia
Kolpakov Aleksandr Viktorovich, post-graduate student; E-mail: roland.alex@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

RESEARCH OF CERAMIC MATERIALS PHASE STRUCTURE ON BASE OF ALUMINIUM-CONTAINING WASTE PRODUCTS

Use aluminum-containing the waste products containing Al_2O_3 more of 50 % in ceramic mass sustains of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and mullite formation which increase physical-mechanical and chemical properties of products. Use of the aluminum-containing waste products containing Al_2O_3 less of 30 % in ceramic mass does not sustain of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ formation, but sustains mullite formation. In the use of aluminum-containing waste products containing higher content of alkalies ($\text{R}_2\text{O} > 11 \%$) christobalite are not formed which have negatively effect on physical-mechanical parameters of ceramic composite materials.

Key words: ceramic composite material, aluminum-containing waste products, phase structure, X-ray patterns, corundum, mullite, christobalite, diopside, monticellite, anorthite, chrome oxide, quartz, liquid phase.

REFERENCES

1. А б д р а х и м о в, В.З. Questions of ecology and man-triggered silts utilization in production of ceramic composite materials [Text] / V.Z. Abdrakhimov. — Samara : Samara Academy State and Municipal Management, 2010. — 160 p.
2. А б д р а х и м о в, В.З. Chemical technology of ceramic bricks with use of man-triggered raw material [Text] / V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova. — Samara : Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 2007. — 431 p.
3. Л и т в и н о в а, Т.И. Petrology of nonmetallic inclusions [Text] / T.I. Litvinova, V.P. Pirozhkova, A.K. Petrov. — М. : Metallurgia, 1972. — 184 p.
4. Б у д н и к о в, П.П. Chemical technology of ceramics and refractories [Text] / P.P. Budnikov, V.L. Balkevich, A.S. Berezhnoy, I.A. Bulavin, G.V. Kuklev, D.N. Poluboyarinov, R.Ya. Popilsky. — М. : Publishing House for the construction, 1972. — 551 p.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.05 : 658.512.6

Ю.Б. КАЛУГИН

КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Реализованы методы и модели, которые обосновывают увеличение фактических сроков выполнения работ по сравнению с плановыми. Представлены календарные графики строительного потока различных уровней иерархии с учетом вероятностных временных параметров.

Ключевые слова: достоверность планов, вероятностные временные параметры, иерархические структуры, строительный поток, прогнозирование сроков.

Анализ современного состояния теории и практики календарного планирования показывает недостаточную надежность и достоверность этих планов и программ. Причина существенной разницы между плановыми и фактическими параметрами заключается, прежде всего, в воздействии на выполняемые работы многочисленных дестабилизирующих факторов, которые могут быть учтены посредством использования вероятностных оценок продолжительности выполнения работ.

В работах [1, 2] для различных исполнителей в зависимости от уровня их организации (высокий, средний, низкий) установлены законы распределения продолжительности работ, определены зависимости между их числом и сроками выполнения, а также исследована вероятностная структура строительного потока и ее влияние на сроки реализации проекта. В работе [4] изложен универсальный метод определения вероятностных параметров работ, который может быть положен в основу расчета календарных сроков свершения работ в иерархических структурах, классическим случаем которых является строительный комплексный поток.

Структурные модели равноритмичных комплексного, объектного и специализированного потоков, которые функционируют на линейно-протяженном объекте (трубопровод, автомобильная дорога, участок железнодорожной линии) в пространственно-временной привязке представлены на рис. 1–3.

Модели построены исходя из следующих условий:

1. Каждый поток высшего уровня состоит из трех потоков низшего уровня иерархии.
2. Фронт работ потока высшего уровня состоит из шести фронтов потока низшего уровня. В этом случае суммарные периоды развертывания и свертывания на каждом уровне иерархии не превысят периодов установленного потока.

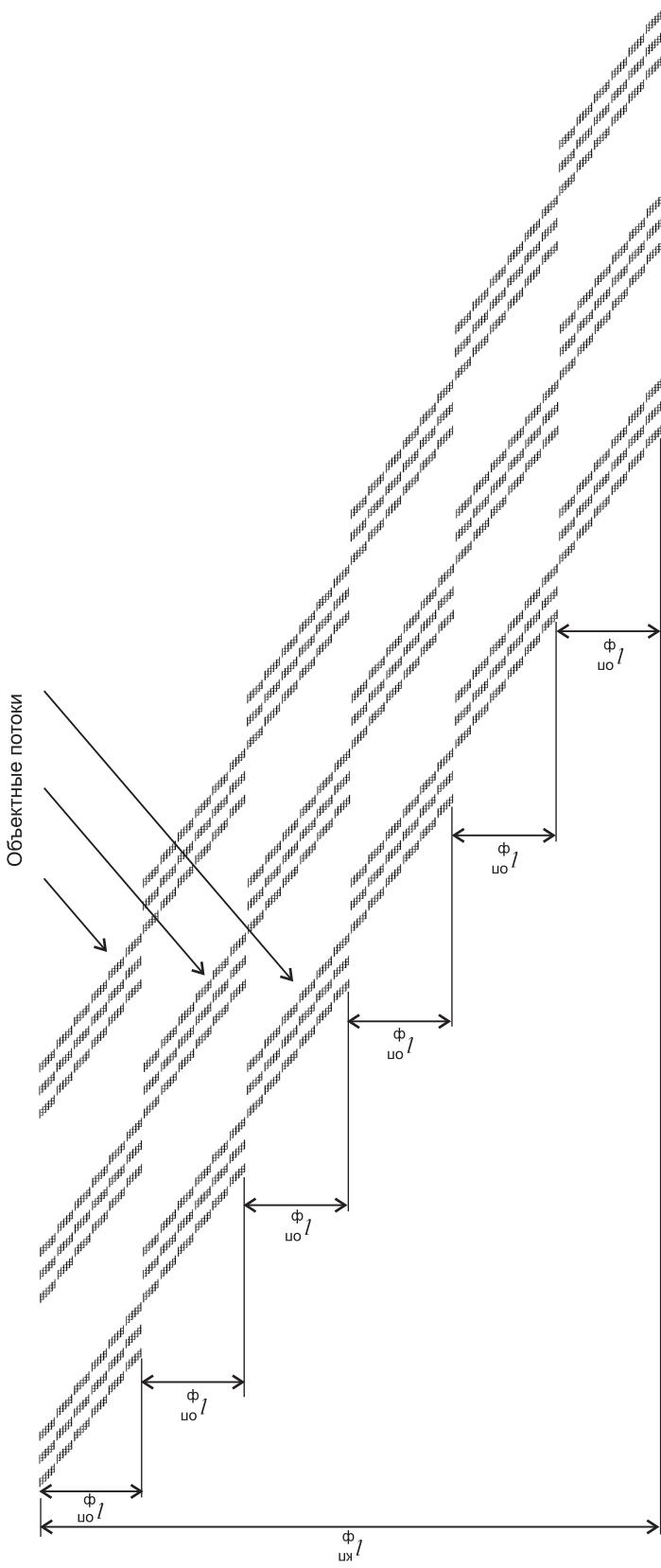


Рис. 1. Фронт работ и структура комплексного потока
 l_ϕ^{kn} — фронт работ комплексного потока; l_ϕ^{on} — фронт работ объектного потока

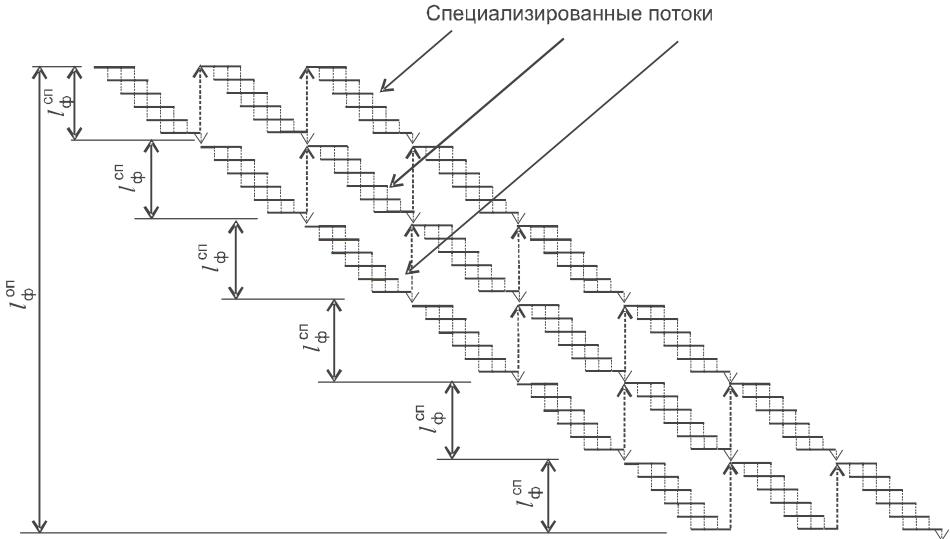


Рис. 2. Фронт работ и структура объектного потока

$l_{\Phi}^{\text{оп}}$ — фронт работ объектного потока; $l_{\Phi}^{\text{сп}}$ — фронт работ специализированного потока

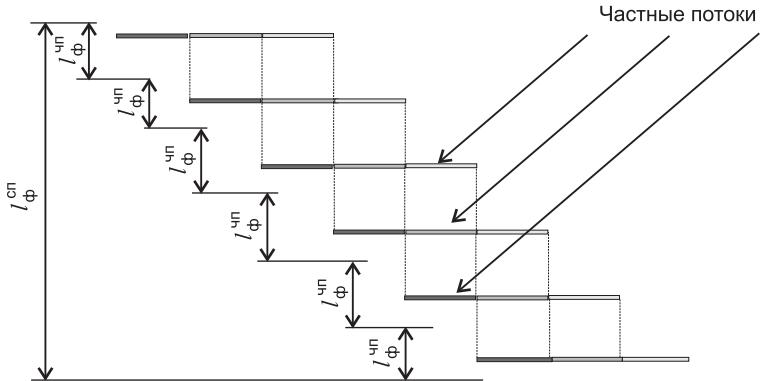


Рис. 3. Фронт работ и структура специализированного потока

$l_{\Phi}^{\text{сп}}$ — фронт работ специализированного потока; $l_{\Phi}^{\text{чп}}$ — фронт работ частного потока

3. Каждый поток начинает работы на другом фронте после полного окончания всех работ на предыдущем (частные потоки одной специализированной команды на разных специализированных фронтах не работают, специализированные потоки одного объектного потока на разных объектных фронтах не работают).

Несмотря на кажущееся увеличение планируемой продолжительности за счет временных интервалов между частными, специализированными и объектными потоками, условие 3 существенно повышает уровень управления и организации работ, так как все подразделения функционируют в рамках соответствующей структуры и территориально не разобщены.

Продолжительность равноритмичного потока на каждом i -м уровне иерархии определяется известной аналитической зависимостью

$$T = t_p (m + n - 1), \quad (1)$$

где t_p — ритм потока (продолжительность потока $(i - 1)$ -го уровня);
 $m = 3$ — число потоков $(i - 1)$ -го уровня;
 $n = 6$ — число фронтов работ потока $(i - 1)$ -го уровня.

Очевидно, что при ритме частного потока $t = 1$ день продолжительности специализированного, объектного и комплексного потоков для соответствующих фронтов составят 8, 64 и 512 дней.

Учет вероятностных параметров работ, вызванных различными дестабилизирующими факторами, существенно увеличивает общие сроки функционирования потоков на каждой ступени иерархической структуры в зависимости от уровня организации работ (высокий, средний, низкий).

Для высокого уровня организации исполнителей и нормального закона распределения, предполагающего изменение продолжительности выполнения отдельной работы частного потока в диапазоне от $0,5t$ до $1,5t$ с математическим ожиданием $1,0t$ [1], были рассчитаны 12 равновероятных значений t центров тяжести равных площадей $0,0833\Phi_0 : 0,5t; 0,698t; 0,789t; 0,857t; 0,917t; 0,971t; 1,029t; 1,083t; 1,143t; 1,211t; 1,302t; 1,5t$ [4].

Расчет специализированного потока с вероятностными временными параметрами выполнялся с помощью универсального метода [4] последовательно для каждого события. Его сущность заключается в следующем.

1. Устанавливаются равновероятные значения продолжительности каждой работы.

2. Для первого события устанавливаются сроки его начала ($t_1 - t_{12} = 0$).

3. Определяются вероятностные сроки окончания работ суммированием срока свершения события и вероятностных параметров продолжительности выполнения работы.

4. Для каждого последующего события определяются поздние сроки его свершения путем парной композиции 12 равновероятных сроков окончания одной работы с 12 равновероятными сроками окончания другой, при выборе максимального в каждой композиции.

5. Шаги 3 и 4 повторяются вплоть до завершающего события.

Более подробно универсальный метод расчета вероятностных параметров изложен в [4].

Считалось, что ресурсы исполнителей не задействованы на других объектах (ресурсно-объектные связи других объектов и фронтов работ не влияют на объекты потока) [3].

Результаты расчетов вероятностных параметров специализированного потока даны на рис. 4 и в табл. 1.

На рис. 4 над событиями представлены наиболее вероятные сроки их свершения (математические ожидания).

Расчеты показывают, что значимые вероятные сроки окончания работы специализированного потока на соответствующем фронте (событие 36) изменяются от 8,28 до 9,923 дней. Математическое ожидание составит 9,119.

С вероятностью 0,75 работы завершатся в течение 9,446 дней:

$$P(9,446) = 0,75. \quad (2)$$

Анализ полученных данных показывает, что по мере функционирования потока отклонение вероятностных сроков свершения событий от их детерминированных оценок растет. Так, для события 10 (см. рис. 4) эта величина составит $0,204t$, а для события 36 — $1,119t$.

Математические ожидания сроков выполнения работ первым потоком на всех объектах, а также потоков на первом объекте совпадают с их детерминированными оценками (см. рис. 4).

Равновероятные значения продолжительности функционирования специализированного для события 36 (см. табл. 1) являются исходными

Таблица 1

**Расчет вероятностных параметров событий специализированного потока
для высокого уровня организации**

№ п/п	Равновероятные сроки свершения каждого события													$P(t) = 0,5$	$P(t) = 0,75$
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,5	0,698	0,789	0,857	0,917	0,971	1,029	1,083	1,143	1,211	1,302	1,5	1,0	1,177	
3	0,5	0,698	0,789	0,857	0,917	0,971	1,029	1,083	1,143	1,211	1,302	1,5	1,0	1,177	
4	1,322	1,563	1,69	1,795	1,88	1,97	2,03	2,12	2,206	2,31	2,437	2,678	2,0	2,254	
5	1,322	1,563	1,69	1,795	1,88	1,97	2,03	2,12	2,206	2,31	2,437	2,678	2,0	2,254	
6	2,181	2,465	2,621	2,749	2,851	2,951	3,049	3,149	3,251	3,38	3,535	3,819	3,0	3,316	
7	0,5	0,698	0,789	0,857	0,917	0,971	1,029	1,083	1,143	1,211	1,302	1,5	1,0	1,177	
8	1,322	1,563	1,69	1,795	1,88	1,97	2,03	2,12	2,206	2,31	2,437	2,678	2,0	2,254	
9	1,654	1,852	1,963	2,03	2,113	2,177	2,232	2,31	2,395	2,437	2,658	2,678	2,208	2,41	
10	2,484	2,739	2,876	2,98	3,085	3,165	3,248	3,343	3,437	3,544	3,678	3,922	3,208	3,491	
11	2,73	2,947	3,078	3,16	3,249	3,32	3,399	3,486	3,542	3,656	3,807	3,922	3,358	3,599	
12	3,577	3,849	3,998	4,117	4,22	4,314	4,41	4,50	4,607	4,722	4,865	5,119	4,458	4,665	
13	1,322	1,563	1,69	1,795	1,88	1,97	2,03	2,12	2,206	2,31	2,437	2,678	2,0	2,254	
14	2,181	2,465	2,621	2,749	2,851	2,951	3,049	3,149	3,251	3,38	3,535	3,819	3,0	3,316	
15	2,73	2,947	3,078	3,16	3,249	3,32	3,399	3,486	3,542	3,656	3,807	3,922	3,358	3,599	
16	3,577	3,849	3,998	4,117	4,22	4,314	4,41	4,50	4,607	4,722	4,865	5,119	4,458	4,665	
17	3,955	4,186	4,306	4,41	4,493	4,571	4,636	4,722	4,817	4,865	5,098	5,119	4,598	4,841	
18	4,809	5,084	5,236	5,358	5,463	3,56	5,646	5,749	5,848	5,964	6,104	6,357	5,598	5,906	
19	2,181	2,465	2,621	2,749	2,851	2,951	3,049	3,149	3,251	3,38	3,535	3,819	3,0	3,316	
20	3,065	3,381	3,566	3,706	3,826	3,944	4,056	4,174	4,294	4,434	4,619	4,935	4,00	4,364	
21	3,783	4,042	4,17	4,274	4,374	4,425	4,536	4,613	4,696	4,841	4,929	5,119	4,484	4,769	
22	4,65	4,94	5,101	5,231	5,337	5,436	5,54	5,639	5,748	5,873	6,021	6,289	5,484	5,811	
23	5,127	5,379	5,503	5,60	5,68	5,749	5,854	5,919	6,002	6,09	6,274	6,357	5,795	6,046	
24	5,99	6,273	6,426	6,553	6,655	6,753	6,848	6,943	7,049	7,168	7,311	7,586	6,795	7,108	
25	3,065	3,381	3,566	3,706	3,826	3,944	4,056	4,174	4,294	4,434	4,619	4,935	4,00	4,364	
26	3,963	4,309	4,514	4,668	4,811	4,934	5,066	5,189	5,332	5,486	5,691	6,037	5,00	5,409	
27	4,834	5,117	5,265	5,362	5,461	5,557	5,656	5,729	5,842	5,996	6,036	6,289	5,595	5,919	
28	5,714	6,021	6,193	6,326	6,443	6,547	6,657	6,764	6,867	7,003	7,167	7,439	6,595	6,935	
29	6,282	6,524	6,664	6,759	6,854	6,924	7,018	7,108	7,168	7,287	7,428	7,566	6,965	7,228	
30	7,143	7,431	7,589	7,717	7,821	7,924	8,022	8,117	8,226	8,347	8,493	8,752	7,965	8,287	
31	3,963	4,309	4,514	4,668	4,811	4,934	5,066	5,189	5,332	5,486	5,691	6,037	5,00	5,409	
32	4,873	5,243	5,465	5,639	5,792	5,931	6,069	6,208	6,361	6,535	6,757	7,127	6,00	6,448	
33	5,886	6,176	6,338	6,466	6,545	6,674	6,761	6,833	6,969	7,106	7,167	7,439	6,697	7,038	
34	6,774	7,092	7,274	7,417	7,538	7,651	7,761	7,876	7,99	8,123	8,286	8,578	7,697	8,055	
35	7,413	7,669	7,806	7,908	8,006	8,093	8,157	8,256	8,332	8,469	8,571	8,752	8,119	8,401	
36	8,28	8,574	8,736	8,866	8,974	9,077	9,176	9,276	9,385	9,507	9,658	9,923	9,119	9,446	

данными для расчета вероятностных параметров объектного потока (событие 2, табл. 2).

Расчет объектного потока с вероятностными временными параметрами выполняется с помощью универсального метода [4] последовательно для каждого события (рис. 5). Над событиями представлены наиболее вероятные сроки их свершения (математические ожидания).

Результаты расчетов вероятностных параметров объектного потока представлены на рис. 5 и в табл. 2. Согласно данным, значимые расчетные сроки окончания работы объектного потока на соответствующем фронте (событие 36) изменяются от 73,43 до 76,22 дней. Математическое

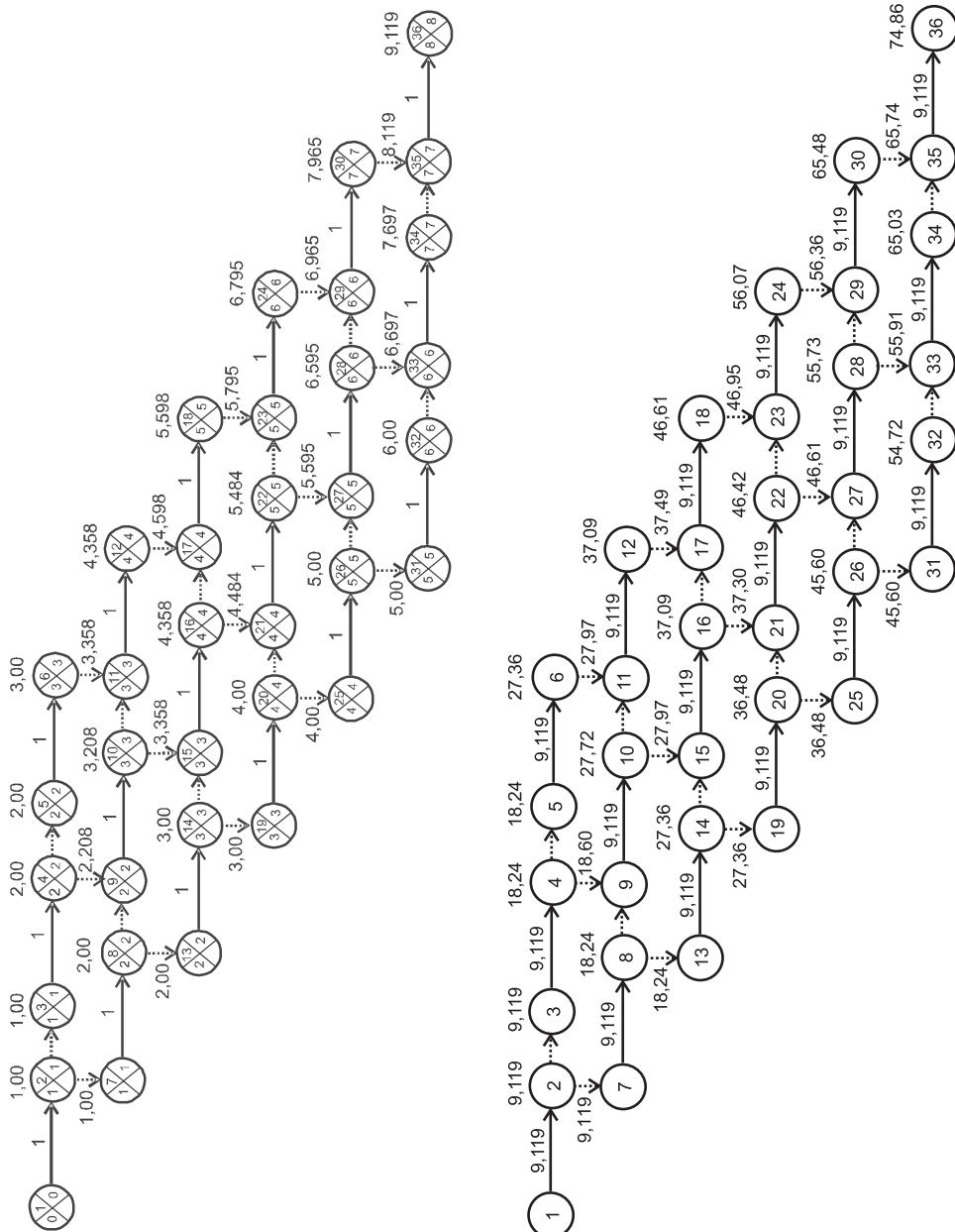


Рис. 4. Модель расчета специализированного потока с вероятностными временными параметрами

Рис. 5. Модель расчета объектного потока с вероятностными временными параметрами

Таблица 2

**Расчет вероятностных параметров событий объектного потока
для высокого уровня организации**

№ п/п	Равновероятные сроки свершения каждого события													$P(t) = 0,5$	$P(t) = 0,75$
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	8,28	8,574	8,736	8,866	8,974	9,077	9,176	9,276	9,385	9,507	9,658	9,923	9,119	9,446	
3	8,28	8,574	8,736	8,866	8,974	9,077	9,176	9,276	9,385	9,507	9,658	9,923	9,119	9,446	
4	17,07	17,48	17,71	17,88	18,03	18,19	18,31	18,46	18,61	18,78	18,99	19,38	18,24	18,69	
5	17,07	17,48	17,71	17,88	18,03	18,19	18,31	18,46	18,61	18,78	18,99	19,38	18,24	18,69	
6	25,95	26,44	26,70	26,93	27,10	27,28	27,45	27,62	27,80	28,02	28,27	28,74	27,36	27,91	
7	8,28	8,574	8,736	8,866	8,974	9,077	9,176	9,276	9,385	9,507	9,658	9,923	9,119	9,446	
8	17,07	17,48	17,71	17,88	18,03	18,19	18,31	18,46	18,61	18,78	18,99	19,38	18,24	18,69	
9	17,64	17,98	18,17	18,31	18,44	18,56	18,65	18,78	18,92	18,99	19,35	19,38	18,60	18,95	
10	26,47	26,91	27,15	27,33	27,51	27,65	27,80	27,95	28,10	28,29	28,52	28,91	27,72	28,20	
11	26,89	27,27	27,50	27,64	27,80	27,91	28,05	28,19	28,28	28,48	28,72	28,91	27,97	28,38	
12	35,75	36,22	36,48	36,69	36,85	37,02	37,18	37,34	37,51	37,71	37,95	38,37	37,09	37,61	
13	17,07	17,48	17,71	17,88	18,03	18,19	18,31	18,46	18,61	18,78	18,99	19,38	18,24	18,69	
14	25,95	26,44	26,70	26,93	27,10	27,28	27,45	27,62	27,80	28,02	28,27	28,74	27,36	27,91	
15	26,89	27,27	27,50	27,64	27,80	27,91	28,05	28,19	28,28	28,48	28,72	28,91	27,97	28,38	
16	35,75	36,22	36,48	36,69	36,85	37,02	37,18	37,34	37,51	37,71	37,95	38,37	37,09	37,61	
17	36,40	36,74	37,00	37,18	37,33	37,46	37,55	37,71	37,87	37,95	38,33	38,37	37,49	37,91	
18	45,25	45,73	45,99	46,20	46,38	46,55	46,70	46,88	47,04	47,24	47,48	47,89	46,61	47,14	
19	25,95	26,44	26,70	26,93	27,10	27,28	27,45	27,62	27,80	28,02	28,27	28,74	27,36	27,91	
20	34,87	35,41	35,73	35,97	36,19	36,38	36,58	36,78	36,99	37,23	37,54	38,06	36,48	37,11	
21	36,11	36,55	36,77	36,95	37,10	37,24	37,40	37,52	37,67	37,91	38,06	38,37	37,30	37,79	
22	45,00	45,50	45,77	45,99	46,18	46,35	46,53	46,69	46,87	47,08	47,34	47,78	46,42	46,98	
23	45,81	46,25	46,45	46,62	46,76	46,88	47,05	47,16	47,30	47,45	47,76	47,89	46,95	47,38	
24	54,69	55,18	55,44	55,66	55,83	56,00	56,16	56,33	56,50	56,70	56,94	57,36	56,07	56,60	
25	34,87	35,41	35,73	35,97	36,19	36,38	36,58	36,78	36,99	37,23	37,54	38,06	36,48	37,11	
26	43,81	44,41	44,76	45,03	45,28	45,49	45,71	45,93	46,17	46,43	46,78	47,36	45,60	46,30	
27	45,31	45,80	46,05	46,22	46,39	46,55	46,72	46,84	47,03	47,29	47,36	47,78	46,61	47,16	
28	54,23	54,76	55,05	55,28	55,48	55,66	55,84	56,02	56,21	56,43	56,69	57,16	55,73	56,32	
29	55,20	55,61	55,85	56,01	56,18	56,30	56,45	56,60	56,70	56,90	57,14	57,36	56,36	56,80	
30	64,08	64,57	64,84	65,06	65,23	65,41	65,58	65,74	65,92	66,13	66,37	66,80	65,48	66,02	
31	43,81	44,41	44,76	45,03	45,28	45,49	45,71	45,93	46,17	46,43	46,78	47,36	45,60	46,30	
32	52,78	53,42	53,80	54,11	54,36	54,60	54,84	55,08	55,34	55,64	56,01	56,64	54,72	55,49	
33	54,53	55,02	55,30	55,52	55,65	55,87	56,02	56,15	56,37	56,60	56,69	57,16	55,91	56,49	
34	63,45	64,00	64,31	64,55	64,76	64,95	65,14	65,33	65,52	65,75	66,03	66,51	65,03	65,64	
35	64,54	64,98	65,21	65,39	65,55	65,70	65,81	65,97	66,10	66,33	66,50	66,80	65,74	66,22	
36	73,43	73,94	74,21	74,43	74,62	74,79	74,96	75,13	75,31	75,52	75,77	76,22	74,86	75,42	

ожидание составит 74,86. С вероятностью 0,75 функционирование объектного потока завершится в течение 75,42 дней:

$$P(75,42) = 0,75. \quad (3)$$

Анализ полученных данных для объектного потока (см. рис. 5) позволяет отметить те же тенденции (рост отклонений математических ожиданий от детерминированных оценок по мере функционирования потока, совпадение вероятностных и детерминированных параметров для событий первого потока и первого объекта), что и для специализированного.

Равновероятные значения продолжительности функционирования объектного потока для события 36 (см. табл. 2) являются исходными данными для расчета вероятностных параметров комплексного потока.

Расчет комплексного потока с вероятностными временными параметрами выполнялся аналогично. Расчет показал, что значимые сроки окончания работы комплексного потока на соответствующем фронте (событие 36) изменяются от 599,7 до 604,4 дней. Математическое ожидание составит 602,1.

С вероятностью 0,75 функционирование комплексного потока завершится в течение 603,1 дней:

$$P(603,1) = 0,75. \quad (4)$$

Представленные данные показывают значительное увеличение расчетных сроков функционирования специализированного, объектного и комплексного потоков на соответствующих уровнях иерархии. Так, математическое ожидание сроков функционирования специализированного потока на соответствующем фронте работ увеличилось с 8 до 9,119 (14 %), объектного — с 64 до 74,86 (17 %) и комплексного потока — с 512 до 602,1 (18 %). С учетом вероятности 0,75 среднее увеличение соответствующих сроков выполнения работ по сравнению с детерминированными оценками составит 18 %.

Аналогичные расчеты были выполнены и для условий среднего и низкого уровня организации труда исполнителей частных потоков в соответствии с данными [1].

Окончательные результаты расчетов представлены в табл. 3. Их анализ позволяет отметить существенное увеличение расчетных сроков функционирования потоков на соответствующих фронтах работ для исполнителей среднего и низкого уровней.

Так, математическое ожидание расчетных продолжительностей специализированного, объектного и комплексного потоков для исполнителей среднего уровня увеличилось до 13,7; 114 и 921 дня, что на 71, 78 и 80 % превышает соответствующие параметры, полученные на основании детерминированных расчетов.

Расчетные продолжительности специализированного, объектного и комплексного потоков для исполнителей низкого уровня увеличились до 19,7; 163,8 и 1321 дня соответственно, что на 146, 156 и 158 % превышает первоначальные значения.

Следует отметить, что с увеличением уровня иерархии уменьшаются относительные (относительно соответствующей продолжительности потока) дисперсия σ^2 и диапазон значимых равновероятных сроков свершения событий D , т.е. потоки становятся более устойчивыми.

Таблица 3

Итоговые расчетные вероятностные параметры потоков для исполнителей различного уровня

Уровень		Равновероятные сроки окончания работ						$P(t) = 0,5$		$P(t) = 0,75$		σ^2	D	σ^2 / t_{MO} , %	D / t_{MO} , %
недар- хии	испол- нителя														
	Высокий	0,50	0,698	0,789	0,857	0,917	1,029	1,083	1,143	1,211	1,302	1,50	1,0	1,177	0,069
	Средний	0,6	0,736	0,869	0,998	1,125	1,254	1,387	1,533	1,69	1,883	2,13	2,6	1,40	1,787
Hatchpin motor	Низкий	0,625	0,875	1,125	1,375	1,625	1,875	2,125	2,375	2,625	2,875	3,125	3,375	2,00	2,75
	Высокий	8,28	8,574	8,736	8,866	8,974	9,077	9,176	9,276	9,385	9,507	9,658	9,923	9,119	9,446
	Средний	11,875	12,492	12,85	13,129	13,369	13,602	13,84	14,069	14,324	14,609	14,964	15,624	13,729	14,467
Chenauran- nopharhpin motor	Низкий	16,935	17,897	18,42	18,837	19,20	19,561	19,884	20,217	20,577	20,959	21,462	22,322	19,689	20,768
	Высокий	73,43	73,94	74,21	74,43	74,62	74,79	74,96	75,13	75,31	75,52	75,77	76,22	74,86	75,42
	Средний	110,94	112,08	112,7	113,21	113,64	114,05	114,44	114,83	115,25	115,74	116,32	117,37	114,21	115,49
Oberkthpin motor	Низкий	159,08	160,74	161,64	162,37	163,0	163,57	164,12	164,67	165,27	165,96	166,78	168,25	163,79	165,62
	Высокий	599,7	600,6	601,0	601,4	601,7	602,0	602,3	602,6	602,9	603,2	603,6	604,4	602,1	603,1
	Средний	915,58	917,56	918,62	919,49	920,22	920,9	921,59	922,23	923,95	923,78	924,75	926,5	921,18	923,37
Kommerck- pin motorc-	Низкий	1312,9	1315,8	1317,3	1318,5	1319,6	1320,5	1321,5	1322,4	1323,4	1324,6	1326,0	1328,5	1320,9	1324,0

Выводы. 1. Расчет календарных планов работ с вероятностными временными параметрами позволяет существенно повысить достоверность планирования, в том числе и при проектировании поточной организации работ в составе комплексного, объектного и специализированного потоков.

2. Расчетные отклонения сроков выполнения работ увеличиваются с ростом иерархии (от частного потока к комплексному), причем наибольшее влияние на изменение продолжительности оказывает самый низкий уровень — уровень частных потоков (работы отдельных машин и звеньев).

3. Повышение уровня организации и управляемости исполнителей снижает отклонения расчетных сроков выполнения работ от фактических, что позволяет существенно повысить предсказуемость календарных планов, их достоверность и надежность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин, Ю.Б. Расчет вероятностных параметров параллельных работ [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 35–42.
2. Калугин, Ю.Б. Вероятностная структура строительного потока [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 7. — С. 36–43.
3. Калугин, Ю.Б. Прогнозирование сроков реализации проекта с помощью модели квазипараллельных работ [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 3. — С. 45–51.
4. Калугин, Ю.Б. Расчет календарных планов работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 51–59.

*КАЛУГИН Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург*

Получено после доработки 17.09.12

Kalugin Yury Borisovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru, Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

PLANNING OF WORKS WITH PROBABILISTIC TEMPORARY PARAMETERS IN HIERARCHICAL STRUCTURES

Methods and models of planning and scheduling, which prove increase of actual time in comparison with the planned are realized. Presents schedules of construction flow of various levels of the hierarchy with the probabilistic timing parameters.

Key words: reliability plans, probabilistic temporal parameters, hierarchical structures, construction flow, predicting the timing.

REFERENCES

1. Kalugin, Yu.B. Calculation of probabilistic parameters of parallel processes [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 35–42.
2. Kalugin, Yu.B. Probabilistic structure of the flow of works [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 7. — P. 36–43.
3. Kalugin, Yu.B. Predicting the timing of the project with the help of a model quasi-parallel processes [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 3. — P. 45–51.
4. Kalugin, Yu.B. Calculation of the schedules of works with probabilistic temporary parameter [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 51–59.

УДК 621.878.23:629.11:62-52

**Ю.Ф. УСТИНОВ, А.Д. КОНОНОВ, А.А. КОНОНОВ,
В.И. ГИЛЬМУТДИНОВ**

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСНОВНЫМ ОТВАЛОМ АВТОГРЕЙДЕРА

Рассматривается вариант построения системы автоматического управления косопоставленным отвалом автогрейдера и обосновывается корректность выбранных подходов к решению проблемы повышения эффективности процесса разработки грунта землеройно-транспортными машинами.

Ключевые слова: землеройно-транспортные машины, эффективность рабочих процессов, система автоматического управления.

Среди работ, связанных со строительным комплексом, достаточно важным является проведение земляных работ, значительное применение при которых находят землеройно-транспортные машины (ЗТМ) и, в частности, автогрейдеры. Существенное повышение эффективности рабочих процессов ЗТМ возможно с помощью систем автоматического управления (САУ) рабочим органом [1]. Однако, несмотря на большое количество посвященных этому работ, возникающие сложности выбора информационных параметров из-за отсутствия обоснованного преимущества какого-либо косвенного [1] параметра (например, частоты вращения выходного вала двигателя, силы тяги, буксования) над другими, разнообразия рабочих процессов ЗТМ, а также ограниченность средств измерения затрудняют создание эффективных, промышленно выпускаемых САУ рабочими органами ЗТМ.

Система автоматического управления рабочим органом автогрейдера по результатам оперативного определения (непосредственно в ходе рабочего процесса) параметра, характеризующего текущую производительность ЗТМ в каждый момент времени, была представлена в работе П.И. Никулина и др.¹

В качестве основных информационных параметров в системе используются объем грунта, перемещаемого рабочим органом, и действительная скорость движения машины в процессе копания грунта, значения которых снимаются с соответствующих датчиков. Произведение этих параметров, деленное на длину отвала, дает численное выражение, характеризующее текущую производительность. В зависимости от разности между предыдущим и текущим значением параметра, характеризующего производительность, в данный момент времени вырабатывается сигнал на заглубление или выглубление косопоставленного отвала.

Следует отметить, что предложенный способ определения параметра, характеризующего текущую производительность, не является чисто теоретическим рассмотрением, а служит для построения САУ и основывается на использовании измеренных датчиками значений информационных сиг-

¹ Никулин П.И., Тепляков И.М., Енин В.И., Кононов А.А. Повышение эффективности процесса копания грунта колесными землеройно-транспортными машинами // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 6. С. 105–107.

налов, в достаточной для функционирования указанной САУ мере характеризующих процесс разработки грунта косопоставленным отвалом.

Отметим, что у ЗТМ непрерывного действия транспортирование грунта осуществляется одновременно с его вырезанием (эти процессы неразрывны), т.е. определение в САУ параметра, характеризующего производительность автогрейдера, не может с достаточной точностью осуществляться только по грунту, вырезаемому в плотном теле (массиве), так как кроме силы сопротивления резанию грунта на косопоставленный отвал достаточно значимо действуют силы сопротивления, связанные с перемещением грунта и скольжением грунта по отвалу², которые также будут приводить к увеличению нагрузки и, как следствие, изменению действительной скорости движения машины. Тем более что при многих технологических процессах на отвал автогрейдера поступает не только грунт, вырезанный при данном проходе, но и валик грунта, оставшийся от предыдущего прохода. Отсутствие учета такого количества грунта, перемещаемого косопоставленным отвалом, для эффективного автоматического управления рабочим органом является недопустимым. Описание процесса копания как двух отдельных стадий (начала — вырезания грунта и завершения копания — транспортирования грунта) для косопоставленного отвала автогрейдера может быть применено скорее к отдельной частице, а не ко всему объему грунта перед отвалом, и то при чисто теоретическом рассмотрении вне связи с практической реализацией.

Кроме того, определение производительности только по грунту, вырезанному в массиве, предполагает использование текущего значения площади поперечного сечения стружки грунта, вычисляемой через ширину резания и толщину срезаемой стружки. Однако в реальном процессе форма поверхности грунта перед рабочим органом не является ровной и непрерывно меняется как в продольном (относительно движения машины), так и в поперечном (вдоль поверхности отвала) направлении, т.е. площадь поперечного сечения вырезаемой в массиве грунта стружки в каждый момент времени имеет собственное численное значение. Известные способы измерения не позволяют полностью учитывать неровности поверхности грунта перед рабочим органом по всей ширине полосы разработки.

Обоснованность принятого подхода¹ также подтверждается, например, в работе Д.П. Волкова и др.², где указано, что техническая производительность может быть выражена в виде

$$\Pi_t = \frac{\Pi_0 \cdot k_y \cdot k_h}{k_p}, \quad (1)$$

где k_y — коэффициент влияния реальных условий работы машины; k_h , k_p — коэффициенты наполнения рабочего органа и разрыхления реального грунта;

Π_0 — теоретическая производительность.

Необходимо отметить, что часть данных в (1) учитывается в описанной САУ опосредованно, так как датчиком измеряется объем грунта, а теоретическая производительность для машин непрерывного действия²

$$\Pi_0 = F \cdot v, \quad (2)$$

где v — скорость перемещения рабочего органа (совпадающая для автогрейдера с действительной скоростью движения v_d);

² Волков Д.П., Крикун В.Я., Тотолин П.Е. и др. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.

F — расчетное количество грунта, перемещаемого на единицу длины его потока (т.е. объем V , деленный на длину косопоставленного отвала B).

Варианты построения САУ, базирующиеся на экстремальном управлении по параметру, характеризующему текущую производительность, были также представлены в работах^{3,4}, защищены авторскими правами [2, 3], показали работоспособность и высокую эффективность их применения.

К сожалению, при таком управлении не решается актуальная в настоящее время задача энергосбережения, так как параметр, характеризующий производительность (в данном случае — объем грунта, отнесенный к единице времени), не оценивает затрат энергоносителя.

Выполненную работу с учетом затрат энергоносителя оценивает параметр, характеризующий текущий коэффициент полезного действия (КПД) автогрейдера, который условно назовем эффективным КПД.

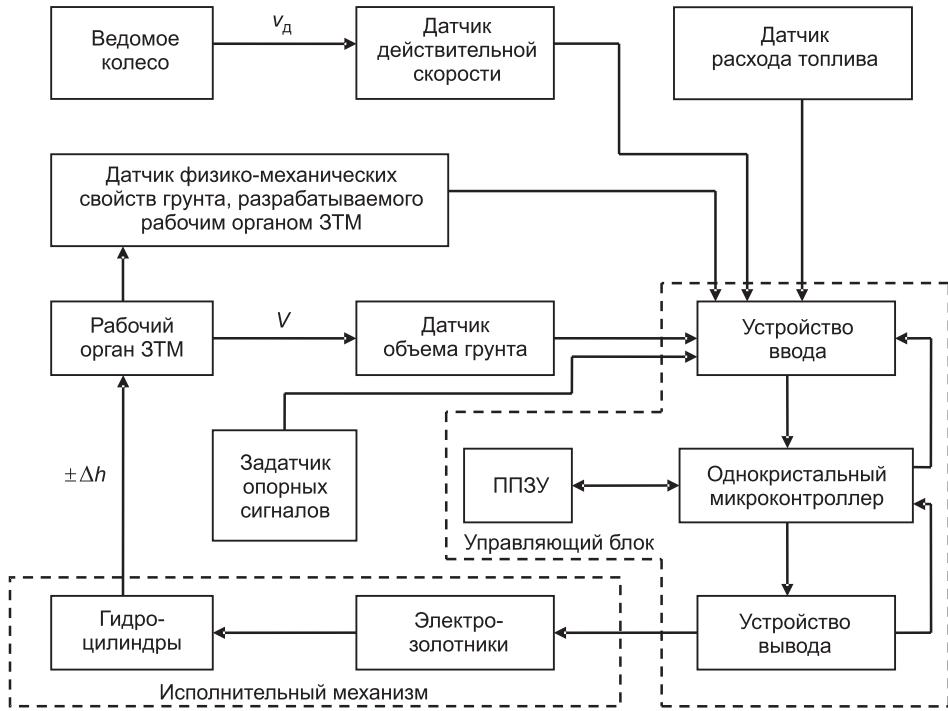
В общем случае КПД может быть найден как отношение полезной энергии (или работы) к затраченной энергии (или работе). Если в каждый момент времени ЗТМ в процессе разработки грунта представлять как объект в виде «черного ящика», то в качестве полезной энергии (выходной сигнал) следует рассматривать энергию по перемещению объема грунта перед косопоставленным отвалом, которая соответствует «действительно полезной» совершенной работе ($\text{Дж} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$) по отводу грунта с разрабатываемого участка, а в качестве затрачиваемой энергии (входной сигнал) — энергию, получаемую в результате сгорания топлива.

Очевидно, что абсолютные численные значения определяемого эффективного КПД машины будут достаточно малы, так как при делении в числителе оценивается только «действительно полезная» энергия, а общие потери КПД связаны с достаточно низким КПД двигателя, потерями в самой ЗТМ и т.д. Однако для САУ это не является недостатком, при поиске мгновенного максимально возможного эффективного КПД машины интерес представляют не абсолютные значения этого КПД, а относительные величины, т.е. управление осуществляется на основе постоянного сравнения текущего значения эффективного КПД с предыдущим значением.

Функционирование системы автоматического управления подробно описано в [4]. В качестве основных информационных сигналов используются объем грунта, перемещаемого рабочим органом, действительная скорость движения машины в процессе копания грунта, расход топлива двигателем, значения которых снимаются с соответствующих датчиков (см. рисунок). Произведение информационных сигналов датчиков объема грунта, задатчика опорного сигнала по физико-механическим свойствам грунта (при необходимости данный опорный сигнал корректируется в зависимости от сигнала с датчика физико-механических свойств грунта) и квадрата информационного сигнала датчика действительной скорости движения машины, деленное пополам, дает (в соответствии с классическими представлениями физики) численное значение, характеризующее

³ Устинов Ю.Ф., Жулай В.А., Кононов А.А. Повышение эффективности планировки грунта основным отвалом автогрейдера // Механизация строительства. 2009. № 8. С. 12–14.

⁴ Устинов Ю.Ф., Кононов А.Д., Кононов А.А., Иванов С.А. Повышение эффективности процесса разработки грунта косопоставленным отвалом землеройно-транспортной машины // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 1. С. 69–72.



Структурная схема основного контура системы автоматического управления рабочим органом землеройно-транспортной машины в процессе копания грунта

величину полезной энергии по перемещению грунта косопоставленным отвалом и, соответственно, по отводу грунта в сторону с разрабатываемым участком в каждый момент времени

$$W_n = \frac{V \cdot \rho \cdot v_d^2}{2}, \quad (3)$$

где ρ — плотность разрабатываемого грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Затрачиваемая в текущий момент времени энергия определяется как произведение информационного сигнала датчика расхода топлива и удельной теплоты сгорания топлива

$$W_3 = G_{tt} \cdot Q_t, \quad (4)$$

где G_{tt} — текущий расход топлива, кг ;

Q_t — удельная теплота сгорания топлива, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Отношение полезной энергии к затрачиваемой дает численное значение эффективного КПД машины в каждый момент времени

$$\text{КПД} = \frac{V \cdot \rho \cdot v_d^2}{2 \cdot G_{tt} \cdot Q_t}. \quad (5)$$

В зависимости от разности между предыдущим и текущим значениями параметра, характеризующего КПД автогрейдера, вырабатывается сигнал на заглубление или выглубление рабочего органа.

Необходимо отметить, что применение для САУ в качестве информационного параметра действительной скорости движения машины v_d , а не скорости скольжения (перемещения) вырезанного грунта v_{ck} по отвалу

использовалось многими авторами^{5, 6} и обусловлено тем, что v_d и v_{ck} связаны между собой зависимостью⁷

$$v_{ck} = v_d \cdot k_v \cdot \cos\alpha,$$

где α — угол захвата отвала;

k_v — корректирующий скоростной коэффициент.

Акцентируем, что рассмотренные в данной работе САУ используют управление не по абсолютным значениям, а по непрерывному сравнению предыдущего и текущего значений параметра эффективности, поэтому неполное соответствие измеряемых и определяемых параметров абсолютным значениям не снижает точности управления. При этом сами понятия КПД и производительности (как прямые показатели эффективности) по сути своей определяют выполняемую работу.

Таким образом, из вышесказанного очевидны правомерность использования измеряемых информационных сигналов, определения параметров, характеризующих производительность и КПД, а также корректность построения на их основе САУ косопоставленным отвалом автогрейдера.

Проведенные исследования имеют практическое значение и могут быть полезны специалистам, работающим в области автоматизации ЗТМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Устинов, Ю.Ф. Основные концептуальные принципы автоматизации и дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст] / Ю.Ф. Устинов, И.М. Тепляков, А.А. Кононов и др. // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 6. — С. 65–67.
2. Пат. № 2327011 РФ. Система автоматического управления рабочим органом автогрейдера [Текст] / Ю.Ф. Устинов, В.А. Жулай, А.А. Кононов. — Опубл. 20.06.2008 ; Бюл. № 17.
3. Пат. № 2291254 РФ. Система автоматического управления рабочим органом землеройно-транспортной машины [Текст] / Ю.Ф. Устинов, А.Д. Кононов, А.А. Кононов. — Опубл. 10.01.2007 ; Бюл. № 1.
4. Пат. № 2327010 РФ. Система автоматического управления рабочим органом землеройно-транспортной машины в процессекопания грунта [Текст] / Ю.Ф. Устинов, А.А. Кононов. — Опубл. 20.06.2008 ; Бюл. № 17.

УСТИНОВ Юрий Федорович, д-р техн. наук, проф.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КОНОНОВ Александр Давыдович, канд. физ.-мат. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КОНОНОВ Андрей Александрович, д-р техн. наук; E-mail: kniga16@mail.ru

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ГИЛЬМУТДИНОВ Владимир Исламович, канд. техн. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 20.09.12

Ustинov Yuriy Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

⁵ Ульянов Н.А. Колесные движители строительных и дорожных машин: Теория и расчет. М.: Машиностроение, 1982. 279 с.

⁶ Мещеряков В.А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук, спец. 05.05.04. Омск: СибАДИ, 2007. 46 с.

⁷ Крившин А.П. Эксплуатационные свойства и эффективность землеройно-транспортных машин. М.: Транспорт, 1975. 240 с.

Kononov Alexandre Davydovich, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Kononov Andrey Alexandrovich, doctor of technical sciences; E-mail:kni-ga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Gilmutdinov Vladimir Islamovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY THE BASIC AUTOGRADER DUMP

The version of a building of a system of automatic control of delivered obliquely dump of an autograder is considered and the correctness of the selected approaches to a solution of a problem of a heightening of efficiency of engineering process of a ground by autograders, scrapers and bulldozers.

Key words: autograders, scrapers and bulldozers, efficiency of working processes, automatic control systemer.

REFERENCES

1. Ustinov, Yu.F. The basic conceptual principles of automation and full remote control the autograders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.F. Ustinov, I.M. Teplyakov, A.A. Kononov etc. // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 6. — P. 65–67.
 2. Pat. № 2327011 Russian Federation. An automatic control system by an end-effector of an autograder [Text] / Yu.F. Ustinov, V.A. Gulai, A.A. Kononov. — Publ. 20.06.2008 ; Bull. N 17.
 3. Pat. № 2291254 Russian Federation. An automatic control system by an end-effector of the autograders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.F. Ustinov, A.D. Kononov, A.A. Kononov. — Publ. 10.01.2007 ; Bull. N 1.
 4. Pat. № 2327010 Russian Federation. An automatic control system by an end-effector of the autograders, scrapers and bulldozers during a digging of a ground [Text] / Yu.F. Ustinov, A.A. Kononov. — Publ. 20.06.2008 ; Bull. N 17.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.5:697.98.001

И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА

ЭЖЕКЦИЯ ВОЗДУХА УСКОРЕННЫМ ПОТОКОМ ЧАСТИЦ В ПЕРФОРИРОВАННОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ С БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ*

Сообщение 1. УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ЭЖЕКТИРУЕМОГО И РЕЦИРКУЛИРУЕМОГО ВОЗДУХА

Рассматривается поток частиц в перфорированной круглой трубе, вокруг которой предусмотрена цилиндрическая байпасная камера. Получены гидродинамические уравнения для оценки межкомпонентного взаимодействия в вертикальном перфорированном желобе при перемещении в них гравитационных потоков сыпучего материала и эжектируемого воздуха. Численное решение полученной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и аналитическое решение линеаризованных уравнений позволили выявить закономерности изменения скорости эжектируемого воздуха в перфорированном желобе, давления в байпасной камере по длине желоба, при увеличении перфорации стенок, в зависимости от размеров байпасной камеры, числа эжекции. Определены рациональный диапазон степени перфорации эжекции, коэффициентов сопротивления и соотношения поперечных сечений камеры и трубы, обеспечивающих наибольшее снижение объемов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

Ключевые слова: аспирация, перегрузки сыпучих материалов, эжекция воздуха.

С целью снижения необходимых объемов аспирации во многих случаях применяют байпасные каналы, обеспечивающие внутренний рецикл воздуха, уменьшая тем самым поступление воздуха из перегруженных желобов в аспирируемые укрытия. Известны решения, когда полости желоба соединены с байпасной камерой не только в верхней и нижней частях [1], но и по всей высоте желоба путем перфорации его стенок. Для получения количественных показателей эффективности этого решения рассмотрим аэродинамические процессы эжектирования воздуха для случая равномерно распределенного в вертикальном канале потока частиц, падающих с постоянным ускорением (такая модель применима для потока частиц при небольшой высоте свободного падения, когда сила аэродинамического сопротивления еще намного меньше веса падающей частицы): $\frac{d\tilde{v}}{\tilde{t}} = \tilde{g}$.

Здесь и далее волнистая черта над величиной подчеркивает ее размерность: \tilde{v} — скорость частиц, м/с; \tilde{t} — время, с; \tilde{g} — ускорение силы тяжести, м/с².

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проекты НШ-588.2012.8, МК-102.2013.8), РФФИ (проект № 12-08-97500-р_центр_a), плана стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

1. Вывод дифференциальных уравнений. Рассмотрим осесимметричный поток частиц в круглой трубе с площадью поперечного сечения \tilde{s}_t , м² (рис. 1). Вокруг трубы предусмотрена цилиндрическая байпасная камера с площадью поперечного сечения \tilde{s}_b , м², аэродинамически связанная с трубой перфорированной стенкой. В результате перетекания воздуха из трубы в байпасную камеру скорость эжектируемого воздуха в трубе (\tilde{u} , м/с) и скорость восходящего потока в байпасной камере ($\tilde{\omega}$, м/с) изменяется по длине канала. Для определения этих скоростей воспользуемся следующим уравнением сохранения количества движения воздуха в неподвижном объеме \tilde{V} (м³), ограниченного поверхностью \tilde{S} (м²).

$$\int_{\tilde{S}} \tilde{\rho} \tilde{u} \tilde{u}_n d\tilde{S} = \int_{\tilde{V}} \tilde{M} d\tilde{V} + \int_{\tilde{S}} \tilde{p}_n d\tilde{S},$$

где \tilde{u}_n — проекция вектора скорости воздуха на внешнюю нормаль \tilde{n} поверхности \tilde{S} , м/с; \tilde{u} — вектор скорости воздуха, м/с; $\tilde{\rho}$ — плотность воздуха, кг/м³; \tilde{M} — вектор массовых сил, Н/м³; \tilde{p}_n — вектор напряжения поверхностной силы, приложенной к элементарной площади $d\tilde{S}$ с внешней нормалью \tilde{n} , Па.

Раскроем это интегральное соотношение для элементарного объема $d\tilde{x} \cdot \tilde{s}_t$ с учетом массовых сил межкомпонентного взаимодействия

$$\tilde{M} = \psi \beta \frac{\tilde{F}_m}{\tilde{V}_q} \frac{(\tilde{v} - \tilde{u})|\tilde{v} - \tilde{u}|}{2} \tilde{\rho},$$

где ψ — коэффициент аэродинамического сопротивления одной частицы;

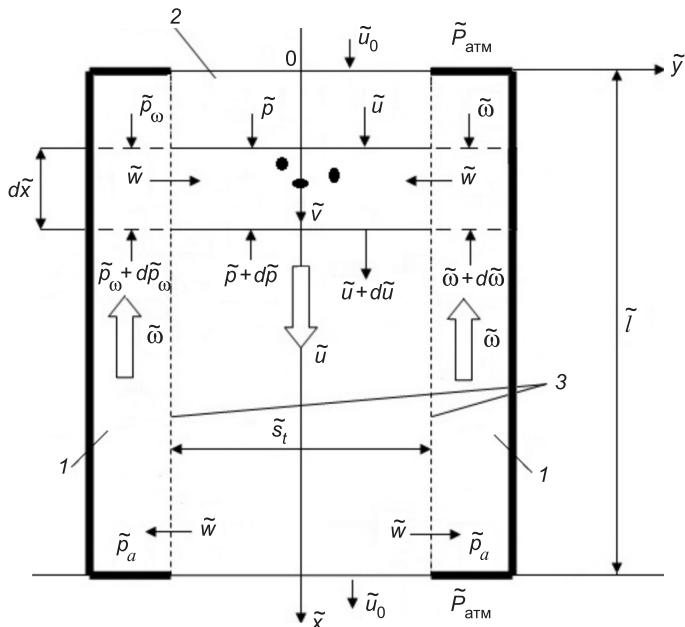


Рис. 1. Расчетная схема перфорированного желоба с байпасной камерой

1 — байпасная камера; 2 — желоб (труба); 3 — перфорированные стенки желоба

\tilde{F}_m — площадь миделева сечения частицы, м²;

\tilde{V}_q — объем частицы, м³;

β — объемная концентрация частиц в трубе: $\beta = \frac{\tilde{G}_q}{\tilde{\rho}_q \tilde{v} \tilde{s}_t}$ (\tilde{G}_q — массовый расход частиц, кг/с; $\tilde{\rho}_q$ — плотность частицы, кг/м³).

Пренебрегая силами аэродинамического сопротивления стенок канала, получим в проекции на ось OX :

$$\begin{aligned} & \tilde{\rho} \tilde{u} (-\tilde{u}) \tilde{s}_t + \tilde{\rho} (\tilde{u} + d\tilde{u}) (\tilde{u} + d\tilde{u}) \tilde{s}_t = \\ & = d\tilde{x} \tilde{s}_t \psi \beta \frac{\tilde{F}_m}{\tilde{V}_q} \frac{(\tilde{v} - \tilde{u}) |\tilde{v} - \tilde{u}|}{2} \tilde{\rho} + \tilde{\rho} \tilde{s}_t - (\tilde{p} + d\tilde{p}) \tilde{s}_t. \end{aligned}$$

Откуда, пренебрегая малыми величинами более высокого порядка, запишем основное уравнение одномерной задачи динамики эжектируемого воздуха в трубе: $d\tilde{p} + 2\tilde{\rho} \tilde{u} d\tilde{u} = \tilde{E} \frac{|\tilde{v} - \tilde{u}| (\tilde{v} - \tilde{u})}{2} \tilde{\rho} d\tilde{x}$; $\tilde{E} = \psi \beta \frac{\tilde{F}_m}{\tilde{V}_q}$; или в безразмерном виде (разделив обе части уравнения на $\tilde{\rho} \tilde{v}_k^2 / 2$);

$$dp + 4u du = Le(v - u) |v - u| / v \cdot dx, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} Le &= \psi \beta_k \tilde{l} \frac{\tilde{F}_m}{\tilde{V}_q}; \quad \beta_k = \frac{\tilde{G}_q}{\tilde{\rho}_q \tilde{v}_k \tilde{s}_t}; \quad p = 2\tilde{p} / (\tilde{\rho} \tilde{v}_k^2); \\ u &= \tilde{u} / \tilde{v}_k; \quad v = \tilde{v} / \tilde{v}_k; \quad x = \tilde{x} / \tilde{l}; \end{aligned}$$

\tilde{p} — статическое давление в трубе, Па (здесь и далее речь идет об избыточном статическом давлении);

\tilde{v}_k — скорость частиц в конце трубы, м/с;

\tilde{l} — общая длина трубы, м.

Заметим, что безразмерное число Le («параметр эжекции») представляет собой отношение максимальных сил эжекционного давления (при $\tilde{v} - \tilde{u} = \tilde{v}_k$) и динамического давления эжектируемого воздуха:

$$Le = \tilde{s}_t \cdot \tilde{l} \cdot \beta_k \psi \frac{\tilde{F}_m}{\tilde{V}_q} \cdot \frac{\tilde{v}_k^2}{2} \tilde{\rho} / \left(\tilde{s}_t \cdot \tilde{\rho} \frac{\tilde{v}_k^2}{2} \right).$$

Аналогично можно получить уравнение динамики для восходящего потока воздуха в байпасном канале площадью поперечного сечения \tilde{s}_b (при отсутствии массовых сил аэродинамического сопротивления стенок канала):

$$-\tilde{\rho} \tilde{\omega} \cdot (\tilde{\omega}) \tilde{s}_b - \tilde{\rho} (\tilde{\omega} + d\tilde{\omega}) (-\tilde{\omega} - d\tilde{\omega}) \tilde{s}_b = \tilde{p}_\omega \cdot \tilde{s}_b - (\tilde{p}_\omega + d\tilde{p}_\omega) \tilde{s}_b,$$

откуда найдем безразмерное уравнение динамики рециркулируемого воздуха: $dp_\omega + 4\omega d\omega = 0$; $p_\omega = 2\tilde{p}_\omega / (\tilde{\rho} \tilde{v}_k^2)$; $\omega = \tilde{\omega} / \tilde{v}_k$, где p_ω — безразмерное статическое давление в поперечных сечениях байпасного канала.

Величина этого давления определяется в нашем случае очевидным уравнением:

$$p_\omega = p_a - 2\omega^2; \quad p_a = 2\tilde{p}_a / (\tilde{\rho} \tilde{v}_k^2), \quad (2)$$

где \tilde{p}_a — избыточное статическое давление в начале (в конце) канала, Па.

Применив к элементарным объемам $d\tilde{x} \cdot \tilde{s}_t$ и $d\tilde{x} \cdot \tilde{s}_b$ интегральное соотношение сохранения массы: $\int_S \tilde{\rho} \tilde{u}_n d\tilde{S} = 0$, получим следующие соотношения между скоростями воздуха в начальном участке перфорированной трубы и байпасной камеры¹:

$$\frac{du}{dx} = \hat{S}_t w; \quad \frac{d\omega}{dx} = \hat{S}_b w; \quad \frac{d(u - \omega \cdot r)}{dx} = 0; \quad (3)$$

$$\omega = \frac{(u - u_0)}{r}; \quad r = \hat{S}_t / \hat{S}_b, \quad (4)$$

где $\hat{S}_t = \frac{\tilde{\Pi} \tilde{l}}{\tilde{s}_t} \varepsilon$; $\hat{S}_b = \frac{\tilde{\Pi} \tilde{l}}{\tilde{s}_b} \varepsilon$; $\tilde{\Pi}$ — периметр трубы, м;

\tilde{s}_b — площадь поперечного сечения байпасного канала, м²;
 ε — степень перфорации стенок трубы ($\varepsilon = 0$ при отсутствии перфорации,
 $\varepsilon = 1$ при отсутствии стенок трубы);

$w = \frac{\tilde{w}}{\tilde{v}_k}$; $u_0 = \frac{\tilde{u}_0}{\tilde{v}_k}$; \tilde{w} — скорость воздуха в отверстиях перфорации, м/с;

\tilde{u}_0 — скорость эжектируемого воздуха в начале трубы, м/с (так как $\omega(0) = \omega(1) = 0$ из (4) очевидно, что $\tilde{u}_k = \tilde{u}_0$, \tilde{u}_k — скорость в конце трубы, м/с).

Скорость перетекания воздуха из трубы в байпасную камеру по отверстиям перфорации определяется соотношением

$$\tilde{w} = \gamma_1 \sqrt{\frac{2 |\tilde{p}_\omega - \tilde{p}|}{\zeta_0 \tilde{\rho}}}; \quad \gamma_1 = \text{signum}(\tilde{p}_\omega - \tilde{p})$$

или в безразмерном виде

$$w = \frac{\gamma \sqrt{|p_\omega - p|}}{\sqrt{\zeta_0}}; \quad \gamma = \text{signum}(p_\omega - p), \quad (5)$$

где ζ_0 — коэффициент местного сопротивления отверстия перфорации.

Таким образом, с учетом соотношения (2) и (4), (1) и (3), (5) имеем:

$$\frac{du}{dx} = E \cdot \gamma \sqrt{|p|}; \quad (6)$$

$$\frac{dp}{dx} = -4uE\gamma \sqrt{|p|} + \text{Le}(v-u)|v-u|/v, \quad (7)$$

где

$$p = p_\omega - p = p_a - 2 \left(\frac{u - u_0}{r} \right)^2 - p; \quad (8)$$

$$E = \hat{S}_t / \sqrt{\zeta_0} = \tilde{\Pi} \tilde{l} \varepsilon / (\tilde{s}_t \sqrt{\zeta_0});$$

¹ Предполагается, что перетекание воздуха через перфорационные отверстия на начальном участке происходит из байпасной камеры в трубу; в конечном участке наоборот — из трубы в камеру.

$$v = \sqrt{(1-n^2)x + n^2}; \quad n = \tilde{v}_0 / \tilde{v}_k; \quad (9)$$

\tilde{v}_0 — скорость потока частиц при входе в трубу, м/с.

Для численного решения системы двух уравнений (6) и (7) используем следующие граничные условия:

$$u(0) = u_0; \quad p(0) = -\zeta_n u_0^2; \quad (10)$$

$$u(1) = u_a; \quad p(1) = \zeta_k u_a^2, \quad (11)$$

где ζ_n, ζ_k — коэффициенты местных сопротивлений движению воздуха при входе в трубу и при выходе из трубы. Некоторые трудности возникают в связи с тем, что искомыми как раз являются скорость воздуха при входе в трубу (при выходе из трубы) — u_0 и избыточное давление в начале (в конце) байпасного канала — p_a .

Поэтому решение краевой задачи осуществляется методом пристрелки: задавшись u_0 , решается задача Коши с начальными условиями (10), при этом задается величиной p_a из условия

$$p(1) > p_a > p(0)^2,$$

т.е. $p_a \approx \frac{(\zeta_k - \zeta_n)}{2} u_0^2$ и затем проверяется условие (11). Для облегчения

поиска величин u_0 и p_a можно использовать метод бисекции (метод половинного деления).

2. Предварительная оценка параметров исходных уравнений.

Для численного решения системы (6), (7) (с учетом соотношений (8)–(11)) необходимы некоторые аналитические преобразования, позволяющие сделать предварительную оценку параметров задачи исходных уравнений.

Прежде покажем, что граничные условия (10), (11) можно расширить на случай примыкания перфорированного желоба к аспирируемым укрытиям (рис. 2), на котором обозначены следующие абсолютные давления: $\tilde{P}_{\text{атм}}$ — в помещении, Па; \tilde{P}_n — в верхнем укрытии, Па; \tilde{P}_f — в формкамере (во внутренней камере) нижнего укрытия, Па; \tilde{P}_a — в начале и конце байпасного канала, Па; \tilde{P}_0 — за входным сечением трубы, Па; \tilde{P}_k — перед выходным сечением трубы, Па. Эти давления связаны с абсолютными давлениями в начальных и конечных сечениях очевидными уравнениями: $\tilde{P}_n - \tilde{P}_0 = \zeta_n \frac{\tilde{u}_0^2}{2} \tilde{p}$; $\tilde{P}_k - \tilde{P}_f = \zeta_k \frac{\tilde{u}_0^2}{2} \tilde{p}$; $\tilde{P}_a - \tilde{P}_0 = \zeta_0 \frac{|\tilde{w}_0| \tilde{w}_0}{2} \tilde{p}$; $\tilde{P}_k - \tilde{P}_a = \zeta_0 \frac{|\tilde{w}_k| \tilde{w}_k}{2} \tilde{p}$; или в безразмерном виде (разделив обе части равенств на $\tilde{v}_k^2 \tilde{p} / 2$)

$$P_n - P_0 = \zeta_n u_0^2; \quad (12)$$

$$P_k - P_f = \zeta_k u_0^2; \quad (13)$$

$$P_a - P_0 = \zeta_0 |w_0| w_0; \quad P_k - P_a = \zeta_0 |w_k| w_k.$$

² Можно также воспользоваться результатами приближенного решения (например, решением линеаризованного уравнения, которое будет получено позже).

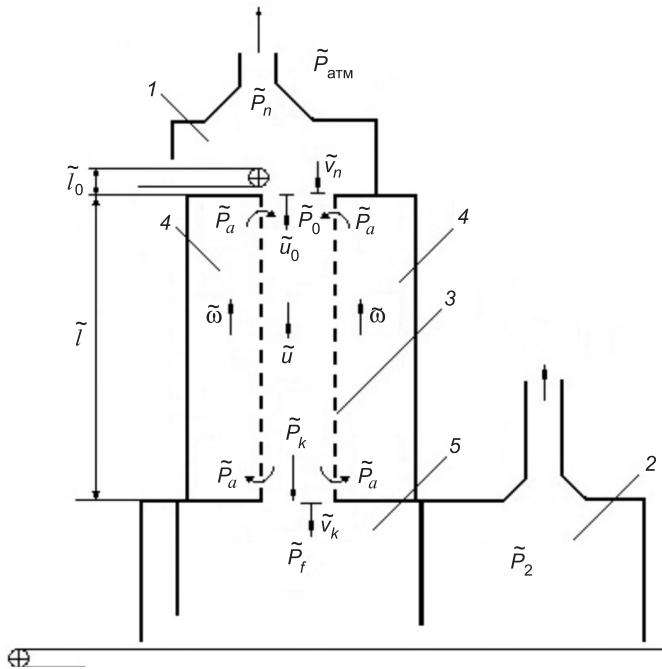


Рис. 2. Схема аспирации перегруженного узла, оснащенного верхним (1) и нижним (2) аспирируемыми укрытиями, перфорированным желобом (3) с байпасной камерой (4) и формкамерой (5) в нижнем укрытии

Интересующие нас краевые условия (12) и (13) можно выразить через избыточные давления

$$(P_n - P_{\text{атм}}) - (P_0 - P_{\text{атм}}) = \zeta_n u_0^2; \quad (P_k - P_{\text{атм}}) - (P_f - P_{\text{атм}}) = \zeta_k u_0^2$$

или $p_{un} - p_{u0} = \zeta_n u_0^2$; $p_{uk} - p_{uf} = \zeta_k u_0^2$,

где p_{un} , p_{u0} — безразмерные избыточные давления в верхнем укрытии и в начальном сечении желоба;

p_{uk} , p_{uf} — безразмерные избыточные давления в конечном сечении и в формкамере.

Таким образом, граничные условия для давления вместо (10) и (11) примут следующий вид:

$$p(0) = p_{un} - \zeta_n u_0^2; \quad (14)$$

$$p(1) = p_{uf} + \zeta_k u_0^2, \quad (15)$$

отличающиеся на величину констант p_{un} и p_{uf} .

Объемный расход воздуха при входе в перфорированный желоб или при выходе из него определяется по формуле $\tilde{Q}_t = \tilde{u}_0 \tilde{s}_t$, м³/с, где \tilde{u}_0 — скорость воздуха в начальном (конечном) сечении трубы (желоба), м/с; \tilde{s}_t — площадь поперечного сечения перфорированной трубы (желоба), м². Если используется безразмерная величина скорости воздуха u_0 в начальном (конечном) сечении, то расчетная формула имеет другой вид $\tilde{Q}_t = u_0 \tilde{v}_k \tilde{s}_t$, м³/с, где \tilde{v}_k — скорость частиц при выходе из трубы (желоба):

$$\tilde{v}_k = \sqrt{2\tilde{g}(\tilde{l} + \tilde{l}_0)} = \sqrt{\tilde{v}_n^2 + 2\tilde{g}\tilde{l}}.$$

Здесь $\tilde{v}_n = \sqrt{2\tilde{g}\tilde{l}_0}$; \tilde{l} — высота перфорированной трубы (желоба), м;

\tilde{l}_0 — высота падения частиц перед входом в перфорированную трубу (желоб), м. В этом случае отношение скоростей частиц $n = \frac{\tilde{v}_n}{\tilde{v}_k} = \sqrt{\frac{\tilde{l}_0}{\tilde{l}_0 + \tilde{l}}}$.

Проинтегрируем уравнение (7) по длине канала (с учетом уравнения (6)):

$$\int_{P(0)}^{P(1)} dp = -4 \int_{u(0)}^{u(1)} u du + Le \int_0^1 \frac{|v-u|}{v} (v-u) dx.$$

Преобразуя это равенство с учетом граничных условий (10) и (11), получим следующее интегральное соотношение для определения скорости эJECTируемого воздуха u_0 :

$$u_0^2 = \frac{Le}{\Sigma \zeta} \int_0^1 \frac{|v-u|}{v} (v-u) dx; \quad \Sigma \zeta = \zeta_n + \zeta_k; \quad (16)$$

при известной функции

$$u = F_u(x, Le, E, r, \zeta_n, \zeta_k, \zeta_0). \quad (17)$$

Заметим, что для случая непроницаемых стенок ($\epsilon = 0; E = 0$) эта функция $u = u_0 = \text{const}$ и интегральное соотношение (16) позволяет с учетом (9) составить следующее алгебраическое уравнение для определения скорости эJECTируемого воздуха в обычном (неперфорированном) канале постоянного сечения:

$$u_0^2 = Bu \int_n^1 |v-u_0| (v-u_0) dv = Bu \cdot \begin{cases} \frac{(1-u_0)^3 - (n-u_0)^3}{3} & \text{при } u_0 \leq n; \\ \frac{(1-u_0)^3 (u_0-n)^3}{3} & \text{при } 1 \geq u_0 \geq n, \end{cases}$$

где $Bu = \frac{2Le}{(1-n^2)\Sigma \zeta}$, т.е. при $0 \leq Le \leq Le_0$ ($0 \leq Bu \leq Bu_0$): $\frac{3u_0^2}{(1-u_0)^3 - (n-u_0)^3} = Bu$, а при $\infty \geq Le \geq Le_0$ ($\infty \geq Bu \geq Bu_0$): $\frac{3u_0^2}{(1-u_0)^3 - (u_0-n)^3} = Bu$, где $Le_0 = \frac{3n^2(1-n^2)\Sigma \zeta}{2(1-n)^3}$; $Bu_0 = \frac{3n^2}{(1-n)^3}$ являются переходными константами эJECTии.

Из последнего уравнения найдем максимальное значение скорости эJECTируемого воздуха (впервые найденное в работе [2]): $\lim_{Bu \rightarrow \infty} u_0 \equiv u_0^{\max} = \frac{1+n}{2}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. — СПб. : Химиздат, 2005. — 659 с.
- Логачев, И.Н. Одномерный поток сыпучего материала в наклонных желобах [Текст] / И.Н. Логачев // Вентиляция и очистка воздуха. Вып. 6. — М. : Недра (НИИрудвентиляция), 1970. — С. 121–128.

ЛОГАЧЕВ Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 11.09.12

Logachev Ivan Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Logachev Konstantin Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Averkova Olga Alexandrovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

EJECTION OF AIR BY THE STREAM OF BULK MATERIAL IN A VERTICAL PERFORATED TROUGH

Mess a g e 1. THE DYNAMICS EQUATIONS OF EJECTED AND RECIRCULATED AIR

Were obtained hydrodynamic equations for estimating inter-component interaction in a vertical perforated trough when moving of gravitational flow of bulk material and air ejection.

The numerical solution of obtained system of nonlinear ordinary differential equations and the analytical solution of the linearized equations have allowed to reveal regularities of change of speed of ejected air in a perforated gutter, pressure in the bypass chamber along the trench, increasing perforation walls, depending on the size of the bypass camera, the number of ejection.

Defined rational perforation degree range ejection resistance coefficients and the ratio of cross-sections and tube cameras providing the greatest decrease in ejection due to recirculation.

Key words: aspiration, bulk material transfer, air suction.

REFERENCES

1. Logachev, I.N. Aerodynamic basis of aspiration [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev. — St. Petersburg : Himizdat, 2005. — 659 p.
 2. Logachev, I.N. One-dimensional flow of a bulk material in chutes [Text] / I.N. Logachev // Air ventilation and treatment. V. 6. — M. : Nedra (NIIrudventilyatsiya), 1970. — P. 121–128.
-

УДК 697.921.2

В.А. БРОЙДА

ЭКОНОМИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ СТАБИЛИЗАЦИИ РАСХОДА ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Рассчитывается снижение затрат тепловой энергии за счет стабилизации расхода воздуха естественной вытяжной системы в холодный период года и предлагается оценка стоимости стабилизирующего устройства.

Ключевые слова: экономия, стабилизирующее устройство, естественная вытяжная вентиляция.

Воздух, удаляемый естественной вытяжной вентиляцией, замещается наружным холодным воздухом, на нагревание которого затрачивается значительное количество тепловой энергии. В старых зданиях наружный воздух просачивается через неплотности ограждений, в основном через неплотности окон. В зданиях с плотными окнами для того, чтобы обеспечить проникновение достаточного количества воздуха, применяются специальные впускные устройства (аэроматы, клапаны, встраиваемые в окна, в наружные стены).

С понижением температуры наружного воздуха возрастает естественное давление, что при отсутствии регулирования ведет к увеличению расхода удаляемого воздуха. Повышаются затраты тепловой энергии на нагревание избыточного расхода наружного воздуха в холодный период года.

Стабилизация расхода естественной вытяжки позволит избежать либо снизить бесполезные затраты тепловой энергии. Стабилизирующие устройства можно устанавливать на вытяжных каналах, а в зданиях с плотными окнами — на впускных устройствах. Стабилизирующие расход воздуха устройства [1 и др.] не идеальны, более сложные и дорогие, точнее поддерживают заданный расход.

Целью исследования является оценка обоснованной стоимости устройств, стабилизирующих расход естественной вытяжной вентиляции с учетом целесообразной точности поддержания заданного расхода воздуха.

Находим располагаемое естественное давление P при температуре наружного воздуха t

$$P = g \cdot h \cdot (\rho - \rho_b), \quad (1)$$

где h — разница отметок центра впускного устройства и устья вытяжного канала, м;

ρ — плотность воздуха, при любой температуре t определяется выражением

$$\rho = 353 / (273 + t). \quad (2)$$

Расчетный расход естественной вытяжной вентиляции L_5 устанавливается при температуре наружного воздуха $t = 5^{\circ}\text{C}$ и соответствующем этой температуре естественном давлении P_5 .

Расход естественной вытяжки при изменяющейся температуре наружного воздуха составляет L и в относительном виде

$$L^* = L/L_5 = ((273 + 5) \cdot (t_{\text{в}} - t) / ((273 + t) \cdot (t_{\text{в}} - 5)))^{1/2}. \quad (3)$$

При точной стабилизации расхода удаляемого воздуха $L = L_5$. Реальные стабилизирующие устройства имеют определенную погрешность. Предполагается, что стабилизирующее устройство гасит избыток давления $\Delta P_{\text{ст}}$, пропорциональный перепаду естественного давления и давления, с которого оно начинает работать P_0 (соответствует некоторому расходу удаляемого воздуха $L_0 > L_5$),

$$\Delta P_{\text{ст}} = k \cdot (P - P_0), \quad (4)$$

где k — характеристика качества стабилизирующего устройства.

Давление, за счет которого перемещается воздух при стабилизации:

$$P_{\text{ст}} = P - \Delta P_{\text{ст}} = P \cdot (1 - k) - k \cdot P_0. \quad (5)$$

Определим относительный расход естественной вытяжки при стабилизации

$$\begin{aligned} L_k^* &= L_k / L_5 = ((P \cdot (1 - k) - k \cdot P_0) / P_5)^{1/2} = \\ &= ((L^2 \cdot (1 - k) - k \cdot L_0^2)^{1/2}) / L_5. \end{aligned} \quad (6)$$

В данном решении L_0 задается выражением $L_0 = L_5 \cdot (1 + 0,5 \cdot (1 - k))$.

Годовой ход температуры наружного воздуха приближенно может быть описан изменением ее среднемесячных значений [2]. Более точно изменение температуры наружного воздуха определяется с помощью данных о продолжительности стояния температуры наружного воздуха, которые учитывают и состояния воздуха с температурой, выходящей за среднемесячные значения.

Точность такого описания зависит только от подробности представления климатических данных, которые обычно даются в виде таблиц [3]. По этим данным после обработки могут быть получены формулы для аналитического выражения продолжительности стояния определенной температуры $t = f(z)$. В частности можно использовать полиномы n -й степени. На рис. 1 показан график продолжительности стояния температур в пределах отопительного периода для г. Казани и его аппроксимация полиномом шестой степени.

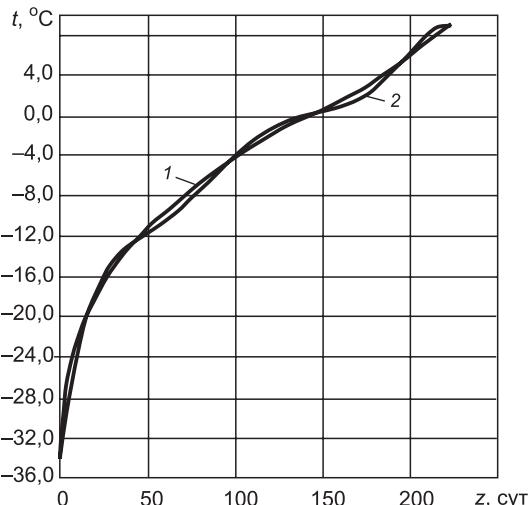


Рис. 1. График продолжительности стояния температуры наружного воздуха для г. Казани
1 — изменение t , 2 — ее полиномиальное представление

$$\begin{aligned} t = & -2,0277984E-11z^6 + 1,4669290E-08z^5 - 4,0855605E-06z^4 + \\ & + 5,5212376E-04z^3 - 0,03781099z^2 + 1,3801748z - 34,00. \end{aligned} \quad (7)$$

С помощью подобных функций или графиков определяется время окончания использования естественной вытяжной вентиляции z_2 , когда температура воздуха составляет $t = +5^{\circ}\text{C}$. Время начала ее использования $z_1 = 0$ соответствует минимальной температуре наружного воздуха.

Вычислим удельные затраты тепловой энергии на нагревание втекающего наружного воздуха без стабилизации вытяжки в годовом цикле на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ расчетного воздухообмена L_5 ($\text{кДж} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$)

$$Q/L_5 = \int_0^{z_2} L^* \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{\text{в}} - t) dz, \quad (8)$$

а при стабилизации

$$Q_{\text{ст}}/L_5 = \int_0^{z_2} L_k^* \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{\text{в}} - t) dz, \quad (9)$$

с учетом того, что при $L < L_0$ устройство не может стабилизировать расход удаляемого воздуха. Здесь c — теплоемкость воздуха, равная $1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Определим эффективность применения стабилизации расхода естественной вытяжки

$$ef = (Q - Q_{\text{ст}})/Q. \quad (10)$$

Годовое уменьшение затрат тепловой энергии на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ расчетного воздухообмена ($\text{ГДж} \cdot /\text{м}^3$)

$$q = (Q/L_5 - Q_{\text{ст}}/L_5) \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Для сравнения выбраны города Калининград, Казань и Пермь, отличающиеся климатическими данными. Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) этих городов, рассчитанные по данным [2], соответственно составляют: ГСОП1 = $3628^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$, ГСОП2 = $5418^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$, ГСОП3 = $5931^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$.

На рис. 2 графически представлена зависимость величины ef от коэффициента k , характеризующего качество стабилизирующего устройства для климатических условий этих городов. Расчеты выполнены при температуре внутреннего воздуха $t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$.

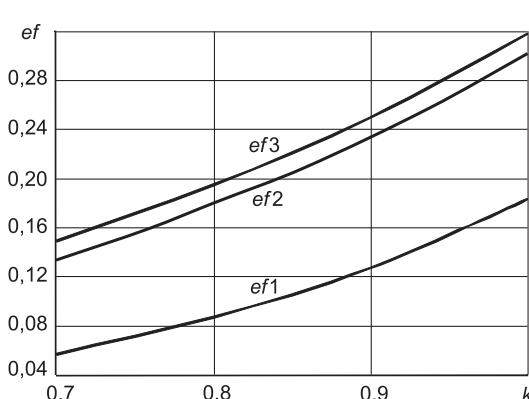


Рис. 2. Эффективность стабилизации расхода ef в зависимости от k для Калининграда ($ef1$), Казани ($ef2$), Перми ($ef3$)

На рис. 3 приведена зависимость величины q от k .

Годовая экономия тепла, связанная с применением стабилизирующего устройства, может быть выражена следующей формулой (ГДж)

$$\Delta Q = L_5 \cdot q \cdot n \cdot m / 7 / 24, \quad (12)$$

где n — число часов эксплуатации вытяжной системы в сутки, ч;

m — число суток эксплуатации вытяжной системы в неделю.

Экономичность энергосберегающего устройства можно оценить с помощью срока окупаемости, который при норме дисконта $r \approx 0,1$ и с учетом наращивания получаемого дохода составляет порядка $7 \div 8$ лет [4]. Тогда при стоимости тепловой энергии C_t применять стабилизирующее устройство того или иного качества выгодно, если его цена \mathbb{C} (руб.) отвечает условию

$$\mathbb{C} \leq (7 \div 8) \cdot \Delta Q \cdot C_t. \quad (13)$$

По результатам исследования можно выполнить расчет экономически оправданной цены стабилизирующего устройства.

Пример. Расчетный расход воздуха $L_5 = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура воздуха в помещении $t_b = 20^\circ\text{C}$, район строительства г. Казань. Вытяжная естественная вентиляция работает круглосуточно $n = 24$ ч, семь дней в неделю $m = 7$. Стоимость тепловой энергии C_t составляет 1000 руб. за 1 Гкал. Предполагаемое к установке стабилизирующее устройство характеризуется коэффициентом $k = 0,9$.

Решение. 1. По графику на рис. 2 эффективность работы устройства в годовом цикле составляет $ef = 0,234$.

2. По графику на рис. 3 при $k = 0,9$ находится $q = 0,056 \text{ ГДж} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$.

3. По формуле (12) рассчитывается годовая экономия тепловой энергии, полученной от применения стабилизирующего устройства

$$\Delta Q = 50 \cdot 0,057 \cdot 24 \cdot 7 / 24 / 7 = 2,8 \text{ ГДж или } 0,669 \text{ Гкал.}$$

4. По формуле (13) рассчитывается экономически обоснованная цена стабилизирующего устройства

$$\mathbb{C} = 7 \cdot 0,669 \cdot 1000 = 4683 \text{ руб.}$$

При тех же исходных данных для менее качественного устройства с характеристикой $k = 0,7$ эффективность $ef = 0,133$, а величина $q = 0,032 \text{ ГДж} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$, аналогично выполненный расчет приведет к цене $\mathbb{C} = 2676$ руб.

Таким образом, на основе расчета экономии тепловой энергии определяется обоснованная цена устройства для стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции. Оценка учитывает расчетный расход удалаемого воздуха, климатические и временные условия использования вентиляции, качество стабилизирующего устройства, стоимость тепловой энергии и приемлемый срок окупаемости.

Обоснованная высокая цена устройства подтверждает целесообразность стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции для регионов с умеренно прохладным и холодным климатом даже при использовании дорогого и качественного стабилизирующего устройства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. RU № 2277206 Российская Федерация, МПК F24F 11/04. 13/08. Устройство для регулирования расхода воздуха [Текст] / Н.И. Капустин, И.Я. Федоренко, В.А. Демин, В.Н. Капустин ; Заявитель и патентообладатель Н.И. Капустин. — Заявка 2004135681 ; заявл. 06.12.2004 ; опубл. 27.05. 2006, Бюл. № 15. — 15 с.

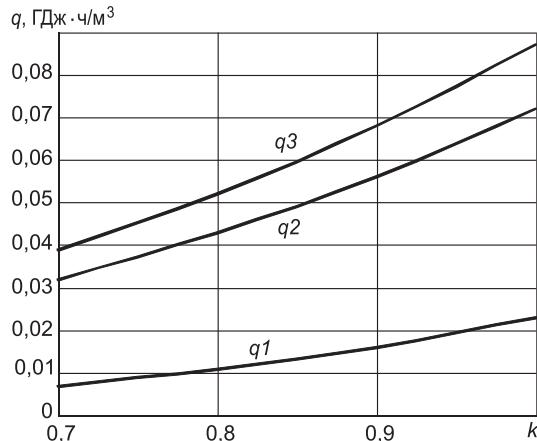


Рис. 3. Годовая удельная экономия тепла q в зависимости от k для Калининграда (q_1), Казани (q_2), Перми (q_3)

2. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология [Текст] / Госстрой России. — М. : ФГУП ЦПП, 2003. — 70 с.
3. Справочное пособие к СНиП 23-01-99*. Строительная климатология [Текст] / НИИСФ РААСН. — М. : НИИСФ, 2006. — 258 с.
4. Табунщиков, Ю.А. Оценка экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия [Текст] / Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин. — АВОК. — 2005. — № 7. — С. 10–16.

*БРОЙДА Владимир Аронович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: broida@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 24.09.12

Broyda Vladimir Aronovich, candidate of technical sciences, assistant professor;
E-mail: broida@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

HEAT SAVINGS BASED ON AIR FLOW RATE STABILIZATION OF NATURAL VENTILATION

Reduction of heat consumption due to air flow stabilization of natural ventilation during the cold season is calculated. Cost estimates of the stabilizing device are presented.

Key words: heat savings, stabilizing device, natural ventilation.

REFERENCES

1. Pat. RU № 2277206 Russian Federation, MPK F24F 11/04. 13/08. Device for air supply control [Text] / N.I. Kapustin, I.Ya. Fedorenko, V.A. Demin, V.N. Kapustin ; Applicant and patent holder N.I. Kapustin. — Application 2004135681 ; appl. 06.12.2004 ; Published 27.05. 2006, Bulln. N 15. — 15 p.
 2. SN&R 23-01-99*. Building Climatology [Text] / Gosstroj Russia. — М. : FGUP CPP, 2003. — 70 p.
 3. Reference guide to the SN&R 23-01-99*. Building Climatology [Text] / NIISF PAASN. — М. : NIISF, 2006. — 258 p.
 4. Tabunichikov, Yu.A. Economic evaluation of effectiveness of investments in energy-saving measures [Text] / Yu.A. Tabunichikov, N.V. Shilkin. — HVAC, 2005. — N 7. — P. 10–16.
-

УДК 697.9:624.193:614.84

А.А. АДЕЕВ, И.В. ЛУГИН

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЖАРНО-ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ ГОРЕНИИ ПОЕЗДА

Рассмотрена динамика температуры пожарно-дымовых газов в тоннеле метрополитена при их движении от стоящего в тоннеле горящего поезда.

Ключевые слова: метрополитен, пожар, температура, тоннель.

Объект исследования данной работы — однопутный тоннель метрополитена. Большая часть эксплуатирующихся метрополитенов РФ и стран СНГ построена с использованием именно однопутных тоннелей. Переходы имеют сборную обделку из железобетонных тюбингов, а в сложных инженерно-геологических условиях и в местах примыкания к инженерным сооружениям (камерам съездов, станциям, венткамерам) — участки с обделкой из чугунных тюбингов.

Предметом исследования являются пожарно-дымовые газы (ПДГ), изменение их температуры по длине задымленного участка тоннеля при остановке в нем горящего поезда. Рассмотренный случай возгорания крайнего вагона остановившегося в тоннеле поезда — один из самых опасных вариантов чрезвычайной ситуации в метрополитене. Опасность обусловлена большим скоплением людей в области очага возгорания, блокированием тоннеля горящим поездом (рис. 1) и длинным путем эвакуации в условиях возможности его задымления, что ведет к большой вероятности появления человеческих жертв.

Управление тоннельной вентиляцией метрополитена обеспечивает безопасную эвакуацию пассажиров, проведение эффективных аварийно-спасательных работ и позволяет избежать или свести к минимуму количество жертв. Безопасность пути эвакуации обеспечивается организацией такого воздухораспределения, при котором струя чистого воздуха направлена навстречу эвакуирующемуся пассажирам и обслуживающему персоналу. Скорость движения воздуха нормируется СП «Метрополитены» [1] в зависимости от сечения тоннеля и его уклона. Таким образом, тоннель с горящим поездом (см. рис. 1) делится на два участка: участок чистого воздуха, в котором производится эвакуация, и участок задымленный, через который проводится дымоудаление [2]. На задымленном участке тоже могут оказаться люди и, следовательно, там будут работать спасатели. В работе рассмотрен такой опасный фактор пожара, как температура ПДГ в задымленном участке тоннеля. Так как верхняя граница температур, при которых возможно проведение аварийно-спасательных работ подразделениями ВГСЧ [3], составляет 40 °C (без специальных теплозащитных костюмов), скорость движения фронта ПДГ с такой температурой по тоннелю позволит определить пространственно-временные рамки проведения спасательных операций на задымленном участке, чтобы повысить их эффективность.

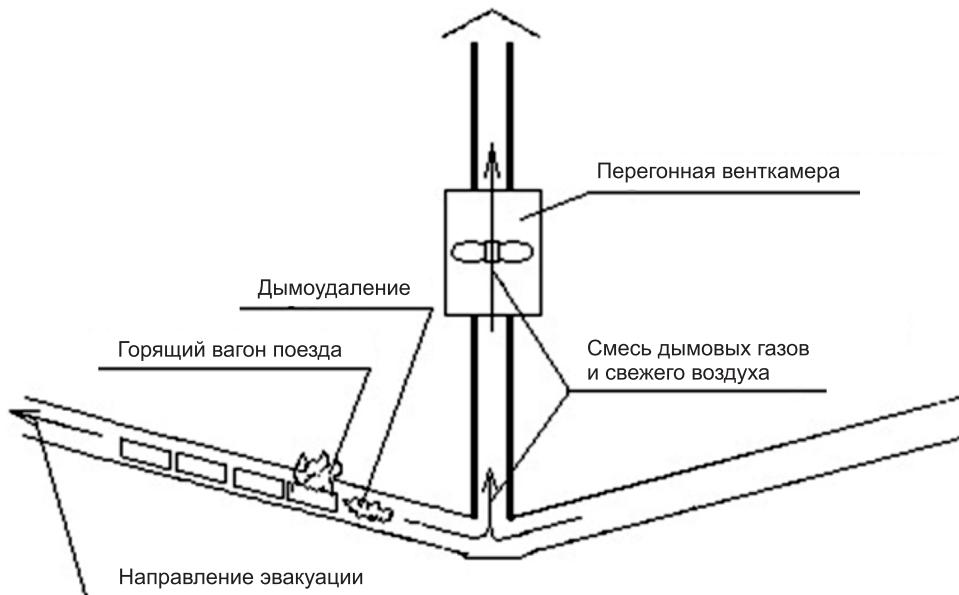


Рис. 1. Горящий поезд в тоннеле

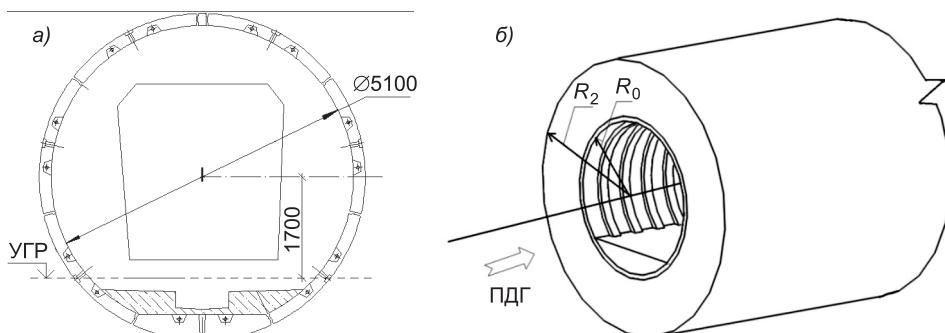


Рис. 2. Однопутный тоннель с железобетонными тюбингами
а — чертеж; б — схема к расчетной модели

Путевой перегонный тоннель относится к основным сооружениям метрополитена. Как правило, это тоннель с обделкой из железобетонных тюбингов (рис. 2, а), имеющий круглое сечение, ограниченное снизу основанием пути и рельсами, внутренний диаметр тоннеля 5,1 м, эквивалентный 4,81 м, площадь 18,62 м² [4].

Рассмотрим участок такого тоннеля с остановившимся на нем поездом с горящим крайним вагоном. Для поддержания безопасности путей эвакуации нормируемая скорость на них составляет 2,23 м/с для уклона 0 % (таблица 5.16.2 [1]). При горении одного крайнего вагона температура ПДГ за его торцом (рис. 3) принимается по имеющимся экспериментальным данным¹.

¹ Голиков А.Д., Негодаев Г.Д., Чижиков В.П. Требуемый предел огнестойкости обделок тоннелей метрополитена // Борьба с пожарами в метрополитенах: Сб. науч. тр. ВНИИПО МВД РФ, 1992. С. 71–78.

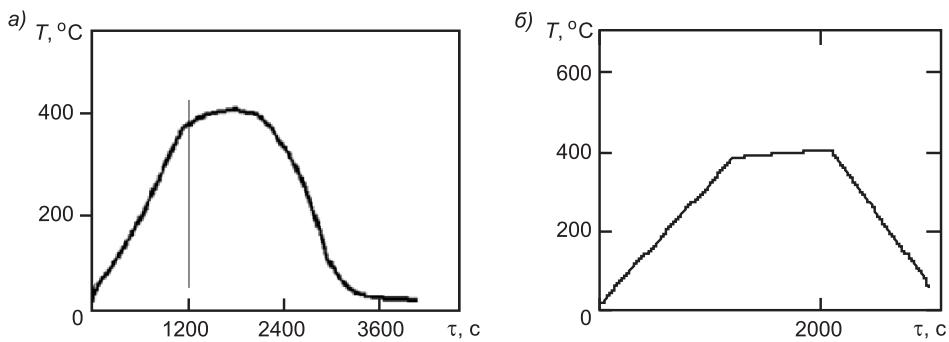


Рис. 3. Температура ПДГ за торцом горящего крайнего вагона
а — экспериментальные данные; б — аппроксимация

Для удобства использования в расчетах проведена кусочно-линейная аппроксимация графика изменения этой температуры T ($^{\circ}\text{C}$).

$$T(t) = \begin{cases} 0,303t + 16, & t \leq 1200, \\ 0,22t + 353,3, & 1200 < t \leq 3100, \\ -0,378t + 1193,33, & t > 3100. \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 3 видно, что максимальная скорость роста температуры приходится на первые 20 мин (1200 с) с начала возгорания. Согласно расчетной нормативной скорости движения фронта горения по вагону 1 м/мин [1] при его длине 20 м, за 20 мин весь вагон горит, и скорость роста температур резко снижается.

Для определения динамики температуры ПДГ на задымленном участке тоннеля за время развития пожара разработаем расчетную модель процесса сопряженного теплообмена на этом участке. Двигаясь по тоннелю, ПДГ остывают за счет теплообмена с обделкой и окружающим тоннель грунтовым массивом, при переменном значении коэффициента теплоотдачи от ПДГ к стенке тоннеля. Примем и приведем краевые условия для решения этой задачи.

Начальные условия:

— температура воздуха в тоннеле, стенки тоннеля, грунтового массива в заобделочном пространстве в нулевой момент времени одинакова и равна 16 $^{\circ}\text{C}$. В реальности такая температура грунта есть в окрестностях тоннеля, чем дальше от тоннеля, тем более она отличается от температуры воздуха в тоннеле. Но диапазон ее изменения составляет 10–15 $^{\circ}\text{C}$, что существенно ниже, чем диапазон изменения температуры ПДГ в тоннеле, поэтому неравновесностью в начальном распределении температуры в грунте пренебрегаем.

Граничные условия:

— на внешней стенке грунтового массива задается условие первого рода, температура стенки равна начальной температуре грунта;
 — на торцах тоннеля и грунтового массива теплообмен отсутствует;
 — на входе в тоннель задается скорость потока и температура ПДГ, скорость постоянна, температура меняется в соответствии с зависимостью (1), рис. 3, б;
 — на выходе из тоннеля задается атмосферное давление.

Впоследствии часть граничных условий будет меняться в зависимости от решаемой задачи и расчетной модели.

Геометрия тоннеля и обделки принята по [4] с незначительными упрощениями (см. рис. 2, б) (не рассматриваются рельсы, шпалы, кронштейны с кабелями). Техофизические свойства (ρ — плотность, c — теплоемкость, λ — теплопроводность, w — относительная влажность)

Таблица 1

Теплофизические свойства слоев грунта и обделки

Состав (материал) слоя	Теплофизические свойства		
	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг · °C)	λ , Вт/(м · °C)
Грунт — суглинок лессовый ($w = 60\%$)	1680	2,35	1,51
Обделка — железобетон	2500	0,84	2,04

железобетонного тюбинга обделки и грунтового массива приведены в табл. 1.

За рабочее тело ПДГ принят газ CO₂. Расчет проведен с учетом действия гравитации и сопутствующего температурного разделения потока по высоте тоннеля.

Для адекватного моделирования процесса теплообмена при заданных граничных условиях необходимо определиться с минимальной толщиной слоя грунтового массива вокруг тоннеля. Это весьма важно, так как при большой толщине слоя размерность задачи становится высокой, время счета (компьютерное время) занимает несколько суток, а точность решения повышается несущественно. Это обусловлено тем, что с некоторого расстояния от обделки тоннеля температура грунта практически не изменяется, поэтому этот слой грунта можно не учитывать в модели. С другой стороны, если слой грунта в модели будет слишком тонок, это может привести к большой погрешности результатов решения задачи. Проведем оценочный расчет толщины прогретого слоя за время существования пожара на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности (модель № 1), полученные результаты будут использованы для решения задачи сопряженного теплообмена методом конечных элементов (объемная модель). В модели № 1 рассматривается поперечное сечение тоннеля и грунта в непосредственной близости от торца горящего вагона, т.е. ПДГ имеют максимальную температуру.

Моделирование прогрева слоя грунта вокруг тоннеля. Приведем описание расчетной модели № 1.

Расчет температуры ведется на основе решения дифференциального уравнения нестационарной теплопередачи в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right),$$

где T — температура, К;

τ — время, с;

a — температуропроводность, м²/с;

R — расстояние от оси тоннеля, м.

Геометрия модели: радиус внутренней поверхности тоннеля $R_0 = 2,55$ м (см. рис. 2), затем идет слой обделки до $R_1 = 2,7$ м, далее слой грунта до внешней границы $R_2 = 10$ м. Последняя величина принимается заведомо больше толщины прогретого слоя, граница которого определяется радиусом, на котором изменение температуры грунта составляет менее 1 град. в течение максимально большого роста температуры ПДГ, т.е. от 0 до 1200 с развития пожара.

Отличие краевых условий от изложенных выше заключается в том, что граничные условия на внутренней границе обделки определяются условием третьего рода, изменение температуры ПДГ принимается по графику на рис. 3, б и аппроксимации (1), коэффициент теплообмена $\alpha = 20,12$ Вт/(м² · °C) [4].

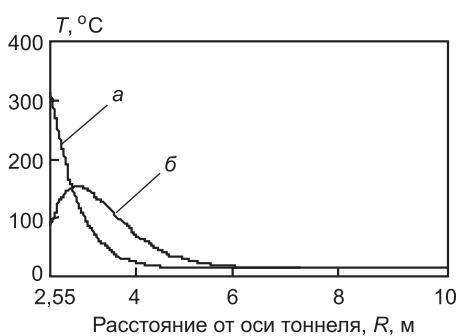


Рис. 4. Температура грунта в момент времени
 $a = 1200$ с; $b = 3000$ с от начала пожара

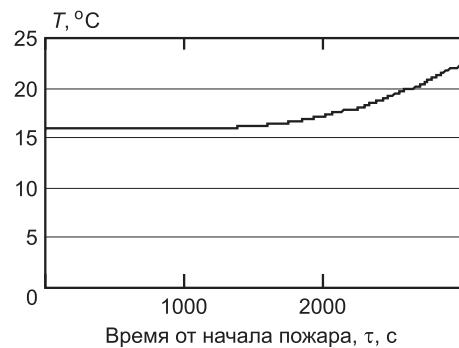


Рис. 5. Зависимость изменения температуры грунта от времени на расстоянии 3 м от внутренней поверхности обделки

Решением дифференциального уравнения в принятых краевых условиях получены зависимости температуры от времени для толщины грунтового массива.

На графиках (рис. 4 и 5) видно, что толщина прогретого слоя в наиболее прогреваемом сечении вблизи торца вагона не превышает 3 м, что соответствует радиусу 5,55 м от оси тоннеля. За время наибольшей скорости развития пожара (временной промежуток 0–1200 с) температура на внешней границе прогретого слоя не превышает начальную 16 °C более чем на 1 °C. За общую продолжительность пожара (3000 с) температура увеличилась не более чем на 10 °C от начальной.

Проведен расчет изменения температурного поля грунта и обделки вокруг тоннеля (модель № 2) с использованием конечно-элементной модели с краевыми условиями, аналогичными модели № 1.

Для увеличения скорости расчета ограничим геометрию модели сектором с заданием условий симметричности на границах сечений (рис. 6).

Проведем сравнение результатов моделирования и сопоставим температуры на расстоянии 3; 4; 5; 5,5; 6; 7 м от оси тоннеля для момента времени 1200 с от начала пожара. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Расхождение температур с одинаковыми пространственно-временными координатами в двух моделях не превышает 8,6 °C, что составляет 2,1 %, это подтверждает адекватность применения конечно-элементной модели для решения задач такого типа.

Таким образом, принимаем для окончательного расчета толщину слоя грунта 3 м.

Моделирование динамики температуры ПДГ в тоннеле. Геометрическая модель тоннеля и окружающего грунта представлена на рис. 2, б. В связи с высокой ресурсоемкостью машинного времени

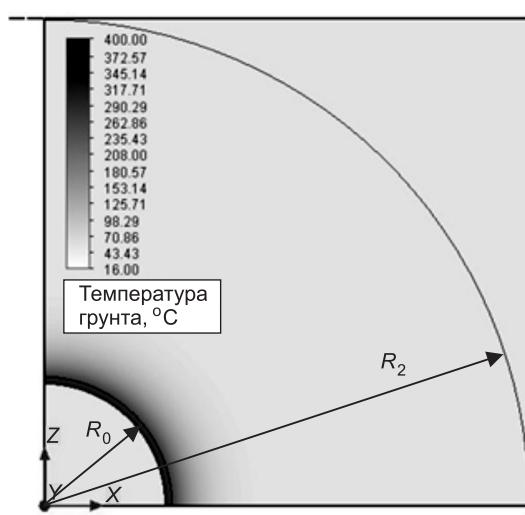


Рис. 6. Распределение температуры по толщине обделки и грунта вокруг тоннеля в момент времени 1200 с после начала пожара (модель № 2)

Таблица 2
Сравнение результатов расчетов моделей № 1, 2

Модель	Температура в грунте, °C					
	Расстояние от оси тоннеля, м					
	3	4	5	5,5	6	7
№ 1	140,7	26,4	16,4	16,06	16,007	16
№ 2	149,3	27,2	16,44	16,06	16,007	16
Невязка, °C	-8,6	-0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Невязка абсолютных температур, %	2,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0

длина тоннеля принята 100 м, расчет ведется для первых 300 с развития пожара.

Согласно краевым условиям, указанным в начале статьи, с левой стороны в тоннель заходит поток ПДГ с температурой, меняющейся по закону (1).

Результаты расчета сопряженной задачи теплообмена на конечно-элементной модели представлены на рис. 7 (сечение по продольной оси тоннеля, торец горящего вагона на левой границе расчетной области, движение ПДГ слева направо, длина участка 100 м) для моментов времени 60, 80 и 100 с от начала пожара.

Замерные точки (рис. 7) находятся на высоте 2 м от путевого основания тоннеля, т.е. это верх рабочей зоны для работы спасателей и эвакуации пассажиров и обслуживающего персонала.

Анализ результатов показывает, что остывание потока ПДГ за счет теплообмена по длине выработки незначительно и в основном температура потока определяется динамикой изменения температуры и скоростью

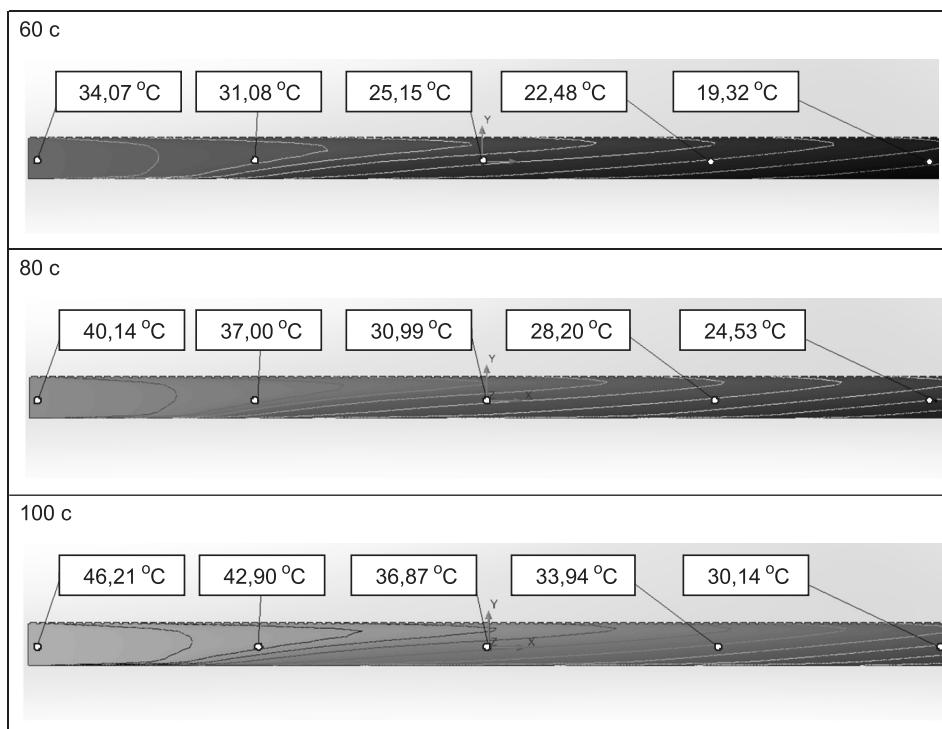


Рис. 7. Температурное поле потока ПДГ в тоннеле в моменты времени 60, 80 и 100 с от начала горения

движения потока ПДГ от очага горения. На основе оценки скорости распространения температуры по длине тоннеля s (м) для рассматриваемых условий (горизонтальный однопутный тоннель, скорость воздуха u (м/с), горит один крайний вагон, начальная температура воздуха в тоннеле 16 °C) в период максимального роста температур (0÷1200 с от начала пожара) выведена зависимость температуры ПДГ T (°C) в тоннеле от времени и расстояния от очага горения:

$$T(s, \tau) = \begin{cases} 16 & \text{при } s > u \cdot \tau, \\ 0,303 \cdot \left(\tau - \frac{s}{u} \right) + 16 & \text{при } s \leq u \cdot \tau. \end{cases} \quad (2)$$

Невязка результатов (табл. 3), рассчитанных по предложенной зависимости (2) и полученных при расчете объемной модели, объясняется неучетом остывания ПДГ вследствие теплообмена со стенками тоннеля.

Таблица 3
Невязка результатов расчета температур ПДГ по зависимости (2)
с результатами численного эксперимента

Расстояние от очага, м / время от начала пожара, с	Температура потока в тоннеле, °C, расчет по		Невязка, °C
	модели	зависимости (2)	
75 м / 80 с	28,2	30,1	1,9
75 м / 100 с	33,9	36,1	2,2
75 м / 300 с	91,1	96,7	5,6
100 м / 300 с	86,9	93,3	6,4

На рис. 7 видно, что уже в момент времени 80 с от начала пожара температура потока ПДГ в тоннеле вблизи торца горящего вагона превышает 40 °C. В дальнейшем скорость движения фронта критической температуры 40 °C для описанных условий приближенно равна скорости движения потока и составляет 2,23 м/с.

Для проведения инженерных расчетов выведена упрощенная зависимость (3) для определения времени τ (с) до достижения ПДГ температуры 40 °C на расстоянии s (м) от очага горения при скорости потока u (м/с):

$$\tau = 80 + \frac{s}{u}. \quad (3)$$

Выводы. 1. При горении крайнего вагона поезда в однопутном горизонтальном тоннеле метрополитена остывание пожарно-дымовых газов за счет теплообмена с обделкой и прилегающими грунтами при их движении по тоннелю от очага горения несущественно. Скорость изменения температуры пожарно-дымовых газов по длине тоннеля зависит от характера изменения температуры в очаге горения и скорости движения потока газов в тоннеле.

2. Выполнена упрощенная зависимость для оценочного расчета температуры потока ПДГ в тоннеле в зависимости от расстояния от очага горения и времени с начала возгорания вагона.

3. Движение фронта потока ПДГ с критической температурой 40 °C начинается от очага горения с 80-й секунды от момента возгорания. Скорость продвижения фронта газов с этой температурой соответствует скорости воздушного потока на аварийном участке тоннеля.

4. Использование полученных расчетных зависимостей позволяет организовать эффективное проведение аварийно-спасательных работ при горении поезда в тоннеле метрополитена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 32-105-2004. Метрополитены [Текст]. — М. : Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. — 337 с.
2. Красюк, А.М. Исследование режимов работы тоннельной вентиляции при возгорании поезда в тоннеле метрополитена [Текст] / А.М. Красюк, И.В. Лугин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2005. — № 4. — С. 84-93.
3. Устав профессиональной горноспасательной службы по организации и ведению горноспасательных работ на строительстве подземных сооружений [Текст] / Госстрой России, Управление горного надзора и военизированных горноспасательных частей. — М. : ГУП ЦПП, 2002. — 220 с.
4. Цодиков, В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов [Текст] / В.Я. Цодиков. — М. : Недра, 1975. — 237 с.

*АДЕЕВ Андрей Александрович; E-mail: sibwgsch@uvgsch.54nsu.ru
Федеральное государственное казенное учреждение «Управление военизированных горноспасательных частей в строительстве», г. Новосибирск
ЛУГИН Иван Владимирович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ivlugin@misd.nsc.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 11.09.12

Adeev Andrey Alexandrovich; E-mail: sibwgsch@uvgsch.54nsu.ru, Federal state government establishment «Department militarised mine-rescue parts in building», Novosibirsk, Russia

Lugin Ivan Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ivlugin@misd.nsc.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

DYNAMICS OF TEMPERATURE OF FIRE-SMOKE GASES IN THE UNDERGROUND TUNNEL AT TRAIN BURNING

In article dynamics of temperature of fire-smoke gases in an underground tunnel is considered at their movement from a burning train standing in a tunnel.

Key words: underground, fire, temperature, tunnel.

REFERENCES

1. SP 32-105-2004. Undergrounds [Text]. — М. : Gosstroy of Russia, FGUP CPP, 2004. — 337 p.
2. Krasjuk, A.M. Research of operating modes of tunnel ventilation at train ignition in an underground tunnel [Text] / A.M. Krasjuk, I.V. Lugin // Physicotechnical problems of working out of minerals. — 2005. — N 4. — P. 84-93.
3. Charter of professional mine-rescue service on the organisation and conducting mine-rescue works on building underground constructions [Text] / Gosstroy of Russia, Department of mountain supervision and the militarised mine-rescue parts. — M. : GUP CPP, 2002. — 220 p.
4. Tsodikov, V.Ya. Ventilation and a heat supply of undergrounds [Text] / V.Ya. Tsodikov. — M. : Nedra, 1975. — 237 p.

УДК 697.34:697.4

М.С. КОНОНОВА

О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Приводятся результаты вычисления капитальных расходов и эксплуатационных затрат при строительстве тепловых сетей из стальных труб в монолитной пенополиуретановой изоляции для различных значений расчетных температур подающего теплоносителя. Установлено, что увеличение расчетной температуры теплоносителя целесообразно по большинству технико-экономических параметров.

Ключевые слова: расчетная температура теплоносителя, тепловые сети, эксплуатационные расходы при транспортировке теплоносителя.

Тепловые сети являются одним из основных элементов систем централизованного теплоснабжения. При этом расчетная температура теплоносителя во многом определяет технико-экономические показатели тепловых сетей (такие, как диаметр трубы, расход теплоносителя, затраты электроэнергии на перекачку воды, тепловые потери и т.д. [1]).

В технической литературе [2] решение задачи нахождения оптимальной температуры воды в тепловой сети предлагается осуществлять на основе сравнения вариантов. При этом считается, что повышение температуры в подающем трубопроводе до технически допустимого предела всегда выгодно. Этот предел определяется прочностью конструктивных элементов, так как для поддержания высокой температуры воды требуется высокое давление. Повышение температуры приводит также к увеличению потерь теплоты при ее транспортировке, но при этом уменьшается требуемый диаметр труб. Эта неоднозначность влияния температуры и требует применения вариантов сравнения.

В последнее время появились новые технологии строительства теплопроводов, например, бесканальная прокладка из стальных труб в монолитной пенополиуретановой (ППУ) изоляции [3]. Эта конструкция зарекомендовала себя хорошо, но еще недостаточно изучена с позиций нахождения оптимальной температуры теплоносителя.

В связи с этим для выявления взаимосвязи температуры теплоносителя и технико-экономических параметров тепловой сети, прокладываемой вышеописанным способом, была проведена расчетно-аналитическая работа, состоящая из следующих этапов.

1. Формирование исходных вариантов исследуемых тепловых сетей. Варьируемые параметры: тепловая мощность присоединенных потребителей, протяженность и конфигурация тепловых сетей.

2. Гидравлический расчет исследуемых вариантов тепловых сетей (для определения диаметров труб и потерь давления), расчет затрат на строительство тепловых сетей.

3. Расчет тепловых потерь при транспортировке теплоносителя, оценка их относительной величины по сравнению с общей тепловой мощностью системы теплоснабжения.

4. Расчет затрат электроэнергии на перекачку теплоносителя в рассматриваемых вариантах с учетом давлений, обеспечивающих невескание теплоносителя (на основе пьезометрических графиков), и определение стоимости соответствующего насосного оборудования.

5. Расчет количества требуемого обслуживающего персонала.

6. Сравнение рассматриваемых вариантов с учетом капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Следует отметить, что исходные данные для расчетов принимались для климатологических и экономических условий Воронежской области.

На этапе формирования исходных вариантов приняты потребители со средней тепловой мощностью 50, 200 и 1000 кВт. В среднем мощность 50 кВт соответствует одноэтажной частной застройке, 200 кВт — пятиэтажным зданиям, 1000 кВт — девятиэтажным. Далее на основе существующих планов жилой застройки были сформированы схемы тепловых сетей с одинаковым количеством потребителей, равным 21.

Для каждой из сформированных схем приняты следующие расчетные значения температуры подающего теплоносителя: $T_{\text{п}} = 90, 110, 130, 150^{\circ}\text{C}$. Температура обратного теплоносителя во всех вариантах равна 70°C . Таким образом для дальнейших исследований было сформировано 12 вариантов расчетных схем тепловых сетей.

На втором этапе определялись расходы теплоносителя, проводился гидравлический расчет, подбирались диаметры труб. На основе разработанных монтажных схем составлялись спецификации, подсчитывалась стоимость тепловых сетей с учетом строительных работ (по расценкам, действительным на май 2012 г.). Результаты этих расчетов приведены на рис. 1. Из приведенного графика видно, что стоимость трубопроводов тепловой сети снижается с увеличением расчетной температуры теплоносителя. Установлено, что снижение стоимости для потребителей с

небольшой тепловой мощностью (около 50 кВт) составляет 0,8 % на каждый градус повышения температуры воды, а для потребителей с большой тепловой мощностью (около 1000 кВт) соответственно 5 % на каждый градус.

Третий этап был посвящен расчету тепловых потерь. Сначала были посчитаны удельные тепловые потери q , Вт / м, для труб разного диаметра по методике, приведенной в [4]. На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие результаты этих расчетов. Можно отметить, что увеличение удельных теплопотерь с возрастанием температуры незначительно, что объясняется высокими теплоизолирующими свойствами пенополиуретана.

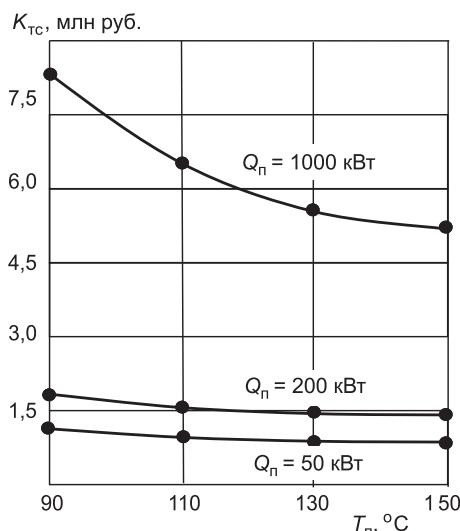


Рис. 1. Зависимость стоимости трубопроводов тепловой сети от температуры теплоносителя при различной тепловой мощности потребителей Q_n .

После подсчета суммарных потерь теплоты трубопроводами для всех рассматриваемых вариантов $\Sigma Q_{\text{пп}}$, кВт, были получены графические зависимости (рис. 3), из которых видно, что потери теплоты для системы теплоснабжения с увеличением температуры теплоносителя уменьшаются. Это кажущееся на первый взгляд противоречие объясняется тем, что с увеличением температуры теплоносителя диаметры труб уменьшаются, что приводит к уменьшению потерь теплоты при транспортировке.

Было проанализировано также, какую долю от общей мощности системы теплоснабжения составляют потери теплоты. Из графика (рис. 4) видно, что при мощности потребителей 50 кВт потери составляют около 11 %, при мощности 200 кВт примерно 3,5 %, при мощности 1000 кВт потери всего 1,5 %. То есть чем крупней потребители теплоты и чем больше их количество, тем меньше относительные тепловые потери.

Значительной статьей эксплуатационных расходов в водяных тепловых сетях являются затраты на перекачку теплоносителя, которые рассчитывались на четвертом этапе. Основную часть этих расходов составляет электроэнергия, расходуемая на привод сетевых насосов Θ_h , кВт · ч / год:

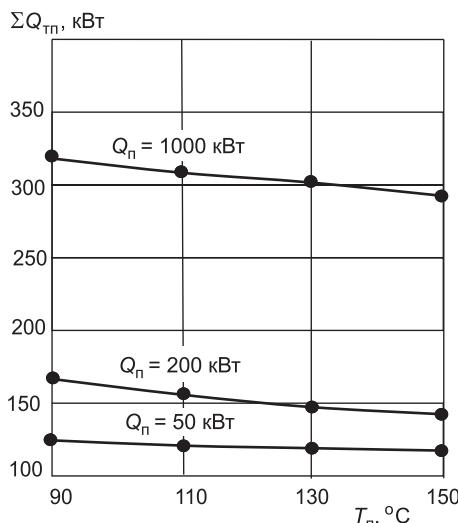


Рис. 3. Зависимость потерь теплоты для тепловых сетей при различной тепловой мощности потребителей $Q_{\text{пп}}$

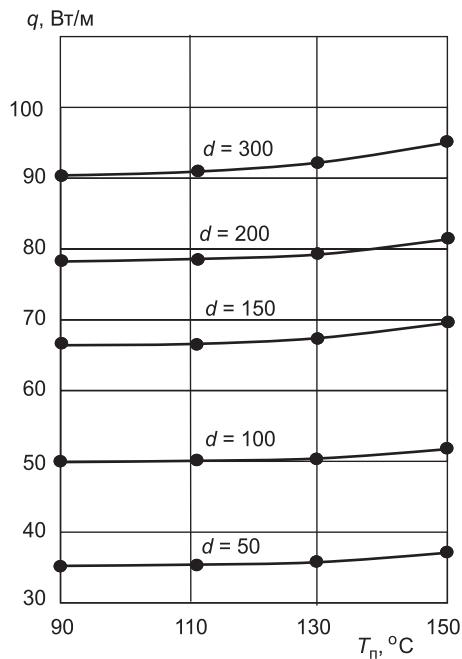


Рис. 2. Удельные потери теплоты трубопроводами тепловой сети при различной температуре теплоносителя (d — диаметр трубы, мм)

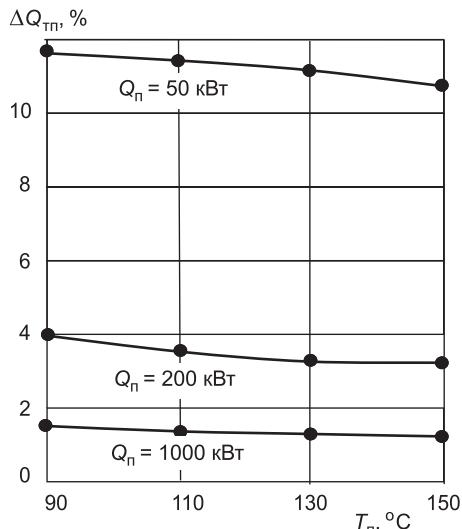


Рис. 4. Относительные потери теплоты теплопроводами с различной температурой теплоносителя при различной тепловой мощности потребителей $Q_{\text{пп}}$

$$\mathcal{E}_h = \frac{G\Delta p}{\rho\eta_h} \cdot 10^{-3} \cdot Z_h \cdot 24, \quad (1)$$

где G — расход воды, кг / с (зависит от расчетной температуры теплоносителя);

Δp — перепад давлений, создаваемый насосом, Па (определяется по данным гидравлического расчета);

ρ — плотность воды, кг / м³;

η_h — КПД насосной установки (для средних условий η_h составляет от 0,6 до 0,7);

Z_h — продолжительность работы насосов за год, сут.

Результаты расчетов по формуле (1) для сравниваемых вариантов представлены в графическом виде на рис. 5. Расход электроэнергии на циркуляцию теплоносителя в тепловой сети при повышении температуры теплоносителя снижается, так как уменьшается расход воды. Однако повышение температуры требует создания более высокого давления (для исключения возможности закипания теплоносителя), что приводит к уве-

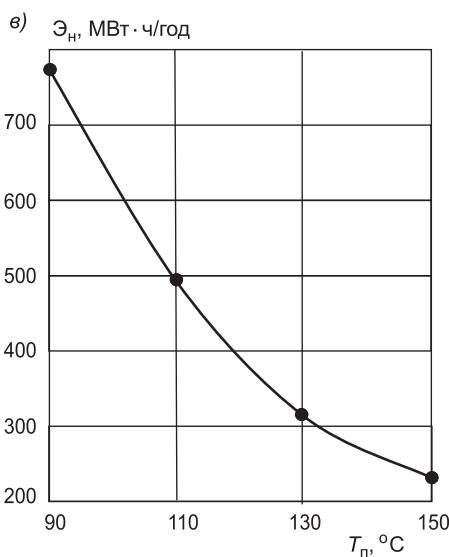
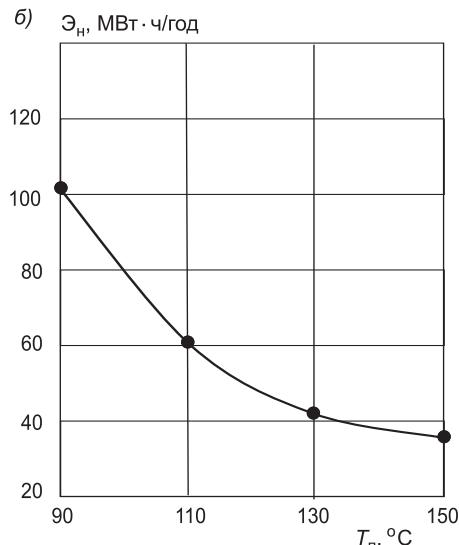
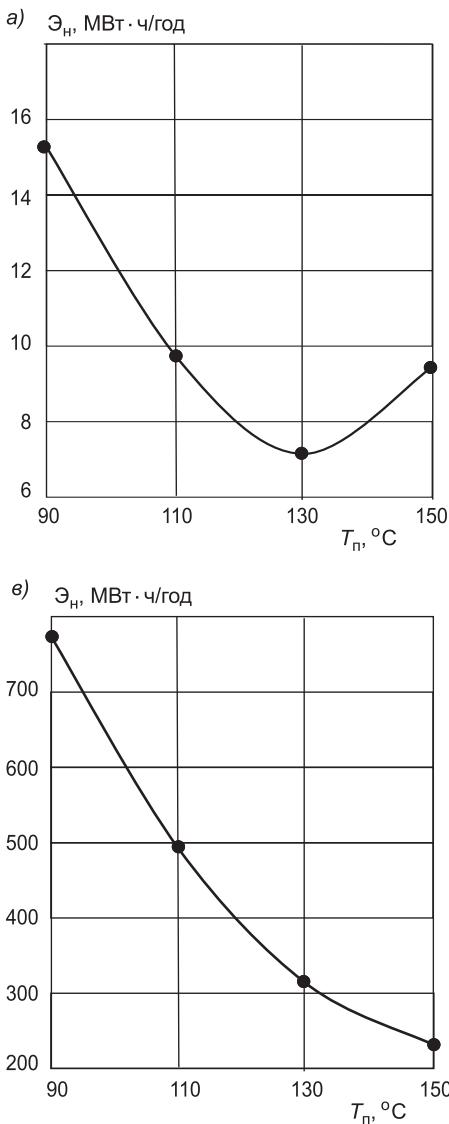


Рис. 5. Годовой расход электроэнергии на перекачку теплоносителя для потребителей с тепловой мощностью 50 кВт (а); 200 кВт (б); 1000 кВт (в)

личению расхода электроэнергии на транспортировку теплоносителя. Наиболее заметно противоположное влияние температуры теплоносителя на расход потребляемой насосами электроэнергии у тепловых сетей с небольшими потребителями (рис. 5, а). Для зданий в пять этажей и более (с тепловой мощностью 200 и 1000 кВт) влияние увеличения давления менее заметно, так как для них и при небольшой температуре приходится поддерживать достаточно высокое давление, чтобы обеспечить заполнение системы. Таким образом, вывод об оптимальной температуре теплоносителя с точки зрения затрат на работу насосов можно сделать только на основе вариантового сравнения.

На следующем этапе было рассчитано количество требуемого обслуживающего персонала, которое определяется в зависимости от приведенной площади продольного сечения¹ S , м²:

$$S = \sum l_i \cdot d_i, \quad (2)$$

где l_i — длина i -го участка сети, м;

d_i — соответствующий диаметр трубопровода на i -м участке, м.

Результаты определения численности обслуживающего персонала приведены в табл. 1, из которой видно, что для определенной схемы тепловой сети это значение не зависит от расчетной температуры теплоносителя, т.е. изменение диаметра труб при одинаковых длинах участков не приводит к изменению затрат на эксплуатационное обслуживание.

Таблица 1
Численность рабочих для обслуживания тепловых сетей

Наименование параметра	Значения параметра при различной расчетной температуре теплоносителя T_n											
	для потребителей с тепловой мощностью 50 кВт				для потребителей с тепловой мощностью 200 кВт				для потребителей с тепловой мощностью 1000 кВт			
	90°	110°	130°	150°	90°	110°	130°	150°	90°	110°	130°	150°
Приведенная площадь продольного сечения, тыс. м ²	0,184	0,162	0,149	0,135	0,337	0,260	0,227	0,212	0,825	0,688	0,607	0,550
Численность рабочих	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3

На заключительном этапе для сравнения рассматриваемых вариантов был использован критерий чистого дисконтируированного дохода (ЧДД). При этом один из вариантов принимаем за базовый (с расчетной температурой теплоносителя 90 °С) и считаем ЧДД для остальных вариантов по сравнению с ним по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T (S_{баз} - S_i) \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - (K_i - K_{баз}), \quad (3)$$

где t — шаг расчета, равный одному году;

S_i , $S_{баз}$ — соответственно эксплуатационные расходы для рассматриваемого (i -го) варианта и для базового, руб./год;

K_i , $K_{баз}$ — капитальные затраты соответственно для рассматриваемого и для базового варианта, руб.;

¹ Нормативы численности промышленно-производственного персонала тепловых сетей / ОАО РАО «ЦОТЭнерго». 2004. 17 с.

E — норма дисконта (принимается равной средней норме дохода на капитал в государственных банках), в расчетах принято $E = 0,12$;
 T — расчетный период, равный 5 годам.

Результаты расчетов по формуле (3) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения чистого дисконтированного дохода для вариантов тепловых сетей по сравнению с базовым (с температурой теплоносителя $T_n = 90^{\circ}\text{C}$)

Расчетная температура теплоносителя	Значение ЧДД, руб., при средней тепловой нагрузке потребителя		
	50 кВт	200 кВт	1000 кВт
110 °C	361535	1270814	4535565
130 °C	514624	1699284	8510885
150 °C	714090	1903617	10092908

Проведенные расчеты подтвердили целесообразность увеличения расчетной температуры теплоносителя при проектировании тепловых сетей из стальных труб в монолитной пенополиуретановой изоляции практически по всем статьям капитальных и эксплуатационных расходов, включая потери теплоты через изоляцию трубопроводов. Небольшую коррекцию может внести величина затрат на работу сетевых насосов в связи с поддержанием более высокого давления при повышенных температурах. Таким образом, полученные результаты имеют практическое значение и могут быть использованы при выборе расчетной температуры теплоносителя, при этом сокращается количество параметров, участвующих при сравнении вариантов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кононова, М.С. Определение оптимальных параметров транспортировки теплоносителя в тепловых сетях [Текст] / М.С. Кононова // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 11–12. — С. 56–61.
2. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст] / Е.Я. Соколов. — М. : Изд-во МЭИ, 2001. — 472 с.
3. ГОСТ 30732–2006. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой [Текст]. — М. : Изд-во стандартов, 2008. — 44 с.
4. СП 41-103–2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов [Текст] / Госстрой РФ. — М. : Госстрой РФ, 2000. — 95 с.

*КОНОНОВА Марина Сергеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kniga16@mail.ru
 Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 26.09.12

Kononova Marina Sergeevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: kniga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

ABOUT TEMPERATURE EFFECT OF THE HEAT TRANSFER MEDIUM ON TECHNOLOGICAL INDEXES OF DESIGNED THERMAL WEBS

The computed results of government capital expenditures and working costs are given at building thermal webs from steel tubes in monolithic polyurethane isolation for different values of design temperatures of the giving heat transfer medium. Is established, that the

magnification of a design temperature of the heat transfer medium is expedient on the majority of technological parameters.

Key words: design temperature of the heat transfer medium, thermal webs, operating cost at transporting the heat transfer medium.

REFERENCES

1. Kononova, M.S. Determination of Optimal Heat Carrier Transportation Parameters in Heat Networks [Text] / M.S. Kononova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 11–12. — P. 56–61.
 2. Sokolov, E.Ya. Central heating and thermal webs [Text] / E.Ya. Sokolov. — M. : Publishing house MAI, 2001. — 472 p.
 3. State Standard 30732–2006. Steel pipes and shaped products with foamed polyurethane thermal insulation in protective sheath. Specifications [Text]. — M. : Standards Publishing House, 2008. — 44 p.
 4. SP 41-103-2000. Designing of Thermal Insulation of Equipment and Pipe Lines [Text]. — M. : State committee of Russian Federation on Building and Habitation municipal complex, 2000. — 95 p.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 625.08.004.67

Ю.А. ВЕРИГИН, Ж.О. КУЛЬСЕИТОВ, А.М. ЖАНДАРБЕКОВА

К РЕШЕНИЮ ВОПРОСА СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМОВ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ ПОГРУЗЧИКОВ МОДЕЛЕЙ L-34В И 534С

Работа посвящена решению задач сокращения объемов текущего ремонта дорожно-строительных машин, снижения суммарных удельных затрат на приобретение машин и на поддержание их надежности в эксплуатации. Изложены результаты апробации метода повышения надежности агрегата дорожно-строительных машин на примере коробки передач гидромеханической трансмиссии одноковшовых фронтальных погрузчиков моделей L-34В и 534С.

Ключевые слова: объемы текущего ремонта, повышение надежности, агрегат, дорожно-строительные машины.

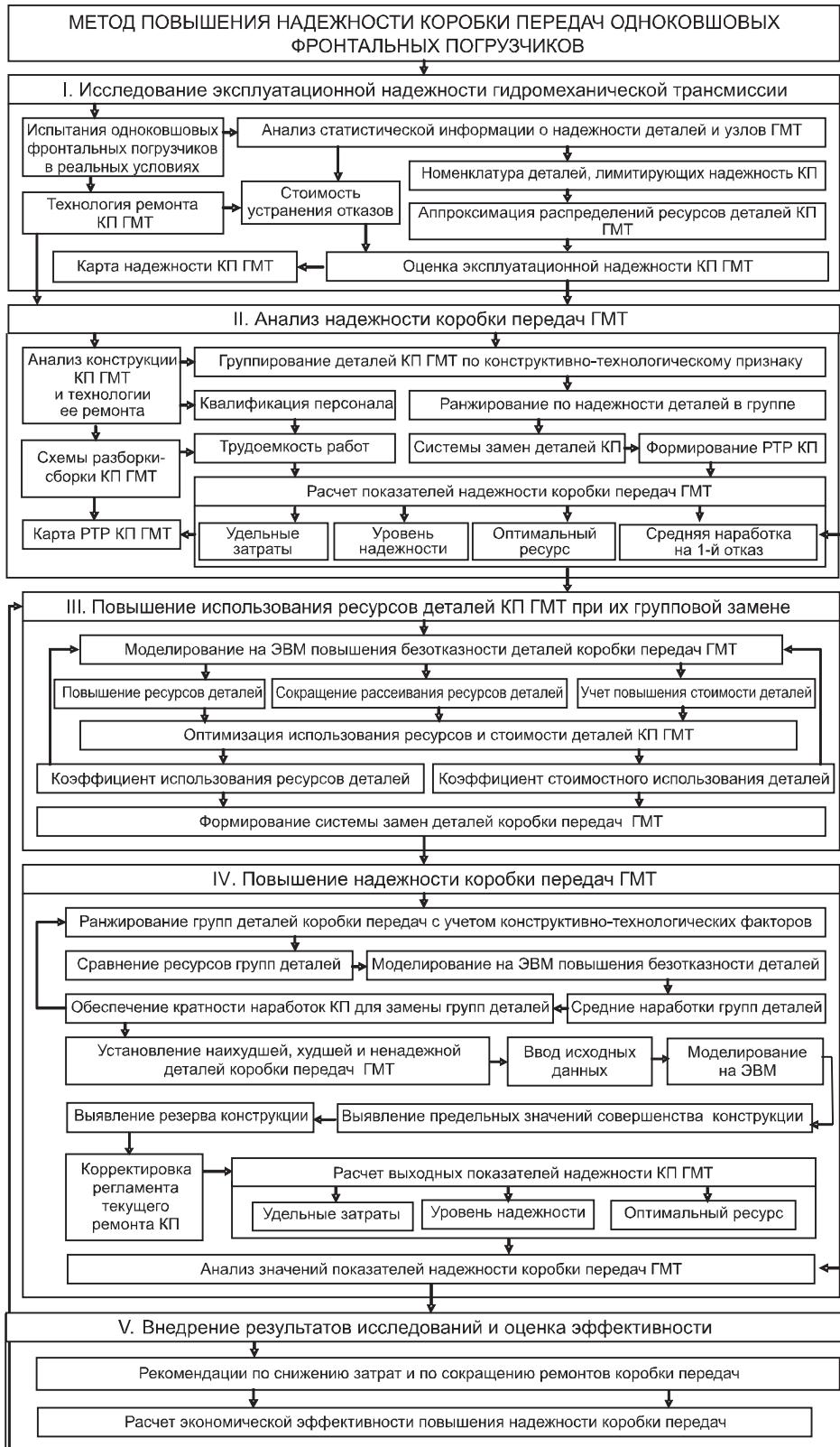
В современных условиях мировой рынок выдвигает все более жесткие требования к машиностроительной продукции. Это обусловлено необходимостью повышения эксплуатационных свойств машин, качества выполнения работ, экономической эффективности строительного производства, а также повышением требований потребителя и ростом конкуренции на мировом рынке. При этом повышение надежности дорожно-строительных машин (ДСМ) как наиболее значимого показателя качества приобретает особое значение, так как по мере развития и усложнения их конструкции происходит удорожание машин.

Все это показывает актуальность исследований и разработок, направленных на повышение надежности и оптимизацию объемов текущего ремонта агрегатов ДСМ, обеспечивающих сокращение простоев машин в эксплуатации, что особенно важно в условиях рыночной экономики.

Оптимизация объемов текущего ремонта ДСМ связана, прежде всего, со снижением суммарных удельных затрат на приобретение машин и на поддержание их работоспособности в эксплуатации. Это достижимо при использовании системы групповых замен деталей и узлов, лимитирующих его надежность.

Учитывая агрегатно-узловой метод ремонта, следует стремиться, чтобы каждую из частей машин можно было бы восстанавливать независимо от других.

Реализация такого подхода требует разработки методов повышения надежности, прежде всего, агрегатов и узлов, лимитирующих надежность ДСМ. В ходе данного исследования, используя результаты теории надежности и компьютерного моделирования, разработан метод повышения надежности агрегата ДСМ применительно к коробке передач гидромеханической трансмиссии (ГМТ) фронтальных погрузчиков L34В, 534С. Это связано с обеспечением и поддержанием работоспособности ГМТ, в котором наименее надежным агрегатом является коробка передач (КП) модели SB 165-2 [1, 2]. Последовательность разработки и этапы апробации предлагаемого метода представлены на рис. 1.



Rис. 1. Последовательность разработки и этапы апробации метода повышения надежности коробки передач ГМТ

Критерием, определяющим оптимальные значения показателей надежности коробки передач ГМТ одноковшовых фронтальных погрузчиков, принят технико-экономический критерий. При этом учитываются конструктивно-технологические факторы исследуемого агрегата. Для оптимизации работ текущего ремонта коробки передач ГМТ и сокращения затрат на поддержание их надежности потребовалось определить рациональные системы замен конструктивных элементов, лимитирующих надежность агрегата, и разработать карты разновидностей их текущего ремонта. При таком подходе удается научно обосновать рекомендации для конструкторов и технологов по увеличению долговечности недостаточно надежных деталей машин.

В результате апробации предложенного метода подтверждено преимущество оптимизации комплекса работ текущего ремонта агрегата. Апробация проведена на примере широко применяемой на практике Восточно-Казахстанской области ДСМ — одноковшовых фронтальных погрузчиков. Выявление оптимальных схем замен и формирование разновидностей текущего ремонта агрегата предложено производить с учетом не только конструктивно-технологического фактора, но и показателей надежности его часто отказывающих деталей.

В ходе исследования для повышения надежности рассматриваемого агрегата предложено сократить число текущих ремонтов путем выдачи рекомендаций по повышению безотказности наименее надежной, ненадежной и недостаточно надежной групп деталей совместных замен (см. таблицу). Рекомендации даны на основе моделирования на ЭВМ повышения уровня надежности ненадежных деталей. Детали и узлы, лимитирующие надежность коробки передач модели SB 165-2, условно можно отнести к трем конструктивно-технологическим зонам по уровню их разборки.

В результате углубленного анализа показателей надежности рассматриваемых групп деталей установлено, что наименее надежна группа деталей № 3, так как она характеризуется наименьшим значением среднего ресурса (см. таблицу). Кроме того, две группы деталей КП (№ 1 и 5) также имеют сравнительно низкие значения ресурсов и отнесены к ненадежной и недостаточно надежной в конструкции КП модели SB 165-2 по сравнению с остальными.

Для сокращения числа ремонтов коробки передач модели SB 165-2 гидромеханической трансмиссии одноковшовых фронтальных погрузчиков L-34В, 534С с целью снижения соответствующих затрат необходимо обеспечить равную (кратную) долговечность деталей, входящих в общую

Стоймостные и ресурсные данные групп деталей, лимитирующих надежность КП модели SB 165-2

№ и наименование узлов коробки передач по каталогу	№ групп деталей	Стоимость, тенге	Первая замена / вторая замена			Закон распределения
			средняя наработка до отказа, мото-ч	среднеквадратическое отклонение, мото-ч	коэффициент вариации	
07-11, 07-12 (вал заднего хода и вал медленной скорости)	1	23689	3,08/2,70	0,89/0,76	0,28/0,28	Нормальный
	2	63025	9,90/9,10	4,60/4,80	0,46/0,52	Вейбулла
07-13 (вал быстрой скорости)	3	28373	2,67/2,25	0,75/0,65	0,28/0,28	Нормальный
	4	65528	9,90/6,80	3,90/3,40	0,39/0,50	Вейбулла
07-14 (выходной вал)	5	34778	3,0/2,60	0,86/0,66	0,28/0,25	Нормальный
	6	12317	10,5/6,80	2,93/1,76	0,27/0,25	Нормальный

конструктивно-технологическую группу. При этом использование разработанных в ходе исследования рекомендаций по повышению надежности деталей КП позволяет оценить границы повышения показателей долговечности деталей, лимитирующих ее надежность, при существенном повышении уровня надежности коробки передач модели SB 165-2 в целом и снижении затрат на поддержание ее работоспособности в эксплуатации.

С целью оптимизации объемов текущего ремонта одноковшовых фронтальных погрузчиков L-34В, 534С было произведено моделирование на ЭВМ повышения ресурсных и стоимостных показателей наиболее часто отказывающих групп деталей КП модели SB 165-2 [3]. Для повышения надежности агрегата машин предложено сократить число текущих ремонтов путем повышения безотказности наименее надежной, ненадежной и недостаточно надежной групп деталей совместных замен.

Моделирование на ЭВМ показателей надежности затрат наименее надежной группы деталей КП (группа деталей № 3) на поддержание эксплуатационной надежности произведено с учетом характера изменения отказов, т.е. на основе ведущей функции потока отказов. Кроме того, учтены и показатели надежности КП модели SB 165-2 в целом.

В результате моделирования на ЭВМ установлена зависимость величины минимальных суммарных удельных затрат $C_{уд\min}$ от долговечности наименее надежной группы деталей КП (рис. 2). Определены оптимальные значения ресурсных показателей деталей в составе каждой из локальных групп для сокращения потерь от неполного использования их ресурсов и стоимости [3].

Анализ динамики $C_{уд\min}$ от повышения ресурса деталей в ρ раз позволяет выделить три характерные зоны изменения показателя. Первая зона — эффективная (в интервале значений ρ до 2,5), где наблюдается наибольшее снижение $C_{уд\min}$ в случае повышения ресурса наименее надежной группы деталей КП. Вторая зона — недостаточно эффективная (в интервале значений ρ от 2,5 до 4,75), когда снижение $C_{уд\min}$ замедляется вплоть до момента достижения показателем наименьшего значения. Граница между первой и второй зонами определена по величине α от наибольшего изменения показателя надежности (значение α в пределах

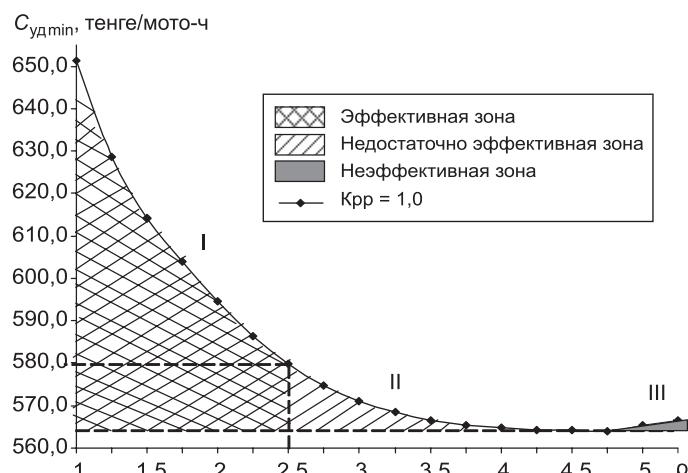


Рис. 2. Динамика минимальных суммарных удельных затрат в зависимости от изменения ресурса наименее надежной группы деталей КП модели SB 165-2

80 % используется в теории надежности для установления приемлемых значений показателей). Третья зона — неэффективная (в интервале значений ρ от 4,75 и более), где начинается рост $C_{уд\ min}$.

С позиции практической значимости наличие первой и второй зон при моделировании свидетельствует о необходимости модернизации существующей конструкции КП путем моделирования на ЭВМ имитации повышения долговечности групп деталей совместных замен, лимитирующих его надежность. Кроме того, в случае модернизации (улучшения конструкции) рассматриваемого узла путем повышения долговечности наименее надежной группы деталей именно во второй зоне должно быть расположено приемлемое (с точки зрения экономической оправданности проведения мероприятия) значение затрат, до которого необходимо понизить $C_{уд\ min}$. В противном случае при чрезмерно большом увеличении долговечности рассматриваемой группы деталей КП значениям $C_{уд\ min}$ будут расположены в третьей зоне. В момент достижения наименьшего значения $C_{уд\ min}$ необходимо остановить процесс моделирования на ЭВМ, так как дальнейшая имитация повышения долговечности наименее надежной группы деталей КП приведет к потере уже достигнутого положительного эффекта.

В ходе дальнейших исследований особое внимание было уделено установлению влияния стоимостного коэффициента, коэффициента увеличения ресурса и сокращения относительного рассеивания ресурса наихудшей группы деталей на уровень надежности n коробки передач в целом.

При анализе характера изменения n от улучшения показателей долговечности наименее надежной группы деталей КП в ρ раз удалось выделить три зоны (рис. 3).

Первая зона — эффективная (в интервале значений ρ до 2,12), где наблюдается наибольшее повышение уровня надежности n в результате роста ресурса наименее надежной группы деталей КП. Вторая зона — недостаточно эффективная (в интервале значений ρ от 2,12 до 2,75), когда темп повышения n замедляется вплоть до момента достижения показате-

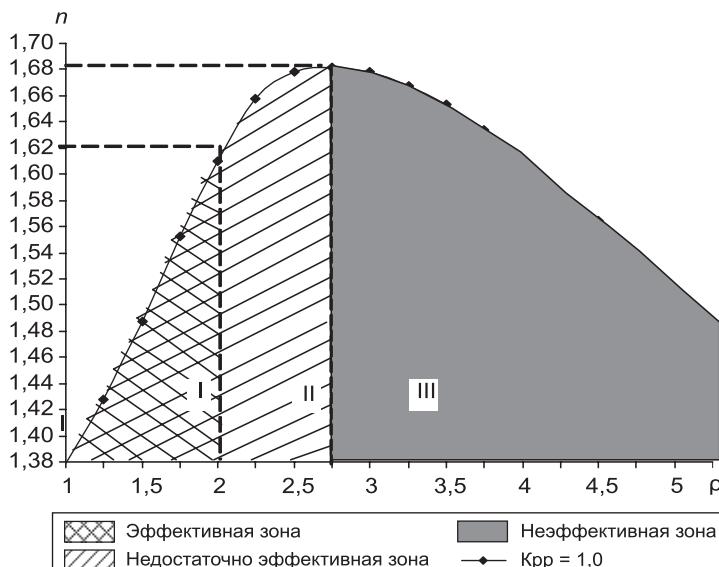


Рис. 3. Характеристика этапов изменения уровня надежности в зависимости от изменения ресурса наименее надежной группы деталей КП

лем наибольшего значения, несмотря на вложения средств. Третья зона — неэффективная (в интервале значений ρ от 2,75 и выше), где начинается снижение n после достижения своего наибольшего значения. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает неэффективность дальнейшего совершенствования наихудшей группы деталей КП модели SB 165-2 при $\rho > 2,75$. Несоблюдение данного условия может привести к снижению уровня надежности рассматриваемого агрегата.

В результате моделирования на ЭВМ уровня надежности наименее надежной группы деталей КП SB 165-2 определен предел ее совершенствования. Аналогичные результаты по расчету минимальных суммарных удельных затрат, уровня надежности КП модели SB 165-2 были получены и по остальным рассматриваемым группам деталей (ненадежной и недостаточно надежной групп деталей КП) [4].

Результаты данного исследования позволили определить границы оптимального повышения показателей надежности часто отказывающих групп деталей коробки передач модели КП SB 165-2. В частности, для наименее надежных групп деталей КП модели SB 165-2 долговечность может быть повышена в пределах 2,0–2,5.

В заключение следует отметить, что на основе полученных результатов разработаны рекомендации по повышению надежности коробки передач модели SB 165-2. Разработанные рекомендации по повышению надежности коробки передач модели SB 165-2 фронтальных погрузчиков L-34В и 534С на основе оптимизации объемов текущего ремонта применимы и к другим агрегатам ДСМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульсейтов, Ж.О. О повышении надежности коробки передач гидромеханической трансмиссии одноковшовых фронтальных погрузчиков [Текст] / Ж.О. Кульсейтов, А.М. Жандарбекова // Междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование конструкций и системы эксплуатации транспортной техники». — Т. I. — Алматы, 2010. — С. 236–239.
2. Кульсейтов, Ж.О. Вопросы повышения надежности коробки передач гидромеханической трансмиссии одноковшовых фронтальных погрузчиков [Текст] / Ж.О. Кульсейтов, А.М. Жандарбекова // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. — Усть-Каменогорск. — 2011. — № 3. — С. 46–49.
3. Жандарбекова, А.М. Практика эксплуатации одноковшовых фронтальных погрузчиков в Восточно-Казахстанской области [Текст] / А.М. Жандарбекова // Междунар. науч.-практ. конф., посвященная 200-й годовщине победы России в отечественной войне 1812 г. «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» г. Пермь, 26–28 апреля 2012 г. — Т. 1. — С. 164–167.
4. Кульсейтов, Ж.О. Влияние повышения качества изготовления деталей и узлов на выходные показатели надежности агрегата дорожно-строительных машин [Текст] / Ж.О. Кульсейтов, А.М. Жандарбекова // Валихановские чтения 16 : Сб. Междунар. науч.-практ. конф. — Кокшетау, 2012. — Т. 8. — С. 76–79.

ВЕРИГИН Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул*

КУЛЬСЕЙТОВ Женис Оразханович, д-р техн. наук, проф.

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

ЖАНДАРБЕКОВА Асель Мергазиновна, канд. техн. наук

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Verigin Yuri Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, Altai State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Kulseitov Zhenis Orazhanovich, doctor of technical sciences, professor, East Kazakhstan State Technical University in honour of D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Zhandarbekova Asel Mergazinovna, candidate of technical sciences, East Kazakhstan State Technical University in honour of D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

THE QUESTION OF REDUCING THE ROUTINE MAINTENANCE SIZE OF ROAD-BUILDING MACHINERY

The paper explores the task of reducing the routine maintenance size of road-building machinery, reducing the total cost per unit for purchasing machinery and maintaining their field reliability. It presents the results of approbation of method of safety increasing of road-building machinery's aggregate on the example of gearbox hydromechanical transmissions of L-34B and 534C front-end shovel loaders.

Key words: routine maintenance size, safety increasing, aggregate, road-building machinery.

REFERENCES

1. Kulseitov, Zh.O. About safety increasing of front-end shovel loaders' hydromechanical transmissions gearbox [Text] / Zh.O. Kulseitov, A.M. Zhandarbekova // International science and technology conference «Improving the constructions and exploitation of transportation equipment». — Vol. I. — Almaty, 2010. — P. 236–239.
2. Kulseitov, Zh.O. Questions of safety increasing of front-end shovel loaders' hydromechanical transmissions gearbox [Text] / Zh.O. Kulseitov, A.M. Zhandarbekova // The messenger of East Kazakhstan State Technical University in honour of D. Serikbayev. — Ust-Kamenogorsk. — 2011. — N 3. — P. 46–49.
3. Z h a n d a r b e k o v a , A . M . The practice of front-end shovel loaders' exploitation in East Kazakhstan region [Text] / A.M. Zhandarbekova // International scientific and practical conference dedicated to 200th anniversary of Russia's victory in the Patriotic War in 1812 «Modernization and scientific research in transport complex» Perm city, 26-28th of April 2012. — Vol. 1. — P. 164–167.
4. Kulseitov, Zh.O. The influence of improving the quality of production of details and assemblies on output indicators of aggregate reliability of road-building machinery [Text] / Zh.O. Kulseitov, A.M. Zhandarbekova // Valikhanov declaration 16 : International scientific and practical conference. — Kokshetau, 2012. — Vol. 8. — P. 76–79.

УДК 621.542.001

А.В. ГРУЗИН, А.В. КУЛИКОВ,
Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА
ДРОССЕЛЬНО-БЕЗЗОЛОТНИКОВОГО
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО УДАРНОГО МЕХАНИЗМА
И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ**

Приведено физико-математическое описание пневмоударного механизма дроссельно-беззолотникового типа.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, камера рабочего хода, камера холостого хода, предкамера сетевого давления, ступенчатый ударник, стержень, хвостовик инструмента.

Введение. Ранее созданные конструкции пневматических ударных механизмов со ступенчатым ударником имели коаксиальную кинематическую связь с внутренней поверхностью направляющей втулки, что требовало при изготовлении соблюдения соответствующих допусков и посадок. Данная работа является логическим продолжением направления по совершенствованию конструкции пневмоударных механизмов с комбинированным воздухораспределением.

Принципиальная схема пневматического молота. С целью обеспечения плавной подачи воздуха через распределительную камеру в кольцевую камеру предлагается применение дроссельного канала, позволяющего снизить шумовые и вибрационные характеристики пневматического ударного механизма.

Краткое описание устройства и рабочего процесса пневматического ударного механизма [1] (рис. 1).

После включения пускового устройства (на чертеже не показано и может быть любым известным) воздух из сети поступает по каналу 10 в стакане 11 в камеру 3 сетевого воздуха. Далее через каналы 12 в кольцевом фланце 13 воздух поступает в распределительную камеру 14. Из распределительной камеры 14 по продольному каналу-пазу 15 и отверстию 16 втулки 17 в штоковой части 18 ступенчатого ударника 19 воздух поступает по сквозному отверстию 20 ступенчатого ударника и его радиальным каналам 8 в камеру 5 холостого хода. Одновременно по кольцевому зазору 21 и дроссельному перепускному винтовому каналу-пазу 22 воздух из кольцевой распределительной камеры 14 поступает в кольцевую камеру 4 рабочего хода, соединенную с атмосферой через выпускной канал 9. Винтовой канал-паз 22 может быть выполнен в сечении квадратным, прямоугольным, треугольным, трапецидальным, овальным. В начале движения ступенчатого ударника 19 продолжается наполнение воздухом камеры 5 холостого хода, обеспечивая расчетную величину импульса холостого хода. Под действием импульса давления со стороны камеры 5 холостого хода ступенчатый ударник 19 продолжает движение в сторону распределительной камеры 14, совершая холостой ход. При последую-

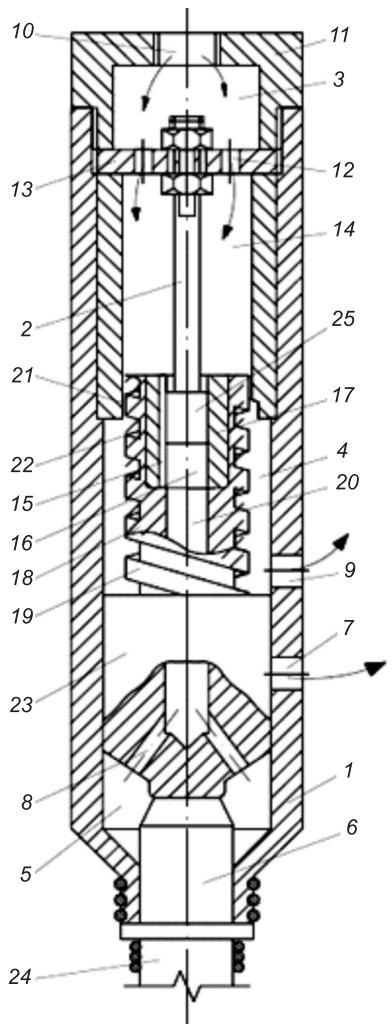


Рис. 1. Принципиальная схема пневматического ударного механизма

кольцевой камере 4 рабочего хода понизится до величины атмосферного. Далее ступенчатый ударник 19 перекроет своей боковой поверхностью выпускной канал 7 и откроет отверстие 16 и продольный канал-паз 15 втулки 17 штоковой части 18 ступенчатого ударника, вследствие чего в камере 5 холостого хода начнется сжатие отсеченного в ней воздуха и воздуха, поступающего по продольному каналу-пазу, отверстию 16, сквозному отверстию 20 и радиальному каналу 8 из распределительной камеры 14.

Так как рабочая площадь основной части 23 ступенчатого ударника 19 со стороны камеры 5 холостого хода больше торцевой площади штоковой части 18 ступенчатого ударника, то под действием разности импульсов давлений воздуха со стороны этих камер ступенчатый ударник, преодолевая противодавление со стороны камеры 5 холостого хода, наносит удар по хвостовику 6 рабочего инструмента 24. Под действием импульсов отскока и давления воздуха со стороны камеры холостого хода ступенчатый ударник 19 начинает холостой ход. Далее рабочий цикл пневматического ударного механизма повторяется.

щем движении ступенчатый ударник 19 перекрывает выпускной канал 9 в цилиндрическом корпусе 1, а отверстие 16 и продольный канал-паз 15 втулки 17 штоковой части 18 ступенчатого ударника перекрывается поршневой частью 25 стержня 2 и поступление воздуха в камеру 5 холостого хода прекращается. После открытия основной частью 23 ступенчатого ударника 19 выпускного канала 7 давление воздуха в камере 5 холостого хода выравнивается до атмосферного. В кольцевой камере 4 рабочего хода после разобщения ее с атмосферой начнется сжатие воздуха, отсеченного в ней, и воздуха, поступающего из распределительной камеры 14 через кольцевой зазор 21 и дроссельный винтовой перепускной канал-паз 22 до некоторой расчетной величины. Давление в распределительной камере 14, кольцевой камере 4 рабочего хода увеличивается и под действием разности импульсов давлений, действующих на ступенчатый ударник 19 со стороны распределительной камеры 14, кольцевой камере 4 рабочего хода и камере 5 холостого хода, ступенчатый ударник затормаживается и останавливается в расчетной точке. Сразу же под действием импульса давления воздуха со стороны распределительной камеры 14 и кольцевой камере 4 рабочего хода ступенчатый ударник 19 начинает движение в сторону хвостовика 6 рабочего инструмента 24, совершая рабочий ход. При этом ступенчатый ударник 19 откроет выпускной канал 9 и давление воздуха в

Физико-математическое описание рабочего процесса пневматического ударного механизма представлено следующими блоками при $W = (2bR/(k-1))^{1/2}$:

бародинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_c}{dt} = \frac{k}{V_c} [W(\omega_{co}\varphi_{co} - \omega_{kp}\varphi_{kp})], \\ \frac{dp_{kp}}{dt} = \frac{k}{(V_{kp} - x_y S_{\text{ш}})} \left[W(\omega_{kp}\varphi_{kp} - \omega_x(x_y)\varphi_x - \omega_p(x_y)\varphi_p) + p_{kp} \frac{dx_y}{dt} S_{\text{ш}} \right], \\ \frac{dp_p}{dt} = \frac{k}{V_p - x_y(S_x - S_{\text{ш}})} \left[W(\omega_p(x_y)\varphi_p - \omega_{ap}(x_y)\varphi_{ap}) + p_p \frac{dx_y}{dt} (S_x - S_{\text{ш}}) \right], \\ \frac{dp_x}{dt} = \frac{k}{(V_x + x_y S_x)} \left[W(\omega_x(x_y)\varphi_x - \omega_{ax}(x_y)\varphi_{ax}) - p_x \frac{dx_y}{dt} S_x \right]; \end{array} \right. \quad (1)$$

термодинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_c}{dt} = \frac{k}{V_c} [W(\omega_{co}\varphi_{co}\Omega_{co} - \omega_{kp}\varphi_{kp}\Omega_{kp})], \\ \frac{d\theta_{kp}}{dt} = \frac{k}{(V_{kp} - x_y S_{\text{ш}})} \left[W(\omega_{kp}\varphi_{kp}\Omega_{kp} - \omega_x(x_y)\varphi_x\Omega_x - \omega_p(x_y)\varphi_p\Omega_p) + (k-1)p_{kp} \frac{dx_y}{dt} S_{\text{ш}} \right], \\ \frac{d\theta_p}{dt} = \frac{k}{V_p - x_y(S_x - S_{\text{ш}})} \left[W(\omega_p(x_y)\varphi_p\Omega_p - \omega_{ap}(x_y)\varphi_{ap}\Omega_{ap}) + (k-1)p_p \frac{dx_y}{dt} (S_x - S_{\text{ш}}) \right], \\ \frac{d\theta_x}{dt} = \frac{k}{(V_x - x_y S_x)} \left[W(\omega_x(x_y)\varphi_x\Omega_x - \omega_{ax}(x_y)\varphi_{ax}\Omega_{ax}) - (k-1)p_x \frac{dx_y}{dt} S_x \right]; \end{array} \right. \quad (2)$$

баромеханическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{S_x p_x - S_p p_p - (S_{\text{ш}} - S_x) p_{kp} + \text{sign}(F_{ky}) + \text{sign}(F_{cy})}{m_y} \text{ при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \text{ при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{S_x p_x - S_p p_p - (S_{\text{ш}} - S_c) p_{kp} + \text{sign}(F_{ky}) + \text{sign}(F_{cy}) - F_h}{m_k} \text{ при } x_k > 0, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{dx_{\kappa}}{dt} \right)_0 = -k_{\kappa} \left(\frac{dx_{\kappa}}{dt} \right)_y & \text{при } x_{\kappa} \leq 0, \\ \frac{d^2 x_c}{dt^2} = \frac{S_c p_x - S_c p_c + \text{sign}(F_{cy}) - F_{\pi}}{m_c} & \text{при } x_c > 0, \\ \left(\frac{dx_c}{dt} \right)_0 = -k_c \left(\frac{dx_c}{dt} \right)_y & \text{при } x_c \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) приняты следующие обозначения:

p_{co} , p_{kp} , p_p , p_x — давление воздуха в сетевой камере, распределительной камере, камере рабочего и холостого ходов из распределительной камеры;

ω_{co} , ω_{kp} , ω_p , ω_x — проходные сечения каналов впуска в сетевую камеру, распределительную камеру, камеры рабочего и холостого ходов из распределительной камеры;

Φ_{co} , Φ_{kp} , Φ_p , Φ_x — бародинамические функции каналов впуска в сетевую камеру, распределительную камеру, камеры рабочего и холостого ходов;

Φ_{ap} , Φ_{ax} — бародинамические функции проходных каналов выпуска из камеры рабочего и холостого ходов;

θ_{co} , θ_{kp} , θ_p , θ_x — температуры в сетевой камере, распределительной камере, камере рабочего и холостого ходов;

Ω_{co} , Ω_{kp} , Ω_p , Ω_x — термодинамические функции сетевой камеры, распределительной камеры, камеры рабочего и холостого ходов;

k_y , k_{κ} , k_c — коэффициенты «отскока» ударника и корпуса от буртика инструмента и стержня от крышки корпуса, подсчитываемые как отношения скоростей после $U_{0i} = \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_0$ и до соударения $U_{yi} = \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_y$ соответственно для ударника, корпуса и стержня;

$$k_y = \frac{U_{0y}}{U_y}, k_{\kappa} = \frac{U_{0\kappa}}{U_{\kappa}}, k_c = \frac{U_{0c}}{U_c}; \quad (4)$$

F_{ky} , F_{kc} — силы трения ударника о корпус и трение ударника о стержень по оси перемещения корпуса;

F_c , F_{π} , F_h — сила нажатия на стержень силой от p_c , пружины и на корпус;

x_c , x_y , x_{κ} — перемещение стержня ударника и корпуса;

S_x , S_p , S_c , S_w — площади диаметральных сечений ударника со стороны камеры холостого хода, со стороны кольцевой камеры рабочего хода, стержня и полная площадь штоковой части ударника;

m_y , m_{κ} , m_c — масса ударника, корпуса и стержня;

L_k — длина цилиндрической части корпуса;

H_x , H_p — длины участков канала выпуска камеры холостого хода;

B_x , B_p — длины участков канала выпуска камеры рабочего хода;

B — длина канала-паза впуска в камеру холостого хода.

Бародинамические функции φ_{CO} , φ_{KP} , φ_x , φ_p , φ_{AP} , φ_{AX} записываются на основе зависимости Сен-Венана–Вантцеля:

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} 0,2588 \cdot p_i \sqrt{\theta_i} & \text{при } 0,5283 > p_i / p_j, \\ p_j \sqrt{\theta_i} \cdot \sqrt{(p_i / p_j)^{2/k} - (p_i / p_j)^{(1+k)/k}} & \text{при } 0,5283 \leq p_i / p_j, \\ -0,2588 \cdot p_j \sqrt{\theta_j} & \text{при } 0,5283 > p_j / p_i, \\ -p_i \sqrt{\theta_j} \cdot \sqrt{(p_j / p_i)^{2/k} - (p_j / p_i)^{(1+k)/k}} & \text{при } 0,5283 \leq p_j / p_i, \end{cases} \quad (5)$$

где индексы i_j и j_i обозначают направление течения воздуха «куда – откуда» и «откуда – куда» при i — куда, j — откуда. Аналогична запись для Ω .

Для функций Ω :

$$\Omega_{i,j} \equiv \Omega_{j,i} = \begin{cases} (k-1) & \text{при } (\varphi_{i,j}) > 0, \\ \left(k - \frac{\theta_i}{\theta_j} \right) & \text{при } (\varphi_{i,j}) \leq 0, \\ \left(k - \frac{\theta_j}{\theta_i} \right) & \text{при } (\varphi_{j,i}) > 0, \\ (k-1) & \text{при } (\varphi_{j,i}) \leq 0; \end{cases} \quad (6)$$

для функций ω_{AP} , ω_{AX} выпуска:

$$\omega_{\text{AP}}(x_y) = \begin{cases} 0 & \text{при } B_p < x_y, \\ \pi \cdot D_p^2 / 4 & \text{при } B_x \geq x_y; \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_{\text{AX}}(x_y) = \begin{cases} 0 & \text{при } H_x \geq x_y, \\ \pi \cdot D_b^2 / 4 & \text{при } H_x < x_y; \end{cases} \quad (8)$$

для функций ω_p , ω_x впуска:

$$\omega_p(x_y) = \begin{cases} 0 & \text{при } (L_k - B_x) \leq x_y, \\ (b \cdot h) \cdot 0,5 & \text{при } (L_k - B_x) / 2 > x_y, \\ b \cdot h & \text{при } (L_k - B_x) > x_y; \end{cases} \quad (9)$$

$$\omega_x(x_y) = \begin{cases} 0 & \text{при } H_x \leq x_y, \\ f \cdot e & \text{при } H_x > x_y. \end{cases} \quad (10)$$

Для предварительных исследований численным методом можно опустить из рассмотрения в баромеханической составляющей (3) уравнения для $\frac{d^2 x_c}{dt^2}$ при $x_c > 0$ и $\left(\frac{dx_c}{dt}\right)_0, \left(\frac{dx_c}{dt}\right)_y$ при $x_c \leq 0$, поскольку осевое перемещение стержня практически не предполагается при силах нажатия $F_C = [F_\Pi + (p_C S_C)] > (p_X S_C)$, что гарантируется $p_C > p_X$ и наличием силы F_Π прижатия пружиной. При этом значительно упрощаются расчеты по (3).

Учитывая, что винтовой канал впуска с проходным сечением $\omega = \mu_p b h$, но из-за $\mu_p = \mu(l_p, \psi_p, S_p)$ при $S_p = bh = \text{const}$, $l_p \neq \text{const}$ из-за изменения координаты $x_y = x_t$, где l_p — длина винтового канала; ψ_p — форма канала; S_p , b , h — площадь сечения, ширина и глубина канала.

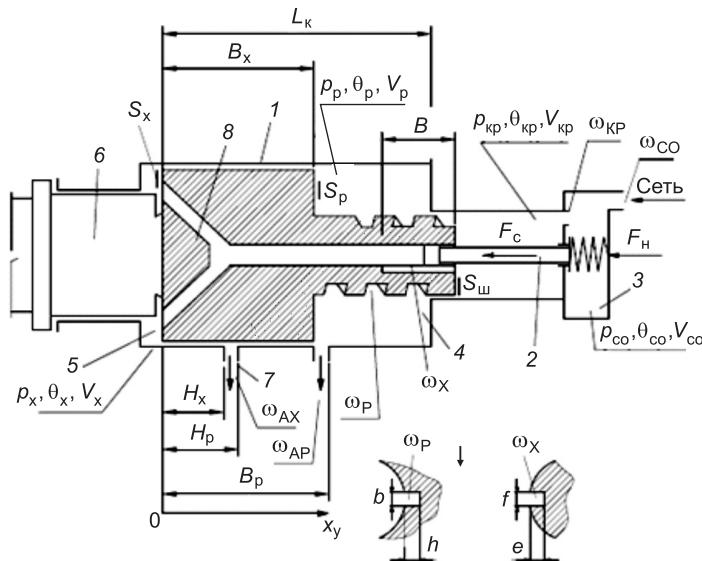


Рис. 2. Расчетная схема пневматического ударного механизма

1 — корпус; 2 — стержень; 3 — камера сетевого воздуха; 4, 5 — камеры рабочего и холостого ходов; 6 — хвостовик рабочего инструмента; 7, 9 — каналы выпускные; 8 — канал впуска в камеру холостого хода

Для предварительных исследований предлагается в (10) применить при $\max x_y \quad \omega_p = 0$,
при $0,5x_y \quad \omega_p = 0,5(b \cdot h)$,
при $x_y = 0 \quad \omega_p = b \cdot h$.

После продувки канала реальной конструкции уточняются μ_p , ψ_p и размеры b , h , l_p , что обеспечит расчетное значение расхода воздуха.

Относительно учета пропускной способности канала с проходным сечением ω_x отметим следующее.

Сечение $\omega_x = \mu \cdot f \cdot e$, но из-за $\mu_x = \mu(l_x, \psi_x, S_x)$ при $S_x = f \cdot e = \text{const}$ малых размеров длины l_x участка впуска можно принять $\mu_x = \text{const}$ и $\omega_x = \text{const}$. После продувки реального канала впуска уточняются коэффициент расхода μ_x и размеры f , e (рис. 2).

Данная физико-математическая модель дроссельно-беззотникового пневматического ударного механизма позволяет выполнять расчеты по определению его рациональных параметров динамики и геометрии.

Выводы. При предварительном рассмотрении рабочего процесса пневмоударного механизма, представленного схемами на рис. 1 и 2, можно регулировать комплексы обратных течений воздуха по дросселям (каналам) при наличии соответствующих посадок между контактирующими подвижными деталями: ударник — корпус (цилиндр); ударник — стержень.

Теоретический и практический интерес представляют рациональные значения соотношений между объемами камер, координаты расположения, проходные сечения и геометрия дросселей (каналов) впуска — выпуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. изд. [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. — 430 с.

ГРУЗИН Алексей Владимирович, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

КУЛИКОВ Андрей Викторович, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 28.09.12

Gruzin Alexey Vladimirovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Kulikov Andrey Viktorovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Dmitriy Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Eduard Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

DIAGRAM THROTTLE-PNEUMATIC HAMMER MECHANISM BEZZOLOTNIKOVOGO AND PHYSICAL-MATHEMATICAL DESCRIPTION

Given physical and mathematical description of the air percussion mechanism throttle-bezzolotnikovogo type.

Key words: air percussion mechanism, the chamber of the working stroke, the camera idle network, prechamber pressure, stage drummer, rod, tool shank.

REFERENCES

1. Abramenkov, E.A. Pneumatic hammer mechanism machines: Reference book [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk : Publishing House of Novosibirsk State University, 1993. — 430 p.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.046.5

Т.Е. ГОРДЕЕВА

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВУХ МОМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

При вычислении надежности и вероятности отказа конструкции возникает необходимость определения характеристик сложной функции. По существующей аппроксимации для квантиля нормального распределения для случая композиции нормального и двойного экспоненциального законов распределений получены корни уравнения третьей степени, проведен анализ корней уравнения, определены диапазоны использования каждого корня. Выработано предложение по сопряжению корней уравнения для определения вероятности отказа конструкции при помощи «индикатора отказа» на интервале значений от 1 до 7.

Ключевые слова: вероятность отказа, композиция статистических распределений, «индикатор отказа», область отказа, область надежности.

Существующее понятие надежности конструкции по критерию прочности основано на рассмотрении взаимодействия двух статистических распределений — распределения внутренних свойств конструкции и распределения внешних воздействий, причем несущая способность элемента, в свою очередь, представляет собой композицию распределений свойств материалов элемента. Внешние воздействия также являются композицией постоянных и временных нагрузок.

За вероятность отказа конструкции по прочности Q принимается вероятность превышения нагрузки от внешних воздействий над несущей способностью конструкции R .

В расчетах строительных конструкций часто распределение постоянной нагрузки g_n принимается нормальным, а распределение временной нагрузки g_{vp} — двойным экспоненциальным (рис. 1). Композицию распределений прочности и нагрузки представим следующим образом:

$$\psi = R - (g_n + g_{vp}). \quad (1)$$

Распределения постоянной нагрузки и прочности конструкции (заданные нормальными распределениями) можно объединить в одно и использовать схему, показанную на рис. 2.

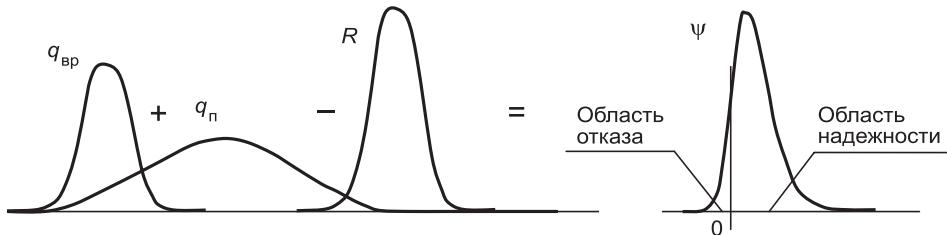


Рис. 1. Состав композиции распределений ψ

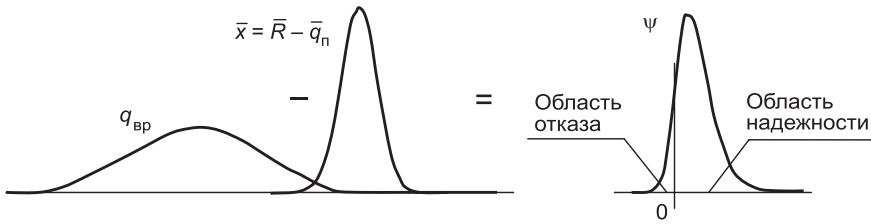


Рис. 2. Расчетная схема для композиции распределений

\bar{X} — среднее значение распределения, полученного из композиции распределений несущей способности конструкции и постоянной нагрузки; ψ — результирующее распределение, в котором отрицательные значения формируют область отказа конструкции, положительные — область надежности конструкции

Распределение свойства конструкции получаем двумя путями: интегральным и дифференциальным методами.

Интегральный метод, заключающийся в обработке опытных данных по результатам испытаний конструкций, является дорогим и практически неосуществимым, так как представительность результатов зависит от количества опытных данных.

Дифференциальный метод основан на теоретическом получении параметров распределения функции. Для представления статистических данных используются различные законы распределения. В расчетах надежности конструкций, как правило, применяются экспоненциальные законы (вида $y = e^{-x^2}$), которые невозможно проинтегрировать аналитически в заданных пределах. Именно поэтому их применение предполагает использование вычислительной техники и громоздких алгоритмов численного интегрирования.

В настоящее время применяют несколько методов определения параметров распределения сложной функции: линеаризации, условных функций надежности, кратного интегрирования, последовательной замены случайных аргументов, статистических испытаний (метод Монте-Карло), «горячих точек» (за рубежом он получил название «метод первого приближения»), «Перебор», а также метод, использующий «индикатор отказа» (метод двух моментов).

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Основные из них — трудоемкость использования и необходимость дополнительного программирования при вычислении вероятности отказа конструкции.

В Самарском государственном архитектурно-строительном университете [1] более подробно изучались достоинства и недостатки метода двух моментов. Указанная методика вычисления вероятности отказа конструкции использует вспомогательную величину — индикатор отказа.

Индикатор отказа n_ψ — количество стандартов от среднего значения композиции прочности \bar{R} и нагрузки \bar{Q} до границы областей надежности и отказа (рис. 3).

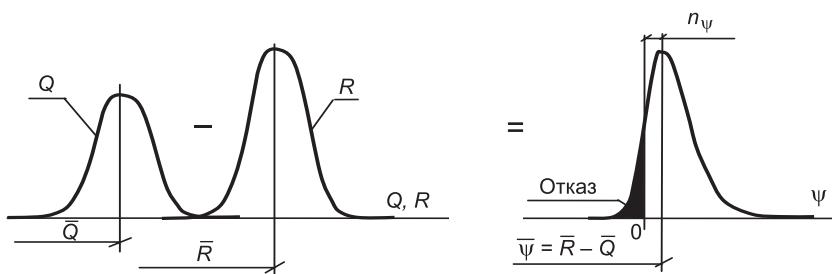


Рис. 3. Графическое представление индикатора отказа n_ψ

Величину n_ψ можно выразить через вероятность отказа p .

В качестве одной из форм зависимости была выбрана аппроксимация для квантиля нормального распределения [2]:

$$n_\psi = t - \frac{a_0 + a_1 \cdot t}{1 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2}, \quad (2)$$

где

$$n_\psi = \frac{\bar{\Psi}}{\sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_R^2 - 2 \cdot \sigma_Q \cdot \sigma_R \cdot r_{RQ}}}, \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{p^2}\right)}, \quad (4)$$

здесь σ_Q , σ_R — стандарты соответствующих распределений;

r_{RQ} — коэффициент корреляции;

p — вероятность отказа;

$\bar{\Psi}$ — среднее значение композиции распределения прочности и нагрузки.

Для случая композиции нормального и двойного экспоненциального законов распределений [3]

$$n_\psi = t - \frac{2,0685583 - 0,4213594 \cdot t}{1 + 0,31487131 \cdot t - 0,091073508 \cdot t^2}. \quad (5)$$

Уравнение (5) решается итерационно относительно p . Его также можно решить как уравнение третьей степени относительно t и уже затем определить p .

Возможную неоднозначность результата можно исключить, принимая во внимание, что искомые p и t должны обеспечивать положительные значения n и иметь разумные инженерные результаты.

При вычислении вероятности отказа с помощью «индикатора отказа» возникает неопределенность из-за того, что уравнение (5) имеет три корня — Q_1 , Q_2 , Q_3 (рис. 4).

По результатам исследования графического представления решения уравнения (5) выработаны предложения по сопряжению его корней для определения вероятности отказа при помощи «индикатора отказа».

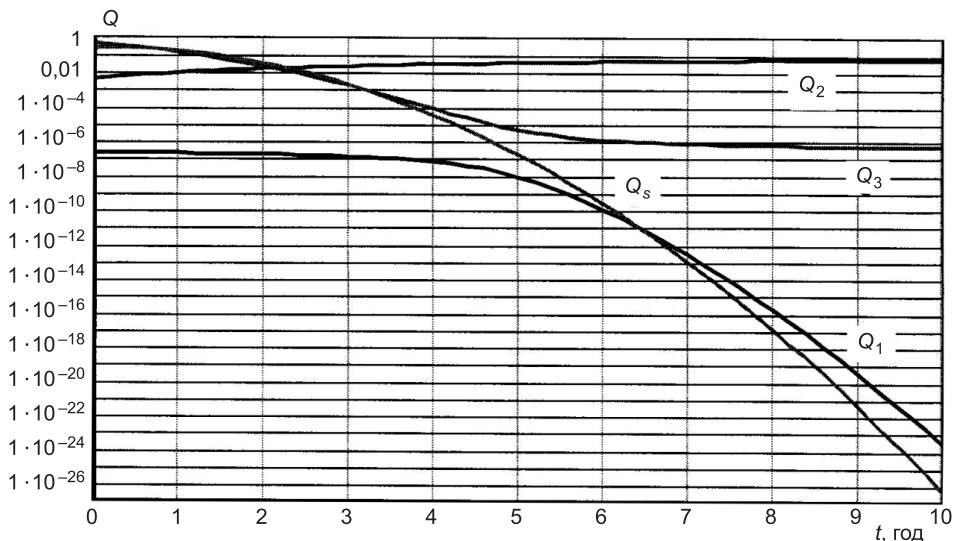


Рис. 4. Корни квадратного уравнения Q_1 , Q_2 , Q_3 и уравнение сопряжения корней Q_s

Анализ этих решений показывает следующее:

- корень Q_2 не имеет физического смысла, так как вероятность отказа по мере увеличения n_ψ должна уменьшаться;
- корень Q_3 соответствует значениям вероятности для композиции двух нормальных распределений при n_ψ , изменяющимся от 0 до примерно 4–5;

— корень Q_1 соответствует тому же при значениях n более 5 (до 7).

Для определения вероятности отказа конструкции предлагается использовать уравнение

$$Q_s(n_\psi) = \exp(-0,611793n_\psi^2 + 0,207097n_\psi - 1,37185). \quad (6)$$

Уравнение определено на интервале значений индикатора отказа от 1 до 7. Для определения отказа при значениях $n > 7$ следует применять решение Q_1 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лычев, А.С. Вероятностные методы расчета строительных элементов и систем : учеб. пособие [Текст] / А.С. Лычев. — Самара : СамГАСА, 1995. — С. 142.
2. Справочник по специальным функциям [Текст] / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган ; пер. с англ. — М. : Наука, 1979. — С. 830.
3. Лычев, А.С. Способы вычисления вероятности отказа в композиции распределений прочности и нагрузки [Текст] / А.С. Лычев // Надежность строительных элементов и систем : Тр. междунар. науч.-техн. конф. — Самара, 1997. — С. 33–37.

ГОРДЕЕВА Татьяна Евгеньевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: FTGS-SGASU@rambler.ru

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 27.09.12

Gordeeva Tatyana Evgenievna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: FTGS-SGASU@rambler.ru, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

APPLICATION OF THE METHOD TWO MOMENTS TO DETERMINE STRUCTURAL RELIABILITY

In the calculation of the probability of failure and reliability design is necessary to determine the characteristics of a composite function.

According to the existing approximation for quantile of the normal distribution for the case of the composition of normal and double exponential distribution obtained by the roots of the third degree, the analysis of the roots of the equation are defined ranges of each root. It is developed a proposal to pair the roots to determine the probability of failure by design «failure indicator» on the range 1 to 7.

Key words: failure probability, statistical distributions of composition, «indicator of failure», the area of failure, the area of reliability.

REFERENCES

1. Lychev, A.S. Probabilistic methods for design of components and systems : Manual [Text] / A.S. Lychev. — Samara : SamGASA, 1995. — P. 142.
2. Handbook of Mathematical Functions [Text] / ed. M. Abramowitz and I. Steagan ; per. from English. — M. : Pergamon Press, 1979. — P. 830.
3. Lychev, A.S. Methods of calculating the probability of failure in the compositions of the strength and load [Text] / A.S. Lychev // Reliability of building elements and systems : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. — Samara, 1997. — P. 33–37.

УДК 624.04

М.Н. ДАНИЛОВ, Н.Н. ФЕДОРОВА

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ*

В работе на основе численного моделирования в программном комплексе ANSYS разработана методика численного расчета конструкций на несущую способность с учетом конструктивных особенностей и определены напряжения и деформации в строительных сэндвич-панелях. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными по предельно допустимым нагрузкам в зависимости от геометрических параметров конструкции.

Ключевые слова: сэндвич-панели, метод конечных элементов, ANSYS, напряженно-деформированное состояние.

1. Введение. Трехслойные строительные сэндвич-панели нашли в настоящее время широкое применение в строительстве. Специфика данного вида строительных изделий заключается в большом разнообразии возможных конструктивных решений и используемых для изготовления материалов. Повышенные требования к прочности и надежности при уменьшении материоемкости приводят к необходимости анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) данных конструкций в широком диапазоне параметров. Для обеспечения безопасной эксплуатации панелей требуются дополнительные исследования их поведения при различных схемах нагружения и новые методики расчета, учитывающие определенные конструктивные особенности.

Важность этих задач также обусловливается отсутствием достаточного испытательного обеспечения лабораторий, трудоемкостью и высокой стоимостью испытаний данных строительных конструкций.

Теоретические основы и методики расчета трехслойных пластин и оболочек с конструкционным средним слоем разработаны в середине прошлого века [1, 2]. Данные методики, основанные на построении аналитических решений, применимы для расчета конструкций простейших типов. В связи с этим актуальными задачами являются совершенствование методов расчета и автоматизация проектирования сэндвич-панелей. Один из способов решения данной проблемы заключается в использовании математического моделирования на основе полной системы уравнений напряженно-деформированного состояния твердого тела.

Для решения данных уравнений используется метод конечных элементов (МКЭ). Алгоритмы численной реализации МКЭ позволяют учсть все особенности поведения многослойных конструкций при действии механических нагрузок и применяются в универсальных компьютерных МКЭ-системах типа ANSYS. В настоящее время в литературе можно най-

* Работа выполнена при поддержке программ ЕЗН N8.2350.2011, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы «Математическое моделирование ветрового и ударно-волнового воздействия на здания и сооружения с использованием программных комплексов компьютерной инженерии» (соглашение №14.B37.21.1136).

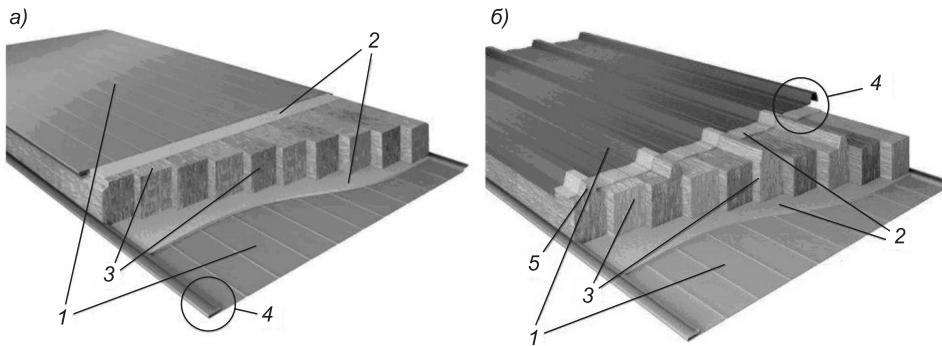


Рис. 1. Конструкция стеновых (а) и кровельных (б) сэндвич-панелей

ти множество примеров использования конечно-элементных комплексов для моделирования поведения композитных конструкций (см., например, [3]). Несмотря на наличие большого количества работ по данной тематике, следует отметить, что ввиду разнообразия материалов и конструктивных решений каждый вид сэндвич-панелей требует разработки геометрической и физической модели и индивидуальной методики моделирования.

2. Объект исследования и цели работы. Объектом исследования являются стеновые и кровельные трехслойные панели (рис. 1).

Сэндвич-панели состоят из стальных профилированных листов 1 толщиной 0,7 мм и теплоизоляционного слоя 3, представляющего собой плотно прилегающие друг к другу ламели — прямоугольные бруски, полученные путем поперечной разрезки жестких минераловатных плит. С целью повышения теплоизоляционных свойств панелей ламели уложены таким образом, чтобы волокна минераловатного материала были расположены в плоскости, перпендикулярной плоскости панели. Металлические листы соединяются со средним слоем синтетическим клеем 2 на полиуретановой основе. В кровельных панелях кроме прямоугольных используются трапециевидные ламели 5, которые располагаются в ребрах жесткости наружного профилированного листа. Для соединения панелей между собой применяется лабиринтное соединение 4.

В работе исследованы панели со следующими геометрическими параметрами: ширина 1,0 м, длина 1,0÷8,0 м. Размеры ламелей: длина 1000 мм, ширина 50 мм, толщина утеплителя варьировалась в пределах 50÷250 мм.

Основные цели работы:

1) создание математической модели многослойной конструкции в ПК ANSYS;

2) исследование на ее основе прочностных свойств сэндвич-панели, в том числе определение:

- величины критической нагрузки;

- характера распределения напряжений и деформаций в ее элементах;

- влияния геометрических характеристик (толщины утеплителя и величины пролета обшивок) на НДС панели;

3) развитие методологии решения практических проектных задач, основанной на базовых нормативных документах с применением уточненных методов математического моделирования и выработка рекомендации по выбору геометрических параметров панелей для обеспечения требуемых прочностных свойств.

3. Математическая модель. Математическое моделирование механической реакции многослойных конструкций на статические нагрузки основано на решении полной системы уравнений теории упругости с помощью метода конечных элементов [4].

При создании математической модели принятые следующие основные допущения: 1) задача решается в статической постановке; 2) слой утеплителя неразрывно соединен с обшивками с помощью клеевого соединения; ламели минеральной ваты в слое утеплителя могут контактно взаимодействовать друг с другом без трения; 3) материалы элементов конструкции линейно-упругие; материал среднего слоя ортотропный.

Расчет конструкции сводится к решению краевых задач для системы уравнений теории упругости, которая в трехмерном случае содержит 15 уравнений относительно 15 неизвестных компонентов векторов $\{\sigma\}$, $\{\varepsilon\}$, $\{U\}$, где $\{U\} = \{u, v, w\}^T$ — вектор перемещений;

$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}^T$ — вектор напряжений;

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T$ — вектор деформаций. Полная система уравнений в перемещениях включает уравнения равновесия

$$[\Phi]^T [D]^{-1} [\Phi] \{U\} = \{f_v\}, \quad (1)$$

геометрические уравнения (соотношения Коши)

$$\{\varepsilon\} = [\Phi] \{U\}, \quad (2)$$

определяющие (физические) уравнения

$$\{\varepsilon\} = [D] \{\sigma\}, \quad (3)$$

$[\Phi]^T$ — матрица дифференциальных операторов

$$[\Phi]^T = \begin{bmatrix} \partial / \partial x & 0 & 0 & \partial / \partial y & 0 & \partial / \partial z \\ 0 & \partial / \partial y & 0 & \partial / \partial x & \partial / \partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial / \partial z & 0 & \partial / \partial y & \partial / \partial x \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$\{f_v\} = \{X, Y, Z\}^T$ — вектор-функция объемных сил; $[D]$ — матрица упругой податливости, определяющая механические характеристики материала. Для ортотропного материала

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{v_{xy}}{E_y} & -\frac{v_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{v_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{xz}}{E_x} & -\frac{v_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где E_x , E_y , E_z — модули Юнга в направлении главных осей;

G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} — модули сдвига для плоскостей xy , yz , xz ;

ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} — коэффициенты Пуассона.

Уравнения (1)–(3) необходимо дополнить граничными условиями закрепления и нагрузок, которые будут описаны ниже.

Дифференциальные соотношения теории упругости имеют эквивалентную вариационную формулировку (вариационный принцип Лагранжа), согласно которой задача определения перемещений в каждой точке пространства может быть сведена к задаче минимизации функционала потенциальной энергии:

$$\delta\Pi = \delta(A - W) = 0, \quad (6)$$

где $A = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \cdot \sigma dV$ — работа внутренних сил;

$W = \int_V U^T \cdot f_V dV + \int_S U^T \cdot f_S dS$ — сумма работ объемных и поверхностных

сил на вызванных ими перемещениях.

Таким образом, исходная дифференциальная задача сведена к нахождению поля перемещений $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$, $w(x,y,z)$, доставляющих минимум функционалу полной потенциальной энергии системы.

Искомые функции перемещений отыскиваются в виде конечной суммы

$$x = \sum_{i=1}^{i=n} c_i \varphi_i,$$

где x — любая из искомых величин u , v , w ;

φ_i — заранее выбранные базисные функции;

c_i — неизвестные коэффициенты.

Коэффициенты c_i ищутся из условия минимума полной потенциальной энергии (7)

$$\frac{\partial \Pi}{\partial c_i} = 0. \quad (7)$$

Совокупность условий позволяет записать искомую СЛАУ относительно неизвестных коэффициентов c_i .

В работе использовались линейно-упругие модели материалов со следующими физико-механическими характеристиками:

1) сталь: модуль Юнга (в пределах линейной работы) $E = 2,082 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига $G = 7,69 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 7850,0$ кг/м³;

2) минераловатные плиты: модули Юнга $E_x = 4,9$ МПа, $E_y = 5,2$, $E_z = 7,0$ МПа; модули сдвига $G_{xy} = 0,45$ МПа, $G_{yz} = 0,47$, $G_{xz} = 0,55$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = \nu = 0,3$; $\rho = 120,0$ кг/м³.

4. Методика проведения расчетов. Задача о напряженно-деформированном состоянии конструкции сэндвич-панели решалась методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS 14.0¹. Расчеты проведены в среде Workbench.

Процесс решения состоит из следующих этапов: выбор моделей материалов и назначение свойств, построение модели конструкции, создание расчетной сетки, задание граничных условий, решение системы уравнений, анализ результатов.

¹ ANSYS ACADEMIC Research, Custom number 531493.

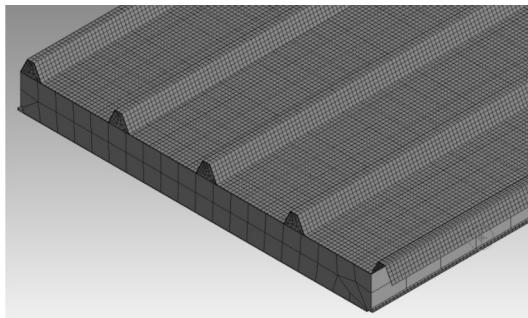


Рис. 2. Схема конструкции панели и расчетная сетка

3D-модели конструкций создавались в двух приложениях: ANSYS DesignModeler и AutoCAD. Оба приложения допускают возможность создания параметрической модели, что позволяет существенно сократить время на разработку геометрических моделей. Были назначены такие параметры, как толщина слоя утеплителя, ширина панели, толщина обшивки, геометрические параметры «замкового» соединения, геометрические параметры профиля листа, толщина слоя клея и др. Путем изменения числовых значений параметров вносились необходимые изменения в 3D-модель конструкции. Части 3D-модели конструкции (обшивки панелей и слои клея), имеющие малую толщину, были преобразованы в оболочки.

Важным этапом в создании расчетной модели является построение расчетной сетки, для чего использовалось приложение ANSYS Meshing. Была создана структурированная сетка с преимущественно призматическими 8-узловыми элементами. Шаг сетки на слое утеплителя выбран более крупным, чем на наружных обшивках, что обусловлено большими размерами и простой геометрией среднего слоя в отличие от обшивок, имеющих сложную геометрию и малую толщину, на которую приходится один элемент. Общее число элементов в зависимости от геометрических размеров модели составляло $10^5 \div 1,5 \cdot 10^6$. Часть геометрической модели с расчетной сеткой показана на рис. 2.

5. Задача о напряженно-деформированном состоянии многослойной конструкции. Для исследования напряженно-деформированного состояния панели принята схема нагружения, представленная на рис. 3. Ширина площадки опирания на прогон принята 50 мм; закрепление, фиксированное во всех трех направлениях. Панель нагружалась по одно- и многопролетной схемам. К панели были приложены следующие нагрузки: сосредоточенная сила $F = 981$ Н, приложенная по центру панели; гравитация $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; равномерно распределенная нагрузка q , величина которой менялась в пределах $0 \div 20 \text{ кПа}$. Это соответствует стандартной схеме нагружения².

Для панели шириной 1000 мм, длиной 3000 мм, с толщиной утеплителя 100 мм были выполнены исследования сходимости по сетке, результаты которых представлены в таблице.

Разница между максимальными значениями относительных деформаций, выполненных на грубои и средней сетках, составляла 8,904 %; между напряжениями — 8,120 %, а между максимальными значениями, полученными на средней

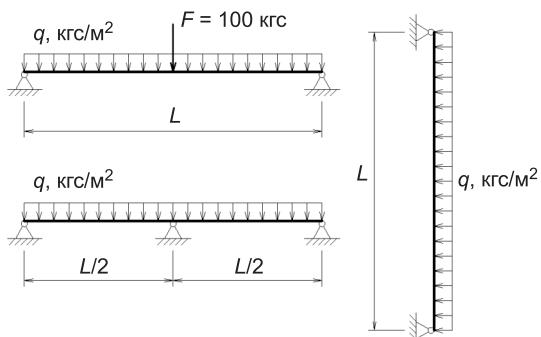


Рис. 3. Схема нагружения

² СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия.

Исследование сходимости по сетке

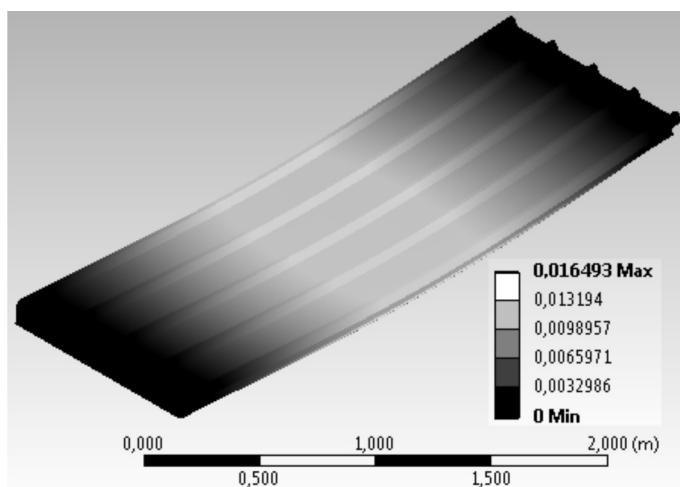
Сетка	Кол-во элементов (узлов) в оболочках	Кол-во элементов (узлов) в слое утеплителя	Максимальные напряжения, МПа	Максимальные относительные деформации
Грубая	110970 (121810)	9310 (11350)	161,22	0,025392
Средняя	397020 (410360)	34120 (46280)	169,34	0,027874
Мелкая	789390 (814750)	109490 (122030)	169,82	0,027992

и мелкой сетках, соответственно 0,422 и 0,283 %. Следовательно, можно полагать, что сетка с количеством узлов 410360 в оболочках и 46280 в слое утеплителя обеспечивала сеточно-независимое решение и была использована в дальнейших расчетах.

В рамках исследования НДС панели были получены распределения напряжений и деформаций в элементах трехслойной конструкции и определена величина критической нагрузки, т.е. нагрузки, соответствующей наступлению предельного прогиба панели ($L/200$). Кроме того, было исследовано влияние геометрических характеристик обшивок, толщины утеплителя и величины пролета на НДС панели.

На рис. 4 представлено поле деформаций для кровельной панели 3000×1000×50 мм. В результате расчетов был установлен характер распределения напряжений в элементах трехслойной конструкции, а также определены деформации.

По длине панели напряжения распределены в виде стандартной эпюры. Было установлено, что нижняя обшивка панели растянута по всей длине пролета. Наиболее нагруженными элементами гофрированной обшивки являются верхние полки гофров в середине пролета (рис. 5). Гофры внешней обшивки сжаты только в центре панели, причем наиболее сжат средний по ширине гофр. В районе опор верхние полки гофров растянуты. В результате больших касательных и нормальных напряжений, возникающих на торце панели, при больших прогибах может произойти расслоение. Нижние полки гофров верхней обшивки растянуты по всей длине. С увеличением высоты гофра увеличиваются напряжения в верхней полке гофрированной обшивки, что может привести к потере устойчивости и разрушению конструкции.



Rис. 4. Деформации панели

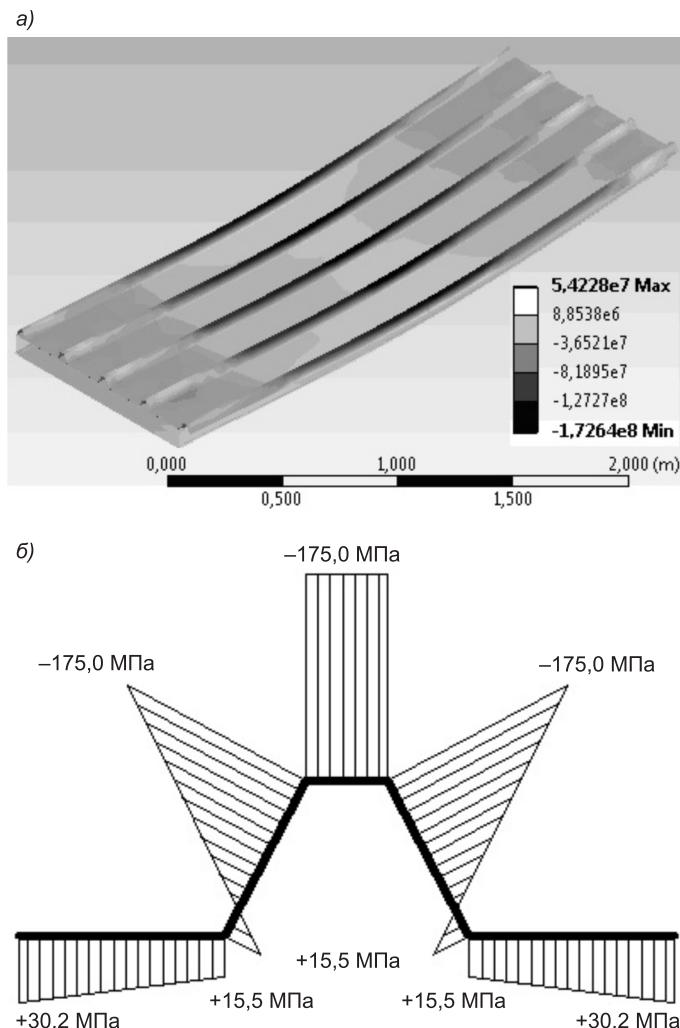


Рис. 5. Напряжения в верхней обшивке панели (а) и эпюра напряжений в гофре по центру панели (б)

Установлено, что при однопролетной схеме работы в середине пролета внешний момент воспринимается обшивками, средний же слой при этом нагружен чрезвычайно слабо. При двухпролетной схеме в середине пролета момент воспринимается обшивками, а над средней опорой — гофрированной обшивкой и утеплителем.

Анализ результатов расчетов показал, что при наступлении предельного состояния по прогибу максимальные напряжения и деформации не выходят за пределы применимости линейной теории упругости; относительные деформации в обшивках не превышают 10^{-3} , а напряжения 200 МПа. Нормальные напряжения в слое утеплителя не превышают 50 кПа, а касательные — 25 кПа, что говорит о линейной работе материала. В пролете панели имеются скачки напряжений, связанные с разрезкой ламелей, их величина составляет 1÷3 % от напряжений в соседних элементах.

Зависимость предельной нагрузки от длины панели и толщины слоя утеплителя приведена на рис. 6, на котором точками отмечены экспериментальные, а линиями — расчетные данные, полученные авторами.

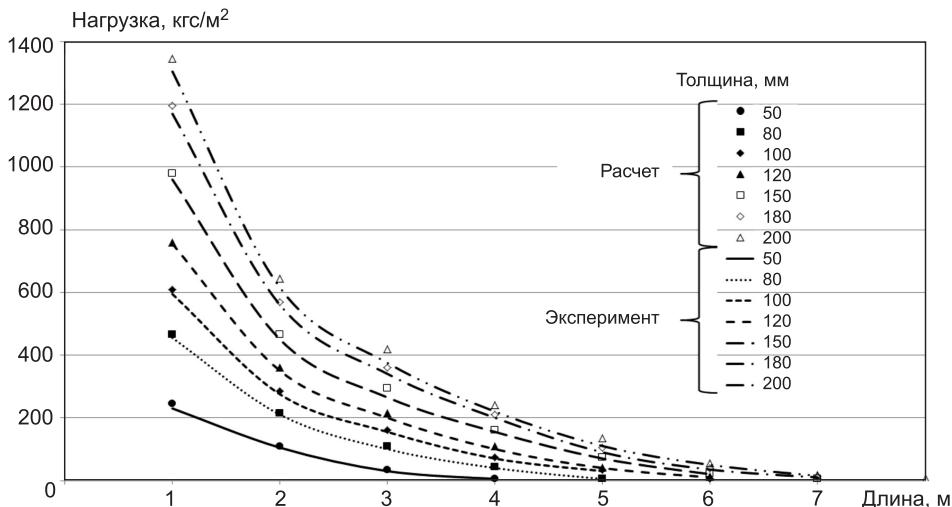


Рис. 6. Зависимость предельной нагрузки от длины панели и толщины слоя утеплителя; сравнение экспериментальных данных с расчетными

Как видно, расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными³. Некоторое расхождение с экспериментальными данными объясняется возможно тем, что расчет выполнялся без учета нелинейностей. Полученные результаты подтверждают корректность математической модели и возможности ее численной реализации в программном комплексе ANSYS.

Выводы. 1. Разработана математическая модель для определения НДС сэндвич-панелей с учетом конструктивных особенностей и дана ее численная реализация в ПК ANSYS.

2. Проведена верификация разработанной математической модели с использованием программного комплекса ANSYS. Результаты расчетов прочностных и деформативных характеристик соответствуют экспериментальным данным с точностью 1÷10 % в зависимости от геометрических параметров конструкций.

3. На основе проведенных расчетов выявлена зависимость предельной нагрузки от длины панели и толщины слоя утеплителя.

4. Разработана методика расчета сэндвич-панелей на несущую способность, на основе которой можно проводить исследования новых конструкций панелей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Александров, А.Я. Расчет трехслойных панелей [Текст] / А.Я. Александров. — М. : Оборонгиз, 1960. — 271 с.
- Штамм, К. Многослойные конструкции [Текст] / К. Штамм, Г. Витте; пер. с нем. Т.Н. Орешкиной; под ред. С.С. Кармилова. — М. : Стройиздат, 1983. — 300 с.
- Al-Kashif, M. Nonlinear Modeling and Analysis of AAC infilled Sandwich Panels for out of Plane Loads [Текст] / M. Al-Kashif, M. Abdel-Mooty, E. Fahmy, M. Abou Zeid, M. Haroun // World Academy of Science, Engineering and Technology. — 2012. — Vol. 64. — P. 597–601, <https://www.waset.org/journals/waset/v64/v64-113.pdf>
- Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред [Текст] / О. Зенкевич; пер с англ. О.П. Троицкого и С.В. Соловьева; под ред. Ю.К. Зарецкого. — М. : Недра, 1974.

³ Технический каталог продукции ООО «Термолэнд». Искитим: Термолэнд, 2009.

ДАНИЛОВ Максим Николаевич, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ФЕДОРОВА Наталья Николаевна, д-р физ.-мат. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 10.09.12

Danilov Maxim Nikolaevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Fedorova Natalya Nikolaevna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE MULTILAYER CONSTRUCTIONS

In the paper on the basis of numerical modeling in program complex ANSYS stress and strains fields in building sandwiches-panels are determinate. The procedure of numerical structural calculations on a load-carrying capacity is developed taking into account all design features. Results of the calculations are compared to experimental data on maximum permissible loadings depending on geometrical parameters of the construction.

Key words: sandwiches-panels, a finite element method, ANSYS, intense-deformed state.

REFERENCES

1. Aleksandrov, A.Ya. Calculation of multilayer constructions [Text] / A.Ya. Aleksandrov. — M. : Oborongiz, 1960. — 271 p.
2. Stamm, K. Sandwichkonstruktionen [Text] /K. Stamm, G. Witte; transl. from germ. — M. : Stroyizdat, 1983. — 300 p.
3. Al-Kashif, M. Nonlinear Modeling and Analysis of AAC infilled Sandwich Panels for out of Plane Loads [Text] /M. Al-Kashif, M. Abdel-Mooty, E. Fahmy, M. Abou Zeid, M. Haroun // World Academy of Science, Engineering and Technology. — 2012. — Vol. 64. — P. 597–601, <https://www.waset.org/journals/waset/v64/v64-113.pdf>
4. Zenkevich, O. The finite element method in engineering science [Text] / O. Zenkevich ; transl. from eng. — M. : Nedra, 1974.

УДК 69.024.8:621.791

И.К. РОДИОНОВ

**УСИЛЕНИЕ РАСТЯНУТЫХ СТЕРЖНЕЙ
СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПОКРЫТИЙ
В АСПЕКТЕ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рассмотрены вопросы напряженного состояния, развивающегося в процессе усиления (сварки) растянутых стержней стальных ферм покрытия. Приведено теоретическое обоснование рациональной сварочной технологии усиления растянутых элементов, позволяющей сваривать усиливающие и усиливаемые стержни при любых усилиях в пределах их несущей способности. Даны критерии безопасного проведения сварочных работ при усилении растянутых стержней методом увеличения сечений. Выводы теории подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: ферма, стержень, растяжение, усиление, сварка.

При реконструкции производственных зданий часто появляется необходимость увеличения несущей способности отдельных частей каркаса, в том числе и стальных стропильных ферм покрытия.

Часто и эффективно усиление таких ферм достигается увеличением сечений отдельных, наиболее напряженных, в том числе и растянутых стержней путем присоединения к ним на сварке дополнительных стержневых элементов.

В известных работах в области усиления растянутых стержней [1, 2] основное внимание уделялось работе уже усиленных элементов. Работа же в процессе усиления исследовалась значительно меньше. В частности, не исследовалось влияние на работу растянутых стержней технологических параметров сварки, таких как ток, напряжение, скорость и особенно порядок наплавки швов.

В данной статье приводятся некоторые результаты исследований напряженно-деформированного состояния растянутых стержней в процессе их усиления методом увеличения сечения. Целью их являлась разработка рациональной сварочной технологии усиления высоконапряженных растянутых элементов стальных уголковых ферм, а также выявление критериев определения предельно допустимой при усилении нагрузки.

Общий подход к решению проиллюстрируем на конкретном примере усиления. Основной стержень примем в виде полосы с пластинами по концам, имитирующими фасонки ферм. Элемент усиления примем также полосовой, с присоединением к основному на сварке втавр (рис. 1).

Несущая способность растянутых стержней определяется прочностью в пределах упругой работы. В процессе усиления важнейшим моментом являются их тепловые ослабления: выпадение из работы частей сечений, разогретых выше температуры, при которой сталь перестает сопротивляться деформациям. Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей в качестве такой температуры принята $T = 600^{\circ}\text{C}$.

Решая вопрос о порядке наплавки швов, можно заметить, что все возможные (предлагаемые в разных источниках) технологии присоединения

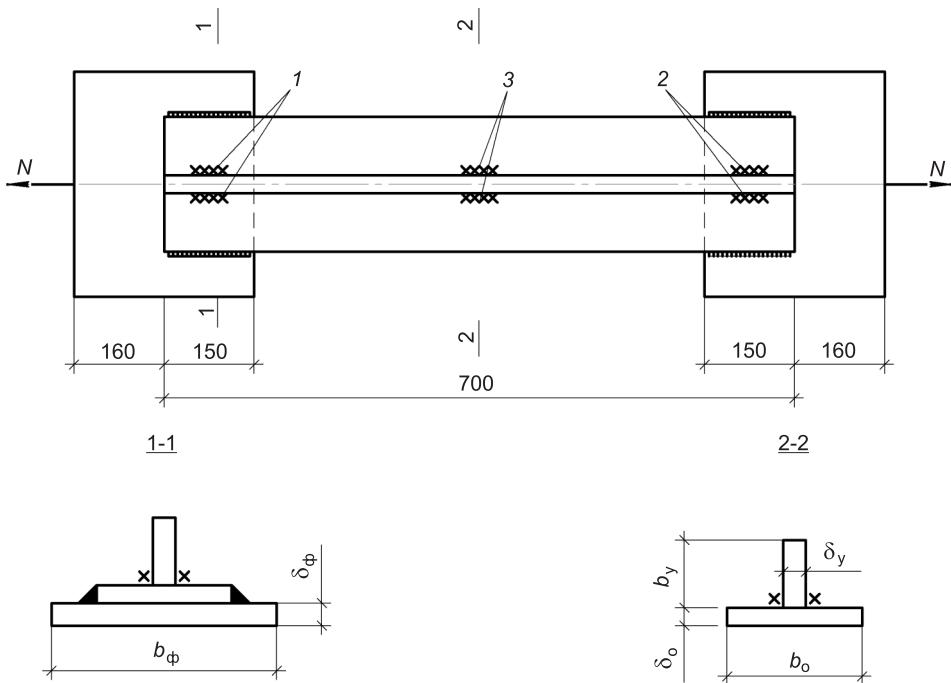


Рис. 1. К вопросу о порядке наплавки сварных швов

элементов усиления можно свести к двум основным, принципиально разным технологическим схемам:

1-я с наплавкой первоначально сварных швов поз. 3, а затем швов поз. 1 и 2 по концам усиливающего элемента;

2-я, наоборот, с первоначальной наплавкой швов поз. 1 и 2 по концам основного стержня (в пределах фасонок) и последующим нанесением швов поз. 3.

Рассмотрим влияние каждой технологии на напряженное состояние усиливаемого стержня.

При усилении по первой технологической схеме первоначальная наплавка швов поз. 3 приводит к появлению теплового ослабления основного стержня и, таким образом, уменьшению его несущей способности. Элемент усиления еще не работает, лишь забирает часть тепловой мощности; совместная работа обоих стержней достигается лишь наплавкой швов по концам.

Отсюда условие обеспечения несущей способности стержня в процессе усиления (сварки) следует рассматривать по сечению 2-2:

$$(A_o - A_{o}^{cb})\sigma_t^0 \geq N, \quad (1)$$

где N — усилие, действующее в основном стержне;

σ_t^0 — предел текучести материала основного стержня;

A_o — площадь сечения основного стержня;

A_{o}^{cb} — площадь теплового ослабления сечения основного стержня.

При усилении по второй технологической схеме наплавка швов поз. 1 и 2 приводит к тепловому ослаблению основного стержня, но оно может быть компенсировано сечениями фасонок; при последующей наплавке швов поз. 3 (после остывания швов поз. 1 и 2) основной и усиливающий элементы получают ослабление, но работают совместно.

В этой связи несущую способность усиливаемого стержня в данном случае необходимо рассматривать по сечениям 1–1 и 2–2 (см. рис. 1). Выразим условие обеспечения несущей способности усиливаемого стержня по сечению 1–1:

$$(A_o - A_{o}^{cb})\sigma_t^o + A_{\phi}\sigma_t^{\phi} \geq N, \quad (2)$$

где σ_t^{ϕ} — предел текучести материала фасонок;

A_{ϕ} — минимальная площадь сечения фасонок (см. рис. 1, сеч. 1–1).

Условие обеспечения несущей способности усиливаемого стержня по сечению 2–2 будет иметь вид:

$$(A_o - A_{y}^{cb})\sigma_t^o + (A_y - A_{y}^{cb})\sigma_t^y \geq N, \quad (3)$$

где σ_t^y — предел текучести материала элемента усиления;

A_y — площадь сечения элемента усиления;

A_{y}^{cb} — площадь ослабления сваркой сечения элемента усиления.

Задача теплового ослабления стержней решалась с помощью теории распространения тепла при сварке академика Н.Н. Рыкалина, согласно которой температуру каждой точки можно определить с достаточной для инженерных расчетов точностью по схеме подвижного линейного источника постоянной погонной мощности q_n

$$T(y, t) = \frac{q_n}{\delta \sqrt{4\pi \lambda c \gamma t}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4at}}, \quad (4)$$

где δ — толщина полосы;

a — коэффициент теплоотдачи;

c — удельная массовая теплоемкость;

γ — объемная плотность материала;

λ — коэффициент теплопроводности.

Определим величину погонной тепловой мощности сварки q_n :

$$q_n = \frac{0,24\eta UJ}{V}, \quad (5)$$

где η — эффективный КПД процесса нагрева (при сварке металлическими электродами $\eta = 0,7-0,8$);

U — падение напряжения на дуге;

J — сварочный ток;

V — скорость сварки.

Таким образом, в конкретный момент времени t разогрев элемента будет определяться соответствующим распределением изотерм. Ослабленной, т.е. выпавшей из работы, было принято считать часть сечения, нагретую выше температуры $T = 600^{\circ}\text{C}$. Была разработана методика, позволяющая определять площади сечений, ослабленных сваркой, в зависимости от погонного тепловложения, толщин свариваемых элементов, схем их соединения. В частности, для соединения втавр (рис. 2) площади теплового ослабления сечений основного и усиливающего элементов определяются соответственно как $A_o^{cb} = 2Y_{\max}^o \delta_o$ и $A_y^{cb} = Y_{\max}^y \delta_y$, где δ_o , δ_y — толщины основного и усиливающего элементов; $2Y_{\max}^o$ и Y_{\max}^y — максимальная ширина « пятен » их теплового ослабления.

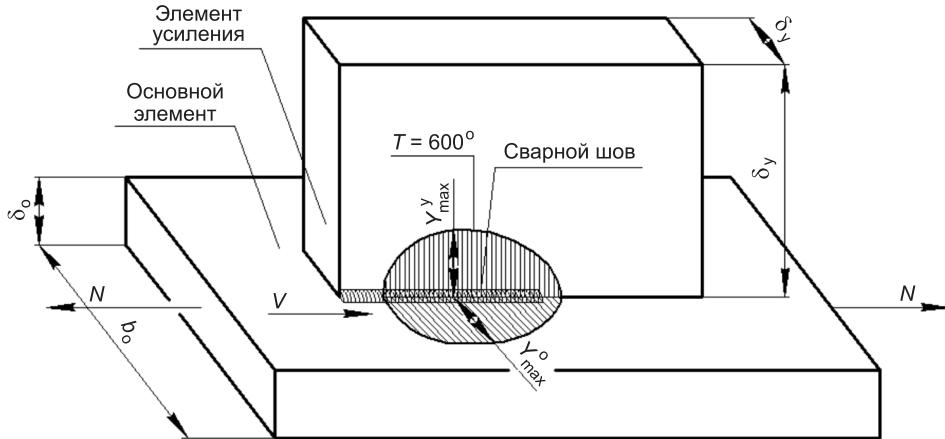


Рис. 2. К вопросу теплового ослабления сечений стержней при усилении

Были получены выражения для определения величин Y_{\max}^o и Y_{\max}^y . Для рассматриваемого соединения элементов вварв они имеют вид:

$$Y_{\max}^o = \frac{q_{\pi}^o}{3200\delta_o}, \quad (6)$$

$$Y_{\max}^y = \frac{q_{\pi}^y}{3200\delta_y}, \quad (7)$$

где q_{π}^o , q_{π}^y — доли погонного тепловложения q_{π} , приходящиеся соответственно на основной и усиливающий стержни; определяются в зависимости от типа соединения и толщин свариваемых элементов.

Рассмотрим теперь неравенства (1–3) с позиции назначения предельно допустимой при усилении нагрузки. Для этого произведем преобразования, введя в неравенства выражение несущей способности основного стержня до усиления $[N] = \sigma_t^o A_o$.

Неравенство (1) в этом случае примет вид:

$$[N](1 - A_o^{cb} / A_o) \geq N. \quad (8)$$

Выражение $1 - A_o^{cb} / A_o < 1$. Таким образом, рассматривая неравенство (8), можно сделать вывод, что усиление растянутого стержня в случае наплавки соединительных швов сначала между фасонками с последующим соединением концов основного и усиливающего стержней возможно лишь при усилии в нем N , находящемся в пределах определенной доли несущей способности, т.е. $N \leq K[N]$, где $K = 1 - A_o^{cb} / A_o$, $0 \leq K < 1$ зависит от погонного тепловложения при сварке, геометрических размеров сечений элементов, схем их соединения.

Неравенства (2) и (3) в результате преобразований примут вид соответственно (9) и (10), т.е.

$$N \leq [N] + (A_{\phi} \sigma_t^{\phi} - A_o^{cb} \sigma_t^o), \quad (9)$$

$$N \leq [N] + (A_y \sigma_t^y - A_y^{cb} \sigma_t^y - A_o^{cb} \sigma_t^o). \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) определяют критерии возможности проведения усиления растянутых стержней по 2-й технологической схеме, т.е. с со-

единением сначала концов основного и усиливающего стержней наплавкой швов в пределах фасонок с последующим нанесением остальных соединительных швов.

Можно заметить, что в данном случае возможно проведение усиления практически при усилии в стержне, равном его несущей способности. Для этого необходимо выполнение двух условий:

$$A_o^{\text{cb}} \sigma_t^o \leq A_\phi \sigma_t^\phi, \quad (11)$$

$$A_o^{\text{cb}} \sigma_t^o \leq (A_y - A_y^{\text{cb}}) \sigma_t^y, \quad (12)$$

т.е. ослабление сваркой основного стержня должно быть компенсировано, во-первых, сечениями фасонок и, во-вторых, неразогретой (выше 600 °C) частью сечения элемента усиления.

Приведенные выше теоретические результаты были проверены экспериментально на натурных стержнях (см. рис. 1). Усиление стержней проводилось по 2-й технологической схеме при нагрузках, вызывающих усилия, абсолютно близкие к нормативным (определенным по пределу текучести) значениям несущей способности. Стержни (18 шт.) были поделены на две равные группы. При испытании стержней 1-й группы сварка выполнялась на режимах, при которых по теории (формулы 11, 12) должна была обеспечиваться (на пределе) их несущая способность. Образцы 2-й группы усиливались при более высоких величинах погонной тепловой энергии. По теории они должны были «потечь» при наплавке промежуточных швов (см. рис. 1, поз. 3).

Усиливающий элемент приваривался втавр (см. рис. 1) сварными швами катетом 5–6 мм в трех сечениях по длине основного образца: в двух сечениях по концам (швы 1 и 2) в пределах фасонок и в одном промежуточном сечении (шов 3) длиной 50 мм. Швы выполнялись ручной сваркой электродами типа Э-42 диаметром 4 мм. В процессе сварки с помощью электроклещей Ц-91 (500 А, 600 В) наблюдалась падение напряжения, контролировалась также скорость сварки. Изменением этих трех компонентов производилась регулировка степени теплового ослабления сечений. Нагрузка P и деформации удлинения Δl снимались по показаниям регистрирующей аппаратуры машины растяжения МР-500.

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения продольных деформаций двух образцов (1-й и 2-й групп) в процессе их нагружения и усиления до потери несущей способности. Оба образца (размеры сечений, $b_o \times \delta_o = 90 \times 4$ мм, см. рис. 1) нагружались до текучести (0–1). Далее нагрузка

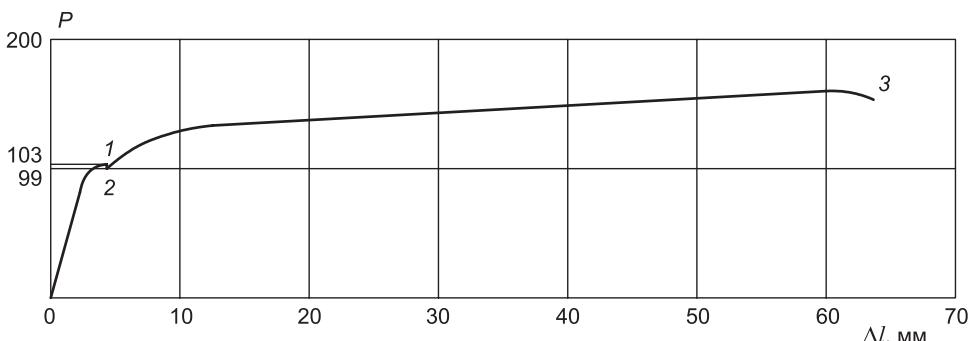


Рис. 3. Работа одного из стержней 1-й группы

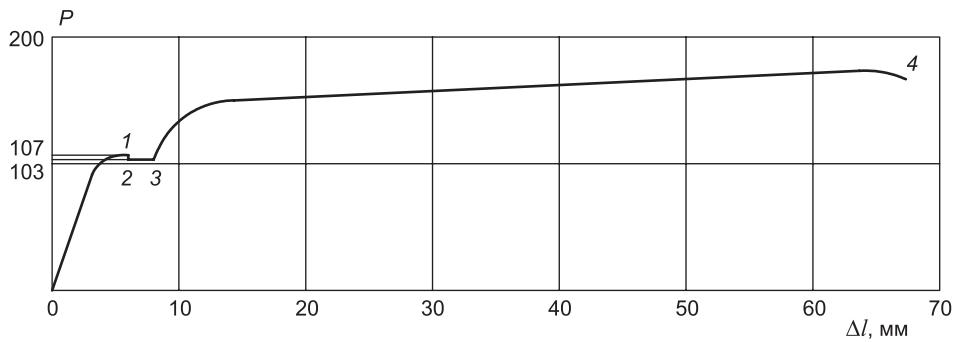


Рис. 4. Работа одного из стержней 2-й группы

немного сбрасывалась до стабилизации стержней (1–2) и производилось присоединение элементов усиления (размеры сечений, $b_y \times \delta_y = 30 \times 4$ мм, рис. 1) наплавкой соединительных швов сначала по концам в пределах фасонок, затем промежуточных.

Рассмотрим график работы стержня 1-й группы. Как видно из графика, стержень сначала работал упруго, затем упругопластически и, наконец, при нагрузке, равной 103 кН, была отмечена текучесть металла (точка 1 графика). Нагрузка была понижена ($P = 99$ кН) до прекращения текучести (точка 2 графика). При данной нагрузке производилось присоединение на сварке дополнительного элемента. Режим сварки при усилении характеризовался в среднем следующими параметрами: ток — 150 А, падение напряжения — 20 В, скорость — 13,2 см/мин, что соответствует погонному тепловложению $q_n = 10\ 272$ Дж/см. По предварительно сделанному расчету тепловые ослабления сечения стержня в местах сварки (т.е. по сечениям 1–1, 2–2 и 3–3, рис. 1) компенсировались соответственно сечениями фасонок и элемента усиления. Аналитически определенные значения несущей способности стержня по сечениям 1–1, 2–2 и 3–3 составляли соответственно 207, 207 и 101 кН, что больше усилия в стержне в момент усиления, равного 99 кН. Расчет производился с учетом предварительно определенных значений пределов текучести металла основного, усиливающего элемента и фасонок, которые были равны соответственно 274, 262 и 268 МПа.

Из графика (см. рис. 3) видно, что эксперимент подтвердил теорию: в процессе усиления (сварки) развитие продольных деформаций (текучести) не отмечалось при наплавке и концевых, и промежуточных швов (точка 2 графика).

Потеря несущей способности носила выраженный характер потери прочности при внеклентренном растяжении. Среза сварных швов отмечено не было.

Описанная работа данного образца характерна для всех стержней первой группы.

Работа образца 2-й группы характеризовалась следующим: нагрузка, при которой отмечалась текучесть материала основного элемента, составила 107 кН; стержень стабилизировался при нагрузке 103 кН. При данной нагрузке производилось присоединение на сварке элемента усиления. Параметры режима сварки были в среднем следующие: ток — 153 А, падение напряжения — 20 В, скорость — 12 см/мин; погонное тепловложение $q_n = 11\ 528$ Дж/см, что больше $q_n = 10\ 272$ Дж/см для образца 1-й группы. Предварительно определенные значения пределов текучести составляли: 268 МПа — для фасонок, 278 МПа — для элемента усиления.

ния и 284 МПа — для основного стержня. Как видно из графика, изменения деформаций (рис. 4) в процессе наплавки швов по концам стержня в пределах фасонок продольных деформаций не наблюдалось; стержень начал удлиняться практически с начала наплавки промежуточного шва (площадка текучести точки 2–3 графика), причем удлинение прекращалось практически через 10...20 с после остановки сварочного процесса.

Оценивая эти результаты, можно отметить, что характер работы стержня в процессе усиления в целом соответствовал теоретическим предпосылкам. Несущая способность стержня по сечению 3–3 (см. рис. 1), определенная теоретически, составила 99,6 кН, что было меньше усилия в момент усиления (103 кН). Расчеты производились с учетом предварительно определенных величин пределов текучести основного и усиливающих элементов, которые были равны соответственно 274 и 280 МПа. Стержень потек в момент наплавки промежуточного шва, так как сечение элемента усиления не компенсировало ослабления сваркой основного стержня. Таким образом, теоретически был определен и экспериментально получил подтверждение факт потери несущей способности стержня непосредственно в процессе усиления при заданных режимах сварки и принятом сечении усиливающего элемента.

Остановка роста продольных деформаций стержня после прекращения наплавки промежуточного шва объясняется быстрым остыванием металла и, таким образом, резким уменьшением « пятна » теплового ослабления сечения.

Таким образом, полученные экспериментально результаты подтвердили теоретические обоснования, что дало возможность сделать следующие выводы.

1. В результате проведенных исследований получены две классификации уровней напряженно-деформированного состояния растянутых стержней ферм, методики расчета которых дают возможность оценить безопасность выполнения сварочных работ при их усиении в зависимости от усилий, режимов сварки, геометрических и прочностных характеристик свариваемых элементов.

2. Усиление растянутых стержней стальных сварных ферм со стержнями из парных уголков возможно при полной для них расчетной нагрузке. Для этого необходимо применение порядка наплавки связующих швов сначала по концам (в пределах фасонок) и только затем, после их остывания, в промежуточных сечениях, а также применение режимов сварки, при которых величина теплового ослабления сечений усиливаемых стержней компенсируется сечениями фасонок и неразогретыми (выше 600 °C) частями сечений элементов усиления.

3. В случае применения порядка сварки с первоначальной наплавкой связующих швов по концам стержней и известных сечениях элементов усиления, безопасные режимы сварки при усилении растянутых уголковых стержней ферм вполне могут быть определены по предлагаемой методике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Десятов, Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.И. Десятов. — М. : МИСИ, 1968.
2. Кизингер, Р. Исследование напряженного состояния растянутых стержней металлических ферм при их усилении под нагрузкой [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. Кизингер. — М. : МИСИ, 1973.

*РОДИОНОВ Игорь Константинович, канд. техн. наук, доц.
Тольяттинский государственный университет*

Получено после доработки 11.09.12

Rodionov Igor Konstantinovich, candidate of technical sciences, assistant professor,
Togliatti State University, Russia

THE STRENGTHENING OF STRETCHING BARS OF STEEL COVER TRUSSES IN ASPECTS OF WELDING TECHNOLOGIES

The questions of stressing state, developing in the process of strengthening bars of steel cover trusses, are considered. Theoretical basis of rational welding strengthen stretching element's technology, that permits bars welding under total calculation loading, is illustrated. The criterions of welding works safety under strengthen stretching elements by methods of increasing section's are given. The theoretical conclusions are confirmed experimentally.

Key words: farm, rod, stretching, strengthening, welding.

REFERENCES

1. Desyatov, B.I. The study amplifies the work load elements welded governmental steel trusses [Text] : Thesis. ... candidate of technical sciences / B.I. Desyatov. — M. : MISI, 1968.
 2. Kiesinger, R. Investigation of the stressed state of stretched metal rods metallic her farm when they gain under load [Text] : Thesis. ... candidate of technical sciences / R. Kiesinger. — M. : MISI, 1973.
-

УДК 691.001

А.Н. ХАРХАРДИН, В.В. СТРОКОВА, М.И. КОЖУХОВА

КРИТИЧЕСКИЙ РАЗМЕР МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ, ПРИ КОТОРОМ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ИХ НЕОБЫЧНЫЕ СВОЙСТВА

Получено уравнение для минимального линейного размера сосуда с зернистым (дисперсным) материалом, для контрольного размера образцов из композиционных материалов из условия проявления масштабного (пристеночного) фактора, а также выражения для наибольшего и среднего размера микро- и наночастиц, при котором начинают проявляться их необычные свойства по сравнению с массивным телом.

Ключевые слова: дисперсные материалы, микро- и наночастицы, критический размер.

Современное развитие исследований вещества в области нанометрового (1–100 нм) диапазона размеров его кластерных образований, нано- и микрочастиц и других нанообъектов несомненно связано с использованием в расчетах известных физических законов.

Немаловажную роль в объяснении необычных свойств получаемых материалов может оказать структурная топология дискретных систем. Математический аппарат ее исследований, основанный на корпускулярно-геометрических свойствах дискретных систем, состоит в основном из некоторых базовых закономерностей. Основная из них — закономерность дискретного распределения элементов дискретности (атомов, молекул, шаров, нано-, микро- или макрочастиц и пр.) по размерам при плотной случайной (произвольной) упаковке в системе:

$$\frac{d_n}{d_1} = \left(\frac{1}{10\eta_1(\sqrt{3}-1)^p} \right)^{\frac{m(n-1)}{3}}, \quad (1)$$

где d_1 , d_n — диаметр наибольших идентичных элементов дискретности (частиц) и последовательно меньшего размера соответственно; m — класс системы прерывности в их средних размерах, $0 \leq m < 12..15..$; p — степень разъединения ($p > 3$) и перекрывания ($p < 3$) проникающих идентичных элементов дискретности (атомов, шаров, частиц); $n = 1, 2, 3..$ — порядковый номер частиц (шаров) последовательно меньшего размера, заполняющих соответствующие пустоты в упаковке.

Из этой закономерности вытекают плотности упаковки микрочастиц при критическом состоянии (агрегировании) измельченных материалов сухим и мокрым способом [1], а также сфер трехмерных колебаний (межмолекулярного взаимодействия) легких атомов в λ -точке и в области низкотемпературного состояния вещества (гелия и других инертных газов). Так, при $m = 3$, $n = 2$, $p = 0$; 3 и $p = 6$ из выражения (1) получим первую критическую $\eta_{c1} \leq 0,2549$, вторую критическую $\eta_{c2} \leq 0,1$ и теоретическую

плотность случайной (произвольной) упаковки идентичных шаров $\eta_1 = 0,67976$ соответственно.

Из этого выражения вытекает также уравнение для размерного (пристеночного) фактора дискретных систем, который зависит от отношения количества атомов (частиц) в поверхностных слоях к общему или остальному числу атомов. К поверхностным относятся элементы дискретности (частицы), расположенные в двух и более рыхлых поверхностных слоях кластеров, агрегаций микрочастиц либо в пристеночных слоях объема дисперсного или зернистого материала в сосуде. С уменьшением размера объемной консолидации дискретной системы возрастает число поверхностных частиц (атомов), а плотность их упаковки снижается и всегда остается меньше плотности упаковки объемных элементов. Это влияет на ряд физических свойств малых частиц [2].

Распишем общую закономерность распределения элементов дискретности (либо пустот в этом распределении, последовательно плотно заполняемых шарами соответствующего размера) по относительным размерам для монодисперсного слоя шаров и пустот между ними в развернутом виде (при $m = 3$ и $p = 3$):

$$\frac{d_n}{d_1} = 1; \quad \frac{2,549}{10\eta_1}; \quad \left(\frac{2,549}{10\eta_1}\right)^2; \quad \left(\frac{2,549}{10\eta_1}\right)^3; \quad \left(\frac{2,549}{10\eta_1}\right)^4. \quad (2)$$

Топологический размерный фактор определим из этого распределения отношением относительного размера наибольших пустот (второй член — $n = 2$) к относительному размеру шаров (пятый член — $n = 5$), заполняющих эти пустоты с такой же плотностью упаковки, как сосуд большого объема. При этом размер и форма этих пустот не влияют на плотность упаковки в них шаров (частиц) меньшего размера. Это будет ядро из наименьшего числа шаров (частиц) в любой области их монодисперсного слоя, когда плотность упаковки в поверхностных слоях сравнима с плотностью упаковки шаров в центральных слоях. Большая доля из них в изолированном ядре является поверхностной:

$$\frac{D}{d} \geq \frac{2,549}{10\eta_1} d_1 \sqrt[4]{\left(\frac{2,549}{10\eta_1}\right)^4 d_1 \left(\frac{10\eta_1}{2,549}\right)^3} \geq 60,38\eta_1^3, \quad (3)$$

где D — диаметр атомных кластеров, агрегаций микро- или наночастиц дисперсных материалов, новообразований критического размера и пр.; d_n — диаметр элементов дискретности (атома, микро- или наночастиц) простых веществ, наибольший линейный размер элементарной кристаллической ячейки сложных веществ.

Из выражения (3) при $\eta_1 = 0,64976$ — при действии слабых сил притяжения и $\eta_1 = 0,634054$ — при действии сил отталкивания между элементами дискретности (микрочастиц дисперсных материалов) получим соответственно: $D = 16,56..15,4d$, а при $\eta_1 = 0,2549$ — критическое состояние фазы, $D = d$. Выражение (3) определяет размер образцов из композиционных материалов и сосудов (аппаратов) с зернистым слоем в аэро- и гидродинамике при отсутствии масштабного влияния на их физико-механические и другие свойства. Размерный (масштабный) фактор хорошо подтверждается экспериментальными исследованиями плотности бимодальных упаковок шаров и зерен зернистых материалов.

Так как $\eta_1^{3 \dots 10/3} = \eta_{c1}$ — первая критическая плотность упаковки макро- и микрочастиц данного вещества, а $\eta_{c1} = \eta_2^{(4 \dots 16/3)}$ — вторая критическая плотность упаковки атомов, молекул и наночастиц простых и сложных веществ, то выражение для среднего критического размера наночастиц будет иметь вид:

$$D \leq 60,38\eta_{c1}d \leq 60,38\eta_1^{n/3}d, \quad (4)$$

где $n = (0 - 3 - 6) - 9 - 16$.

Здесь $n = 9 - 10$ при $0,6038 \leq \eta_1 \leq 0,64976$ — для критических размеров частиц дисперсных материалов;

$$n = 11 - 13 \text{ при } 0,6802 \leq \eta_1 \leq 0,6981 \text{ и } n = 14 - 16$$

при $0,6981 < \eta_1 \leq 0,7405$ — для наночастиц кристаллических веществ.

Размеры растущих сферических кристаллических образований, в том числе и критические размеры в интервале перехода возможной перестройки их структуры к ограненной форме кристаллов, получим из частного выражения (2) в общем виде:

$$D = 60,38^{n/3} \eta_1^n d = (3,923\eta_1)^n d, \quad (5)$$

где $n = 0, 1, 2, 3 - 6 - 9 - 12 - 15$

$$\text{либо } D = (10\eta_1 / 2,549)^{\frac{m}{3}} d = (3,923\eta_1)^{\frac{m}{3}} d,$$

где $m \geq 0, 1, 2, 3 \dots$; $n = 1, 2, 3 \dots$.

Результаты расчета по уравнению (4) среднего критического размера наночастиц в интервале проявления их необычных свойств по сравнению с массивным телом, а также размеров растущих сферических образований (5) в зависимости от плотности упаковки в них элементов дискретности (атомов металлов и других простых веществ) приведены в таблице.

**Размер растущих кристаллов сферической и ограненной формы
и критический размер микро- и наночастиц в интервале проявления
их необычных свойств**

Показатель степени, n	Наибольший размер микрочастиц $D \times d$ при η_1		Показатель степени, n	Средний размер микро- и наночастиц $D \times d$ с плотностью упаковки в них элементов структуры, η_1				
	0,7405	при $d = 0,3 \text{ нм}$		0,7405	при $d = 0,3 \text{ нм}$	0,7405	0,6403	0,63096
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	1	0,3 нм	0	60–67	18–20 нм	1,0–1,1	60,4–70,0	60,4–70,4
6	2,46	0,74 нм	1	44,7–49,4	13,4–14,8 нм	2,9–3,21	38,6–44,8	38,1–44,4
9	6	1,8 нм	2	33,1–36,6	9,9–11 нм	8,44–9,33	24,8–28,0	24,0–28,0
12	14,9	4,5 нм	3	24,5–27,0	7,0–9,0 нм	24,5–27,0	15,8–18,3	15,2–17,7
15	36,8	11 нм	4	18,2–20	5,5–6,0 нм	71,2–78,7	10,0–11,6	9,6–11,1
18	90,6	27 нм	5	13,4–14,8	4,0–4,5 нм	206–228	6,5–8,9	6,0–7,0
21	223	67 нм	6	10,0–11,0	3,0–3,3 нм	601–664	4,0–4,6	3,8–4,4
24	550	165 нм	7	7,4–8,2	2,2–2,5 нм	1745–1929	2,7–3,1	2,4–2,8
25	742	223 нм	8	5,5–6,0	1,7–1,8 нм	5071–5605	—	—
26	1003	301 нм	9	4,0–4,4	1,2–1,3 нм	рост	—	—
—	—	—	10	3,0–3,3	0,9–1,0 нм	рост	—	—

Примечание. В столбцах 2, 3 — результаты расчетов по формуле (11), в 5, 6, 8, 9 — по формуле (5), а в столбце 7 — по формуле (6).

Из таблицы и уравнения (4) следует, что наибольший средний размер наночастиц, при котором начинают проявляться их необычные свойства, соответствует значению $n \geq 0$, при $n = 0$ он будет равен $D = 60,4d$. Например, при $d \approx 0,3$ нм (для металлов) получим $D = 18$ нм, а при $\eta_l = 0,7405$ и $n = 9, 15, 16$ получим $D = 7,3; 4; 3,65$ нм. Для дисперсных материалов при $d = 0,1$ мкм получим $D = 6,4 - 6,0$ мкм, а при $\eta_l = 0,64 - 0,60$ и $n = 9$ средний критический размер микрочастиц $D = 1,6 - 1,3$ мкм соответственно. Принимая по литературным данным размер мономера силикатного иона кремнезема (тетраэдра) $d = 0,324$ нм, размер наночастиц свежеприготовленного геля, если $\eta_c \leq 0,7405^{3..5}$, будет равен $8 - 4$ нм, что хорошо согласуется с экспериментом [3]. Следовательно, плотность упаковки моносиликатных ионов в наночастицах кремнезоля $\eta_l \geq 0,7405$, а размер устойчивых его агрегаций при $d = 6$ нм будет равен $D_1 \leq 60,377\eta_l^{3..10/3} \cdot 6$ нм = $147..133$ нм. Размер наночастиц кварца, имеющего размеры кристаллической ячейки $a = 0,49$ нм, $b = 0,49$ и $c = 0,54$ нм и $\eta_l \leq 0,76$, равен $D \leq 60,377 \cdot 0,76^{4..5} \cdot 0,54$ нм $\leq 11..8$ нм. Из таблицы также следует, что средний критический размер кристаллических наночастиц находится в пределах $7 - 9 - 18 - 20$ нм. Для микрочастиц он равен соответственно $(15,8 - 18,3)d$ при $\eta_l = 0,6403$, а наибольшие их размеры — $(60,4 - 70,0)d$ и $(60,4 - 70,4)d$. Для перестройки формы растущих сферических кристаллов в ограниченную форму при подходящих термодинамических условиях средний критический размер будет равен $(24,5 - 27)d$, а наибольший $(60 - 67)d$.

Так как в знаменателе выражений (2, 3) стоят десятикратные значения критической плотности случайной упаковки микрочастиц дисперсных материалов, то для перехода к кристаллическим микро- и нанообъектам с атомно-шероховатой поверхностью эти уравнения можно записать в ином виде:

$$D \leq (\eta_l / \eta_{cl})^3 d \leq \left(\frac{1}{\eta_{cl} / \eta_l} \right)^3 d \leq \left(\frac{1}{\eta_l^{n/3-1}} \right)^3 d \leq \frac{d}{\eta_l^{m(n/3-1)}}, \quad (6)$$

где $m = 3..4$, $n = 9..10$ — для минеральных дисперсных материалов, $n = 11..16$ — для металлов.

Из первой части выражения (6) для плотнейших упаковок атомов в кристаллической фазе ($\eta_l \leq 0,7405$) наночастиц при $m = 3$, $n = 3..4$ и $\eta_c = 0,2549$ приходим к результатам, получаемым из уравнений (3) и (4): $D = 24,5...71d$. Принимая примерное значение размера атома металлов $d = 0,3$ нм, получим $D = 7...21$ нм. Совпадающие результаты подтверждают тождественность выражений (4 – 7), а при $\eta_c \leq 0,2549$ и процессов образования наночастиц, протекающих через стадию случайной упаковки атомов в скоплениях (жидкой фазы), и сборки их в кластеры и микрокристаллы. Из первой и последней части выражения (7) при $\eta_l \leq 0,7405$, $m = 3$ и $n = 15..16$ получим уточненный результат $D = 36,8..49,7d = 11..15$ нм, а при $\eta_l = 0,64$, $m = 3$ и $n = 9, 10$ имеем

$$D = 14,5..22,7d = 4,4..6,8 \text{ нм.}$$

Выражения (4, 5) с учетом плотности регулярной укладки и случайной упаковки η элементов структуры в плоскости центрального сечения

сферических агрегаций, кристаллов и других структурных образований для различных упаковок примут вид

$$D \leq z^n d / \eta^{1/3}. \quad (7)$$

Показатель z в уравнении (7) зависит от плотности упаковки η_1 и принимает численные значения количества элементов дискретности вещества, расположенных на диагонали в плоскости центрального сечения координатного многогранника или элементарного сферического агрегата:

$$D \leq (3,923\eta_1)^n d / \eta^{1/3} \quad (8)$$

либо

$$D \leq 60,377\eta_1^n d / \eta^{1/3} \leq 60,377\eta_1^{(3n-1)/3} d. \quad (9)$$

Из таблицы и выражения (5) видно, что при $n = 1$ и $\eta_1 = 0,6802...0,7405$ атомная агрегация состоит из одного поверхностного слоя атомов. Размер центральной пустоты в икосаэдрической структуре атомов, контактирующих между собой при отсутствии центрального, равен $0,9d$. Так закладываются вакансии в кристаллах и рост сферических агрегаций. Это один из возможных путей зарождения вакансий в малых кристаллах.

Средние критические размеры наночастиц с атомно-шероховатой поверхностью для случайной упаковки ($\eta_1 \leq 0,64976$) и плотнейших укладок ($\eta_1^5 \leq \eta_{cl} \leq \eta_1^{16/3} = 0,74048^5 \leq \eta_{cl} \leq 0,74048^{16/3} = 0,2226 \leq \eta_{cl} \leq 0,2014$) с гексагональной ($\eta_{cl} \geq 0,215633$), кубической ($\eta_{cl} = 0,21039$) и с икосаэдрической ($\eta_{cl} = 0,21832$) укладкой атомов согласно формуле (7) при $d = 0,3$ нм и $m = 3...4$ будут равны:

$$D \leq (0,64976 / 0,2549)^{3..4} d, \quad 16,56d \leq D \leq 42,22d, \quad 5 \leq D \leq 13 \text{ нм};$$

$$D \leq (0,64976 / 0,64976^{10/3})^{3..4} d \leq 20..56 \cdot d \leq 6..17 \text{ нм};$$

$$D = \left(\frac{0,74048}{0,21563...0,21039} \right)^3 d = 40..44 \text{ } d = 12..13 \text{ нм};$$

$$D \leq \left(\frac{0,74048}{0,21563...0,21039} \right)^4 d = 139..153 \text{ } d = 42..46 \text{ нм};$$

$$D = (0,68834 / 0,21832)^{(3..4)} d = 31..88 d = 31..99 d = 9,4..29,6 \text{ нм};$$

$$D = (0,68834 / 0,68834^4)^{(3..4)} d = (0,68834 / 0,2245)^{(3..4)} d = 28,8..88 \\ d = 8,6..26,5 \text{ нм}.$$

Из выражения (7) при $n = 1$, $\eta_1 = 0,74048$ и $\eta \leq 0,9069$ образуются гексагональная и кубическая плотнейшие упаковки атомов, а также икосаэдрическая ($\eta_1 \leq 0,68834$). В первых двух упаковках на поверхности центрального атома формируются перманентные группы из трех и четырех атомов, контактируемых между собой и с центральным атомом — все 12 атомов поверхностные. В икосаэдрической упаковке все 12 поверхностных атомов разъединены между собой и контактируют только с центральным. Это способствует росту сферических микрочастиц с икосаэдрической укладкой атомов для выполнения первого принципа формирования структуры из переохлажденных расплавов. Первоначально пониженная плотность упаковки атомов в сборке сферических (икосаэдрических) кластерных образований по сравнению с их укладкой в массивном кристаллическом теле приводит к снижению прочности связи между ними и повышению подвижности в результате превалирующего кулоновского вза-

модействия. Силы кулоновского межатомного отталкивания регулируют однородность распределения поверхностных атомов вокруг центрального. При достижении определенного размера и наибольшей плотности упаковки атомов в сборке вступает в силу квантово-механическое взаимодействие с повышенной прочностью связи с центральным атомом и с соседними атомами в их объединении. Поэтому в природе наряду с кристаллами ограннной формы встречаются в несколько меньшем количестве и кристаллы сферической формы при определенных термодинамических условиях, концентрации и скорости подхода атомов или ионов к твердофазной поверхности.

Условием формирования наибольшего критического размера микрочастиц, когда начинают проявляться их необычные свойства, в частности с атомно-шероховатой поверхностью, согласно уравнению (6) при каноническом значении второй критической плотности упаковки поверхностных атомов металлов и минеральных дисперсных материалов $\eta_{c2} = 0,1$, по аналогии с выражениями (2, 3), является:

$$\frac{D}{d} \leq \left(\frac{10\eta_1}{10\eta_{c2}} \right)^3 \leq \left(\frac{10\eta_1}{10 \cdot 0,1} \right)^3 \leq 1000\eta_1^3. \quad (10)$$

Из этого выражения критический размер микрочастиц при $\eta_1 = 0,6403$ и $d = 0,3$ нм будет равен $D \leq 262d \leq 78$ нм, при $\eta_1 \leq 0,68834$ $D \leq 326d \leq 98$ нм, а при $\eta_1 \leq 0,7405$ $D \leq 407d \leq 122$ нм. Допуская, что величина второй критической плотности упаковки поверхностных атомов находится в пределах индекса амплитуды плотности случайной упаковки шаров $0,1 \leq \eta_{c2} \leq 0,1076$, выражение (10) для интервала наибольшего размера микрочастиц можно записать в виде

$$D \leq (\eta_1 / \eta_{c2})^3 d \leq \left(\frac{1}{\eta_1^{(n/3-1)}} \right)^3 d, \quad (11)$$

где $n = 18$ — при $\eta_1 \leq 0,64029$, $n = 18-21$ — при $\eta_1 = 0,6802...0,68834$, $n = 19-22$ — при $\eta_1 = 0,6981$ и $n = 25-26$ — при $\eta_1 = 0,7405$. Согласно этим данным при $d = 0,3$ нм из выражений (10, 11) получим интервалы наибольших размеров нано- и микрочастиц соответственно (см. таблицу):

$$\begin{aligned} D &= (262...802; 315...1029; 326...831, 340...924; 407...1000)d = \\ &= 79...240 \text{ нм}; 94...309; 98...249, 102...301; 122...223 \text{ нм}. \end{aligned}$$

Таким образом, результаты, полученные в рамках данной работы, позволяют определить наибольший и средний размер микро- и наночастиц, при котором проявляются их необычные свойства, а также дают возможность синтеза на микро- и наноразмерном уровне композиционных геоматериалов и геополимеров — безобжиговых минеральных вяжущих веществ негидратационного твердения при измельчении мокрым способом минерального сырья и отходов промышленности [4], которые соответствовали бы заданным свойствам, требованиям эстетичности и высокой надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных материалов сухого и мокрого способов измельчения [Текст] / А.Н. Хархардин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 8–9. — С. 112–117.

2. Суздалев, И.П. Нанотехнология: физико–химия нанокластеров,nanoструктур и наноматериалов [Текст] / И.П. Суздалев. — М. : КомКнига, 2006. — 592 с.
3. Уэллс, А. Структурная неорганическая химия [Текст] / А. Уэллс; пер. с англ. Ю.И. Петрова. — Т. 1. — М. : Мир, 1987. — С. 178–182.
4. Строкова, В.В. Наносистемы в строительном материаловедении: учеб. пособие [Текст] / В.В. Строкова, И.В. Жерновский, А.В. Череватова. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. — 205 с.

ХАРХАРДИН Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
СТРОКОВА Валерия Валерьевна, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
КОЖУХОВА Марина Ивановна, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 10.09.12

Kharkhardin Anatoly Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Strokova Valeria Valerievna, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Kozhukhova Marina Ivanovna, post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

THE CRITICAL SIZE FOR MICRO- AND NANOPARTICLES WHEN THEIR UNIQUE PROPERTIES COULD BE OCCURED

The equation for smallest linear size of a volume with granular, dispersed material was developed. This equation also can be applied for reference samples size consisting of composites subject to both of the scale effect (wall factor) and highest and middle sizes of micro- and nanoparticles, when its unique characteristics could be occurs.

Key words: dispersed materials, micro- and nanosized particles, critical size.

REFERENCES

1. Kharkhardin, A.N. Structural topology of dispersed materials after dry and wet milling [Text] / A.N. Kharkhardin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 8–9. — P. 112–117.
2. Suzdalev, I.P. Nanotechnology: physics and chemistry of clusters, nanostructures and nanomaterials [Text] / I.P. Suzdalev. — M. : ComKniga, 2006. — 592 p.
3. Wells, A. Structural inorganic chemistry [Text] / A. Wells; transl. from English by Y.I. Petrov.— Vol. 1. — M. : Mir, 1987. — P. 178–182.
4. Strokova, V.V. Nanosystems in construction material science: work book [Text] / V.V. Strokova, I.V. Zhernovsky, A.V. Cherevatova. — Belgorod : BSTU, 2011. — 205 p.

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 624.074.2.011.1

Б.В. МИРЯЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕУГОЛЬНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ И ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКИ

Излагаются результаты экспериментального исследования трехслойных треугольных панелей купола при совместном действии продольных сил и поперечной нагрузки. Проводится сравнение с результатами численного эксперимента.

Ключевые слова: купол, треугольная панель, эксперимент.

Сетчатые купола, собираемые из трехслойных панелей, являются эффективными конструкциями, совмещающими несущие и ограждающие функции. Треугольные панели таких покрытий имеют (как правило) обрамление в виде ребер. К ребрам прикрепляются обшивки, между которыми располагается утеплитель. В качестве ребер используются деревянные бруски или стеклопластиковые профили, а в качестве обшивок — тонколистовые стеклопластики, алюминий или фанера (рис. 1).

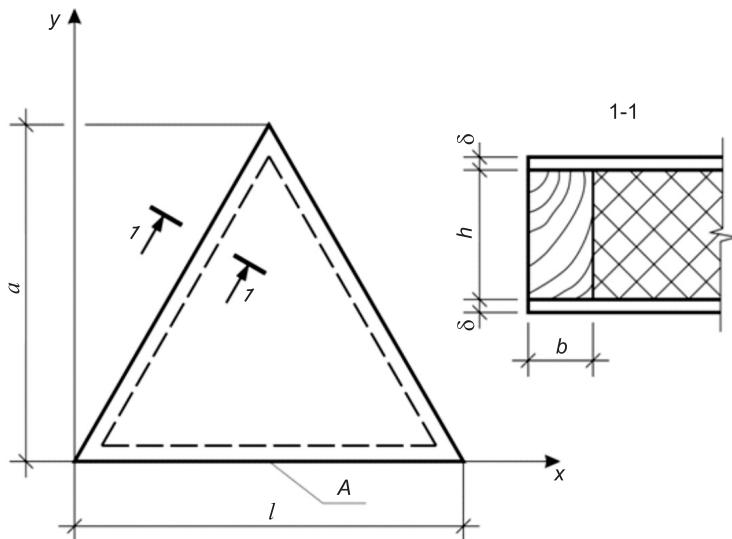


Рис. 1. Трехслойная треугольная панель

В работе А.А. Журавлева приводятся результаты испытаний поперечной нагрузкой треугольных трехслойных панелей со стеклопластиковыми обшивками [1]. Аналогичные испытания треугольных панелей с алюминиевыми обшивками проводил также А.К. Гаврилов [2].

С целью дальнейшего совершенствования методов расчета трехслойных треугольных панелей было проведено численное исследование таких конструкций при совместном действии продольных сил и поперечной нагрузки [3].

В качестве варьируемых было принято два основных параметра.

Первый параметр n характеризует отношение жесткостей обшивок и ребер

$$n = \frac{2E_{ob}l\delta}{Ebh(1-\mu^2)}, \quad (1)$$

где E_{ob} , E — модули упругости соответственно обшивок и ребер;

b , h — размеры сечения ребер;

l — длина стороны панели;

δ — толщина обшивок;

μ — коэффициент Пуассона обшивок.

Второй параметр s характеризует степень ортотропности обшивок

$$s = \frac{E_y}{E_x} - 1, \quad (2)$$

где E_x , E_y — модули упругости обшивок соответственно в направлении осей X и Y ($E_y \geq E_x$).

Соотношение поперечной нагрузки и продольных сил определялось исходя из заданного относительного эксцентричитета, равного

$$t = \frac{M_0}{N_{np}h}, \quad (3)$$

где M_0 — изгибающий момент в ребре от равномерно-распределенной нагрузки g , собранной с $1/3$ панели, что соответствует треугольной погонной нагрузке;

N_{np} — продольное усилие в ребре.

Анализ конструкций существующих и проектируемых купольных покрытий показал, что наиболее вероятные значения варьируемых параметров находятся в пределах $n = 2,0 \div 8,0$; $t = 0,5 \div 2,0$; $s = 0 \div 1,0$.

Численный эксперимент проводился в два этапа на основе метода конечных элементов с использованием программы SCAD. На первом этапе расчеты панели выполнялись только на действие поперечной нагрузки. На втором этапе панель рассчитывалась по деформируемой схеме при совместном действии продольных сил и поперечной нагрузки.

В ходе проведенного исследования установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния панелей в зависимости от изменения варьируемых параметров. По результатам 1-го этапа численного эксперимента получены выражения вида

$$M = M_0 K_n K_s, \quad (4)$$

где M — изгибающий момент в середине ребра;

M_0 — изгибающий момент при $n = 0$, $s = 0$;

K_n , K_s — коэффициенты, учитывающие влияние варьируемых параметров n , s .

В частности для ребра при равномерно распределенной нагрузке g эти величины равны

$$M_0 = \frac{gl^3}{24\sqrt{3}}, \quad (5)$$

$$K_n = \left(\frac{1}{e} \right)^{0.48n^{0.45}}, \quad (6)$$

$$K_s = 1,5 - 0,5 \left(\frac{1}{e} \right)^{0.58s}. \quad (7)$$

По результатам 2-го этапа для середины ребер определялся коэффициент

$$\xi = \frac{M}{M^q}, \quad (8)$$

где M — изгибающий момент в ребре, определенный без учета действия продольных сил;

M^q — изгибающий момент в ребре, определенный по деформируемой схеме с учетом действия продольных сил.

Для проверки полученных зависимостей был проведен физический эксперимент. Испытания панелей проводились на специальном стенде, при совместном действии продольных сил и поперечной нагрузки*.

Для проведения физического эксперимента были изготовлены три треугольные трехслойные панели. Все образцы имели форму правильного треугольника с длиной стороны $l = 1200$ мм, варьируемым параметром являлась толщина среднего слоя, величина которого составила 30, 40 и 50 мм. Ребра изготавливались из сосны второго сорта и имели ширину 24 мм, обшивки выполнялись из трехслойной фанеры толщиной 3,8 мм марки ФК. Наружные слои шпона обшивок располагались параллельно оси Y . В качестве среднего слоя использовался пенополистирол.

Нагружение и разгрузка образцов осуществлялись ступенями в два приема: сначала прикладывалась поперечная нагрузка, а потом продольные силы. Величина контрольной поперечной нагрузки была назначена такой же, что и при численном эксперименте, — 1,28 кПа.

Образцы испытывались при четырех значениях t , равных 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. Перед началом испытаний каждая панель испытывалась только на действие поперечной нагрузки.

Для создания равномерно распределенной нагрузки на верхней обшивке панели располагался слой пенопласта толщиной 20 мм, на который в свою очередь укладывались 15 стальных распределительных пластин пятиугольного и треугольного очертания. Размеры пластин и их толщина были назначены таким образом, чтобы нагрузка от их веса была равна одной ступени нагружения. Последующие четыре ступени нагрузления поперечной нагрузкой выполнялись с помощью стальных грузов массой 4 кг.

При $E = 12\ 600$ МПа, $E_y = 10\ 230$, $E_x = 5490$ МПа значения параметра n , представляющего собой соотношение жесткостей обшивок и ребер для испытываемых панелей П-30, П-40, П-50, оказались соответственно равными 7,90; 5,93 и 4,74.

Максимальные значения прогибов при действии поперечной нагрузки для панелей П-30, П-40 и П-50 оказались равными 4,70; 2,63 и 1,75 мм, при этом заметное влияние на величину прогибов панелей оказывала ползучесть древесины. Увеличение прогибов за счет этого фактора составило от 0,2 мм для П-50 до 0,5 мм для П-30. Расхождение между экспери-

* Испытания проводились при участии М.В. Даниловой.

ментальными и теоретическими значениями прогибов с учетом фактора ползучести составило $6 \div 11\%$.

Физический эксперимент позволил выявить степень влияния продольных сил на увеличение прогиба. Так, например, для панели П-50 ($n = 4,74$) при $t = 2,0$ увеличение прогиба составляет в среднем $4 \div 5\%$, а для панели П-30 ($n = 7,90$) при $t = 0,5 - 9 \div 10\%$, что также хорошо согласуется с теоретическими данными.

На рис. 2 показаны графики изменения краевых относительных деформаций в точке А для верхних зон ребер панелей П-30, П-40, П-50 в зависимости от ступени нагружения. Наклонные участки графиков получены при нагружении панелей поперечной нагрузкой, горизонтальные участки — при действии продольных сил. Из графиков следует, что совместное влияние продольных сил и поперечной нагрузки возрастает с увеличением параметра n и продольной силы.

На заключительном этапе исследования было проведено испытание панели П-30 с целью определения величины разрушающей нагрузки и характера разрушения. Величина ступени нагружения поперечной нагрузкой была принята равной 1,41 кПа при $t = 2$.

На рис. 3 показаны графики изменения прогибов панели в зависимости от y/a при различных ступенях нагружения. В ходе первых трех ступеней нагружения зависимость прогиба от нагрузки примерно линейная. Нелинейность начинает проявляться после третьей ступени и особенно после четвертой. После четвертой ступени нагружения происходит изменение кривизны графика и резкое увеличение прогиба в середине ребра (точка А), что свидетельствует о перераспределении усилий в элементах панели.

На первых трех ступенях нагружения конструкции зависимость между нагрузкой и деформациями имели почти линейный характер. После третьей ступени эта зависимость нарушилась, особенно эта тенденция стала заметна после четвертой ступени. На этой стадии нагружения в панели слышались легкие щелчки и потрескивание, что свидетельствовало о скальвании клеевых швов. После пятой ступени

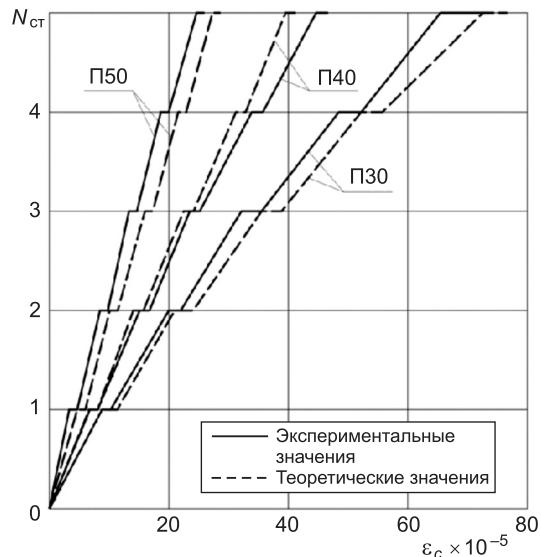


Рис. 2. Графики изменения краевых относительных деформаций для верхних зон ребер панелей П-30, П-40, П-50 в зависимости от ступени нагружения при $t = 0,5$

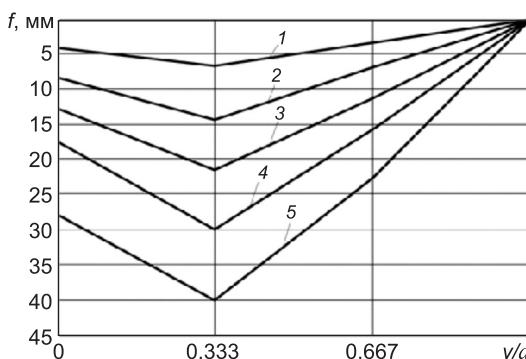


Рис. 3. Графики изменения прогибов f в зависимости от y/a при различных ступенях нагружения панели П-30 при испытании разрушающей нагрузкой (цифра на соответствующем графике означает номер ступени нагружения)



Рис. 4. Панель П-30 на стадии разрушения

ни нагружения рост прогибов значительно ускорился, а спустя примерно одну минуту произошел разрыв нижней обшивки в точке А, после чего ребро, перпендикулярное наружным слоям шпона, оперлось на страховую конструкцию стенда (рис. 4). При осмотре панели обнаружилось, что верхняя обшивка потеряла устойчивость с одновременным отрывом от ребра. В верхней зоне ребра образовалась характерная складка, свидетельствовавшая о том, что напряжения в верхней зоне ребра достигли предела прочности древесины на сжатие.

В соответствии с «Рекомендациями по испытанию деревянных конструкций» [4] конструкция обладает необходимой несущей способностью, если выполняется условие

$$P_s / P \geq K,$$

где P_s — разрушающая нагрузка;

P — расчетная нагрузка.

При $t = 1560$ с и пластическом разрушении $K = 1,93$. Отношение P_s / P , полученное в ходе эксперимента, оказалось равным 2,91, что свидетельствует о высокой несущей способности и надежности исследуемых конструкций.

Выводы. 1. Результаты физического эксперимента подтвердили достоверность эмпирических зависимостей, полученных на основе численного эксперимента.

2. Разрушение панели начинается со сжатой зоны панели и завершается разрывом растянутой обшивки.

3. Отношение разрушающей нагрузки к расчетной равно 2,91, что свидетельствует о высокой несущей способности и надежности трехслойных панелей купола.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлев, А.А. Конструкция и расчет сетчатых куполов [Текст] / А.А. Журавлев // Вопросы расчета современных металлических и деревянных конструкций. — Ростов н/Д : Рост. инж.-строит. ин-т, 1973. — С. 3–32.
2. Гаврилов, А.К. Исследование напряженно-деформированного состояния трехугольных трехслойных плит [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.К. Гаврилов. — Ростов н/Д, 1978. — 22 с.
3. Миряев, Б.В. Некоторые результаты численного исследования трехслойных панелей сетчатого купола [Текст] / Б.В. Миряев, М.В. Данилова // Актуальные проблемы современного строительства : Сб. материалов XXXII Всерос. науч.-техн. конф. Ч. 2. — Пенза : ПГАСА, 2003. — С. 64–65.
4. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций [Текст] / ЦНИИСК. — М. : Стройиздат, 1976. — 28 с.

*МИРЯЕВ Борис Васильевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: miryaevbv@mail.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено после доработки 24.09.12

Miryaev Boris Vasilevich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: miryaevbv@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TRIANGULAR THREE- LAYER PANELS UNDER THE COMBINED EFFECT OF THE LONGITUDINAL FORCES AND THE TRANSVERSE LOAD

The results of experimental research of three-layered triangular panels of dome under combined effect of longitudinal forces and transverse load are expounded. The results of experimental research are compared with the results of numerical experiment.

Key words: the dome, triangular panel, experiment.

REFERENCES

1. Zhuravlev, A.A. Construction and calculation of net domes [Text] / A.A. Zhuravlev // Problems of modern metal and wooden constructions. — Rostov-on-Don : Rost. State Institute of Engin. and Construction, 1973. — P. 3–32.
2. Gavrilov, A.K. Investigation of the stress-strain state of a triangular three- layer plates [Text] : author's abstract of dissertation candidate of technical sciences / A.K. Gavrilov. — Rostov-on-Don, 1978. — 22 p.
3. Miryaev, B.V. Some results of numerical investigation of three- layer panels of net dome [Text] / B.V. Miryaev, M.V. Danilova // Actual problems of modern construction: Collection of materials XXXII OF The all- russia scientific - technical conference. Part 2. — Penza : PGASA, 2003. — P. 64–65.
4. Recommendations on testing of wooden constructions [Text] / TSNIISK. — M. : Stroyizdat, 1976. — 28 p.

УДК 624.131

К.В. КОРОЛЕВ, Э.А. САМОЛЕТОВ, Ю.П. СМОЛИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрены результаты опытных определений мгновенного коэффициента порового давления с использованием оригинального прибора. Исследовано влияние ряда факторов на величину коэффициента порового давления.

Ключевые слова: поровое давление, водонасыщение, консолидирующиеся грунты.

При строительстве на водонасыщенных глинистых грунтах возникает ряд специфических проблем, обусловленных особенностями работы квазидвухфазной среды «скелет–вода». В том числе эти проблемы касаются вопросов определения несущей способности медленно уплотняющихся водонасыщенных глинистых оснований. Как известно, при полном водонасыщении грунтов в момент нагружения эта нагрузка передается на скелет грунта не целиком, а распределяется между скелетом и поровой водой. С течением времени в процессе консолидации давление в воде будет падать и постепенно нагрузка станет восприниматься скелетом грунта. Однако при быстром нагружении прочности водонасыщенного грунта может оказаться недостаточно, поскольку вода не воспринимает касательных напряжений. Это известное положение формулируется как принцип эффективных напряжений К. Терцаги, и на основе этого принципа А.С. Строгановым [1] были предложены основные пути решения задач о несущей способности оснований, сложенных такими грунтами, а Ю.И. Соловьевым [2] была сформулирована теория мгновенной прочности.

Согласно этой теории, помимо традиционных параметров прочности (угла внутреннего трения ϕ и удельного сцепления c), появляется еще один — коэффициент порового давления β :

$$\beta = \frac{u}{\sigma}, \quad \sigma = u + \tilde{\sigma},$$

где u — избыточное поровое давление в грунте;

σ — полное среднее напряжение;

$\tilde{\sigma}$ — эффективное среднее напряжение.

Этот параметр по смыслу также может быть рассмотрен как дополнительная характеристика прочности водонасыщенного грунта при мгновенном приложении нагрузки. Ясно, что при значениях коэффициента β , близких к единице, т.е. когда нагрузка в момент ее приложения в основном передается на воду, прочность грунта будет наименьшей. Соответственно с уменьшением β прочность грунта будет расти и стремиться к величине, которая определяется методами классической теории предельного равновесия грунтов, т.е. без учета порового давления и с использованием стандартных прочностных характеристик, полученных в консолидированно-дренированных испытаниях водонасыщенного грунта.

В СП [3] несущая способность оснований, сложенных медленно уплотняющимися водонасыщенными глинистыми грунтами, определяется, во-первых, в предположении отсутствия внутреннего трения (что соответствует частному случаю $\beta = 1$) и, во-вторых, в предположении однородности прочностных свойств основания. Последнее допущение не позволяет учесть различную степень уплотнения в разных точках грунтового массива, возникающую, например, в результате действия эффективного бытового напряженного состояния. Перечисленное является упрощением и значительно снижает оценку предельной нагрузки на такие основания. Теоретический анализ несущей способности консолидирующихся оснований, выполненный ранее [4] для различных значений коэффициента β , показал существенное влияние величины данного параметра на величину предельной нагрузки.

Таким образом, обоснованное назначение параметра β становится принципиальным при расчете несущей способности оснований, сложенных водонасыщенными медленно уплотняющимися глинистыми грунтами, и соответственно встает вопрос о его экспериментальном определении.

Существует ряд работ, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований коэффициента порового давления (например, [5] и др.). Однако до сих пор в практике геотехнических расчетов указанные выше особенности поведения водонасыщенных грунтов в момент разрушения учитываются достаточно редко. Более широкое внедрение расчетов прочности водонасыщенных оснований в практику проектирования сдерживалось как отсутствием до недавнего времени теоретических решений, так и вытекающим из этого тем обстоятельством, что определение порового давления, как правило, не входит в стандартный набор механических характеристик грунтов, задаваемый при инженерно-геологических изысканиях. Все это приводит к необходимости продолжения, в том числе экспериментальных исследований в этой области.

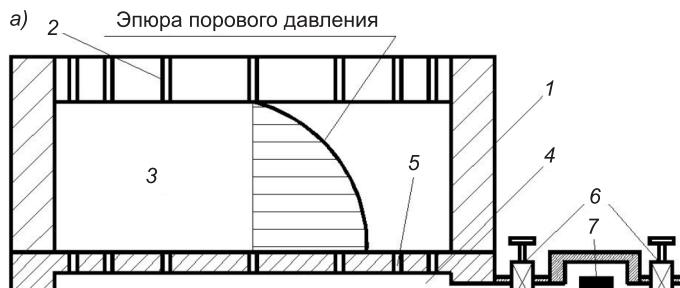
Для опытного исследования коэффициента порового давления был разработан специальный прибор, позволяющий с высокой точностью измерять поровое давление в образце консолидирующегося грунта. Конструкция и общий вид прибора показаны на рис. 1.

Прибор состоит из корпуса 1, пористого штампа 2, через который подается нагрузка на образец грунта 3, полого дна 4, соединенного с внутренним пространством прибора порами 5, кранов 6, регулирующими доступ воды в камеру с полупроводниковым датчиком порового давления 7. Нагрузка создавалась гирями через рычажную систему. Габаритные размеры соответствовали стандартному компрессионному прибору конструкции Гидропроекта. Соответственно для отбора проб использовалось стандартное компрессионное кольцо высотой 25 мм и площадью 60 см².

Особенностью прибора является способ отвода воды и конструкция датчика. Отвод воды осуществляется только через верхний штамп и, таким образом, эпюра порового давления по высоте образца имеет максимум в уровне низа образца (см. эпюру на рис. 1). Это максимальное давление и фиксировалось датчиком.

Собственно датчик порового давления состоит из корпуса цилиндрической формы (высота 25 мм, диаметр 40 мм), выполненный из бронзы. В нем вмонтирован датчик давления с чипом Моторола MPX 5010 D CASE 867-08.

Характеристики датчика: предельное давление 0,5 МПа, выходной сигнал при максимальной нагрузке 4,5 В. В датчике предусмотрена температурная компенсация (от -40 до +125 °C). Выходной сигнал от датчи-



б)

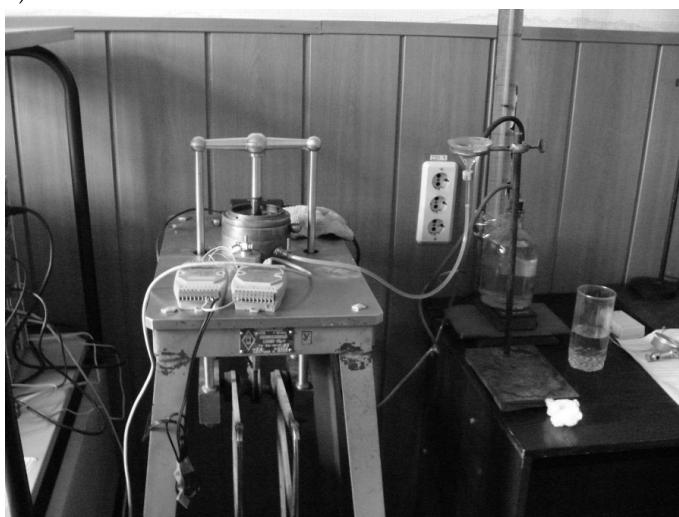


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для измерения порового давления (а) и его общий вид (б)

ка подается на контроллер I-7012. Связь контроллера с компьютером осуществляется через конвертер I-7551. Для контроллера и конвертера используется блок питания КЛМ 020-1 824 Р 24В/0,75А. Программное обеспечение разработано с учетом требований настоящей работы.

Калибровка датчика осуществлялась водой. При этом пришлось решить ряд конструктивных проблем, связанных с герметичностью внутреннего пространства прибора. Поры верхнего штампа при калибровке заклеивались.

Характеристика калибровки указывалась на специальном графике изменения величины порового давления во времени (рис. 2, а). Здесь калибровка осуществлялась нагружением воды. Программное обеспечение позволяет настраивать цену деления графиков.

Целью опытов стало исследование порового давления в супесчаных и суглинистых грунтах г. Новосибирска при различных режимах нагружения. Было проведено несколько серий опытов. Здесь кратко опишем результаты трех серий, представляющих с нашей точки зрения наибольший интерес, и которые позволяют сделать определенные выводы о характере поведения порового давления.

На рис. 2, б показан результат измерения порового давления при нагружении водонасыщенного супесчаного образца ($I_p = 5$) давлением 0,1 МПа. Как видим из графика, пиковое значение порового давления составило 0,08 МПа, что соответствует коэффициенту порового давления $\beta = 0,8$. При этом, как и следовало ожидать, учитывая фильтрационные свойства опесченной супеси, поровое давление довольно быстро рас-

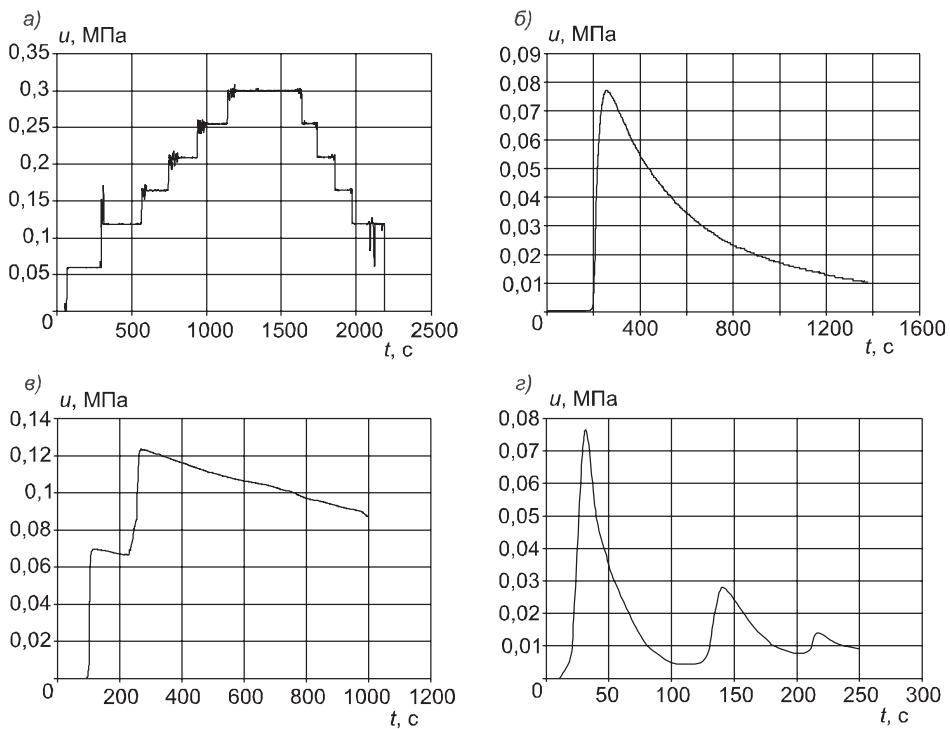


Рис. 2. Графики изменения порового давления во времени

a — при калибровке датчика водой; *b* — при нагружении супесчаного образца одной ступенью 0,1 МПа; *c* — при быстром последовательном нагружении суглинистого образца двумя ступенями по 0,1 МПа; *г* — при медленном нагружении супесчаного образца тремя ступенями по 0,1 МПа

сеивается, и уже через примерно три минуты оно составило 0,01 МПа. Характер графика «осадка образца — давление» повторяет график изменения порового давления.

Результаты следующего эксперимента показаны на рис. 2, *в*. Здесь производилось нагружение суглинистого образца ($I_p = 11$) двумя ступенями по 0,1 МПа. Вторая ступень нагружения подавалась через 1,5 мин после первой с тем, чтобы поровое давление не успевало рассеиваться. Обращает на себя внимание некоторое уменьшение значения коэффициента порового давления — с 0,65 при первом нагружении до 0,53 при подаче второй ступени.

Еще один график изменения давления в воде дан на рис. 2, *г*. Здесь вновь производилось нагружение образца супеси ($I_p = 3$). Давление подавалось тремя ступенями по 0,1 МПа. В данном случае зависимость коэффициента порового давления от уровня нагружения оказалась более существенной: $\beta = 0,73$ при давлении 0,1 МПа, $\beta = 0,28$ при давлении 0,2 МПа, $\beta = 0,14$ при давлении 0,3 МПа (рис. 3).

Также была проведена дополнительная серия опытов, в которых показана незначительная зависимость коэффи-

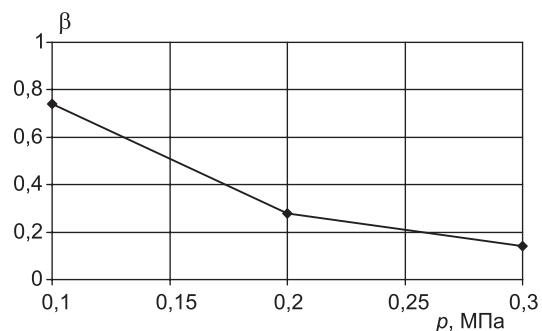


Рис. 3. Зависимость коэффициента порового давления супесчаного грунта от давления при «медленном» нагружении

циента порового давления от величины ступени нагрузки, подаваемой с некоторого уже достигнутого уровня нагружения. Так, в трех сериях опытов было показано, что при нагружении ступенями по 0,05 и 0,1 МПа с одинакового уровня напряжений, достигнутого к моменту нагружения (в данном случае это величина 0,1 МПа), значение коэффициента порового давления изменялось в пределах 0,4...0,48. Это можно считать статистической погрешностью, учитывая то, что не было зафиксировано устойчивого качественного превышения значения β при $\Delta p = 0,05$ МПа над значением β при $\Delta p = 0,1$ МПа или наоборот. В целом этот вопрос требует отдельного экспериментального исследования.

Представленные результаты позволяют сделать определенные выводы относительно поведения порового давления, методики его определения, практического использования и дальнейших исследований.

1. Результаты некоторых серий опытов позволяют поставить вопрос о зависимости коэффициента β от величины ступени нагружения, подаваемой с одинакового уровня уже достигнутого напряженного состояния.

2. Зависимость β от уровня нагружения проявляется в большей степени при «медленном» нагружении (0,73...0,28), т.е. когда каждая последующая ступень подается после затухания порового давления от предыдущей. При «быстрым» нагружении этот эффект значительно меньше (0,65...0,53).

3. Для практических расчетов несущей способности основания, когда производится условно мгновенное догружение до предельного состояния [4], можно рекомендовать принимать $\beta = \text{const}$ с некоторыми оговорками. Во-первых, следует выполнять анализ достигнутого уровня эффективных напряжений в основании к моменту догружения до предельной нагрузки и назначать коэффициент β с учетом величин напряжений. Например, если к моменту мгновенного нагружения в основании напряженное состояние определяется только бытовыми напряжениями, то для фундамента шириной 1 м и глубиной заложения 2 м при удельном весе грунта 20 кН/м³ достигнутые напряжения будут равны от $20 \cdot 2 = 40$ кПа в уровне подошвы фундамента до $20 \cdot (2 + 2) = 80$ кПа на максимальной для развития зон пластических деформаций глубине (в данном примере эта глубина принята равной 2 м). Таким образом, в рассмотренном примере можно принимать коэффициент β , определенный при давлении 0,05 МПа.

Во-вторых, следует учитывать характер распределения эффективных напряжений в основании. Так, если по ширине фундамента перед «мгновенным» догружением была приложена некоторая уплотняющая нагрузка, от которой произошло дополнительное уплотнение грунта, то эффективное напряженное состояние в этом случае может оказаться существенно неоднородным, и тогда, возможно, придется рассмотреть вопрос о неоднородном распределении в основании и коэффициента порового давления. Решить этот вопрос можно в результате предварительных расчетов с разными значениями и различным распределением коэффициента β .

4. Для практических целей определять коэффициент β следует для нескольких уровней достигнутого напряженного состояния как показано на рис. 3 и примерно аналогично тому, как это делается при определении модуля деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стrogанов, А.С. Несущая способность глинистого водонасыщенного основания в нестабилизированном состоянии под круглым фундаментом [Текст] / А.С. Стrogанов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1977. — № 5. — С. 40–41.
2. Соловьев, Ю.И. Жестко- и упругопластический анализ устойчивости и напряженно-деформированного состояния грунтов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 1989. — 42 с.
3. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* [Текст]. — М., 2011. — 161 с.
4. Королев, К.В. Плоская задача теории предельного равновесия грунтов [Текст] / К.В. Королев. — Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. — 251 с.
5. Дашко, Р.Э. Механика грунтов в инженерно-геологической практике [Текст] / Р.Э. Дашко, А.А. Каган. — М. : Недра, 1977. — 238 с.

КОРОЛЕВ Константин Валерьевич, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

САМОЛЕТОВ Эдуард Анатольевич, зав. лабораторией

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

СМОЛИН Юрий Петрович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 27.09.12

Korolev Konstantin Valerievich, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Samolyotov Eduard Anatolievich, director of laboratory, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Smolin Yuriy Petrovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FACTOR PORE PRESSURE

In article results of experimental definitions of instant factor pore pressure with use of the original device are considered. Influence of some factors on value of factor pore pressure is investigated.

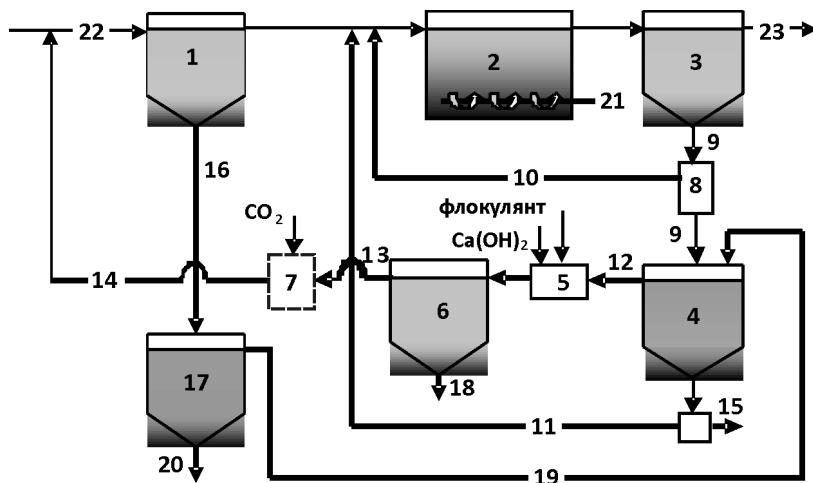
Key words: pore pressure, saturated, consolidated soils.

REFERENCES

1. Stroganov, A.S. Bearing capacity of the water-saturated soils in not stabilized condition under the round foundation [Text] / A.S. Stroganov // Bases, the bases and soils mechanics. — 1977. — N 5. — P. 40–41.
2. Sоловьев, Ю.И. Plastic and elastic-plastic the analysis of stability and it is stress-deformed conditions of soils [Text]: autoref. dis. ... doctor of technical sciences. — М., 1989. — 42 p.
3. SP 22.13330.2011. CN&R 2.02.01–83*. Bases of buildings and constructions [Text]. — М., 2011. — 161 p.
4. Королев, К.В. Plane strain theory of limit equilibrium of soils [Text] / К.В. Королев. — Новосибирск : СГУПС, 2010. — 251 p.
5. Дашко, Р.Э. Soils mechanics in engineering-geological practice [Text] / Р.Э. Dashko, А.А. Kagan. — М. : Nedra, 1977. — 238 p.

УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА ИЗ СТОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

В НГАСУ (Сибстрин) на кафедре «Водоснабжение и водоотведение» разработан способ удаления фосфора из сточной жидкости. Согласно данной технологии, эффект удаления фосфора достигает 96,8 % (как в летний, так и в зимний период года), т.е. концентрация фосфора (по PO_4^{3-}) в очищенной сточной воде составляет 0,38 мг/л.



Комбинированный метод удаления фосфора

1 — первичный отстойник, 2 — аэротенк, 3 — вторичный отстойник, 4 — сооружение для дефосфатирования циркулирующего ила, 5 — камера смешения и реакции, 6 — отстойник физико-химической очистки, 7 — карбонизатор, 8 — насосная станция, 9 — циркулирующий и избыточный активный ил, 10 — циркулирующий активный ил, 11 — дефосфатированный циркулирующий активный ил, 12 — иловая вода, обогащенная фосфатами, 13 — иловая вода, освобожденная от фосфатов, 14 — иловая вода на повторную очистку, 15 — уплотненный избыточный активный ил, 16 — осадок из первичного отстойника, 17 — ацидофикатор, 18 — осадок, содержащий $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 19 — иловая вода, обогащенная летучими жирными кислотами, 20 — осадок из ацидофикатора, 21 — воздух, 22 — сточная жидкость, поступающая на очистку, 23 — очищенная сточная жидкость

Данная технология очистки сточной жидкости от фосфора предполагает замену дорогостоящей уксусной кислоты на продукт метаболизма отходов очистных сооружений канализации, содержащий большое количество летучих жирных кислот, и позволяет увеличить чистый дисконтированный доход на 1,3 млн руб.

Данный способ подтвержден патентами на изобретение № 2276108 (заявл. 05.08.2004, опубл. 27.01.2006), № 2230042 (заявл. 23.11.2002, опубл. 10.06.2004), № 43258 (заявл. 05.08.2004, опубл. 10.01.2005).

Разработчики: Галина Тарасовна АМБРОСОВА, канд. техн. наук, доц.,
Татьяна Александровна БОЙКО, канд. техн. наук, доц.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: ntio-ngasu@yandex.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел/факс: (383) 266-28-89

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
— сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью организациии. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов;

— название статьи на английском языке;

— аннотацию на английском языке;

— ключевые слова на английском языке;

— библиографический список на английском языке.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следуют набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2012 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2012 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический
В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1500 р.

Цена отдельного номера — 250 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 10 (646) 2012

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Г.П. Рыжкова*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*