

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

№ 12 (672)
Декабрь 2014 г.

Главный редактор В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Тел./факс +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 22.12.14. Формат 70×108¹/16
Усл. печ. л. 10,50+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6870

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Митасов В.М., Пантелеев Н.Н., Нарушевич А.Н.
Экспериментальные исследования новой конструкции стыка стеновых панелей с перекрытием в крупнопанельных зданиях

5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Рахимбаев Ш.М., Половнева А.В., Аниканова Т.В.
Особенности твердения мелкозернистых бетонов и пенобетонов при различных температурах

13

Овчаренко Г.И., Аввакумов Е.Г., Песоцкий А.В.,
Викторов А.В., Садравшева А.О.
Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня.
Часть 1

19

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Кудяков А.И., Апкарьян А.С., Христюков В.Г.
Автоматизация технологического процесса обжига гранулированной пеностеклокерамики

25

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И.

Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Собщение 3. Динамика пылевых частиц	31
Камбург В.Г., Сафонов М.А., Лушкин И.А., Титов Е.А., Демков А.В. Кинетика процесса коагуляции при реагентной обработке природной воды в присутствии контактных сред	40
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Виговская Т.Ю., Кутумов А.А., Шабанов Р.Ш. Синтез и анализ пневматических ударных механизмов при выборе и обосновании их принципиальной схемы	47
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Манацкова О.А. Культовые сооружения в планировочной структуре современных крупных городов Западной Сибири	61
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Адищев В.В., Демешкин А.Г., Шульга В.К., Грачева М.С., Данилов М.Н., Мальцев В.В. Определение зоны анкеровки армирующего элемента при вытягивании из матрицы	67
Барышников А.В., Харламов И.В. Методика поиска рациональной конструктивной формы металлоконструкций с учетом эксплуатационных затрат	80
Фомин П.А., Айрапетян В.С., Чен Д.-Р., Митропетрос К. К вопросу об обеспечении взрывобезопасности промышленных конструкций и строительных сооружений при наличии утечек или разливов тяжелых углеводородов с высоким давлением насыщенных паров	88
Хархардин А.Н. Топологический формализм в определении величин фундаментальных физических постоянных	104
УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в 2014 г. (с № 1 по № 12)	113

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

N 12 (672)

December 2014

Editor-in-Chief V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,
Honour. Mem. RAACS

Editorial Board:

- A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS
Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008
 Phone number/fax +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS

- Mitasov V.M., Panteleev N.N., Narushevich A.N. Experimental study of a new design of junction of wall panels overlapping in large-panel buildings 5

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Rakhimbaev Sh.M., Polovneva A.V., Anikanova T.V. Features of fine-grained and foam concretes hardening at various temperatures 13

- Ovcharenko G.I., Avvakumov E.G., Pesotskiy A.V., Viktorov A.V., Sadrashova A.O. Effect of the type of finely grinding mineral additives on the strength of cement stone. Part 1 19

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION

AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Kudyakov A.I., Apkarian A.S., Chistyukov V.G. Automation of technological processes firing granulated foam glass ceramic 25

SANITARY ENGINEERING

- Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I. Modeling the dust-air flows in the action spectrum of local round ventilation bell ex-

haust. Message 3. Dynamics of dust particles	31
Kamburg V.G., Safronov M.A., Lushkin I.A., Titov E.A., Demkov A.V. Kinetics of coagulation process at natural water reagent treatment with contact medium presence	40
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Vigovskaya T.Yu., Kutumov A.A., Shabanov R.Sh. Synthesis and analysis of pneumatic percussions mechanisms at the choice and their justification schematic diagram	47
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Manatskova O.A. Religious buildings in the layout of the large modern cities of Western Siberia	61
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Adishchev V.V., Demeshkin A.G., Shulga V.K., Gracheva M.S., Danilov M.N., Maltsev V.V. Definition of the zone of anchoring of the reinforcing element when pulling from matrix	67
Baryshnikov A.V., Kharlamov I.V. Method of searching a rational structural form including operational expenses	80
Fomin P.A., Ayrapetyan V.S., Chen J.-R., Mitropetros C. On the explosion protection of industrial structures and buildings in the presence of leaks or spillage of heavy hydrocarbons of high vapor pressure	88
Kharkhardin A.N. Topological formalism in determination of fundamental physical constants	104
LIST of articles in 2014 (N 1–12)	113

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.41:69.057.13

В.М. МИТАСОВ, Н.Н. ПАНТЕЛЕЕВ, А.Н. НАРУШЕВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЫКА СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С ПЕРЕКРЫТИЕМ В КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЯХ

В связи с актуальной проблемой повышения этажности крупнопанельных зданий на основе опалубки конструктивных элементов типовых серий крупнопанельных зданий разработано конструктивное решение сопряжения вертикальных и горизонтальных конструкций для крупнопанельных зданий повышенной этажности. Экспериментальные исследования показали, что исчерпание несущей способности стыка новой конструкции вызвано разрушением основного сечения стеновой панели (за пределами зоны стыка), а не опорных зон сборных элементов как в платформенном стыке типовой конструкции. Применение стыка новой конструкции позволит возводить крупнопанельные здания повышенной этажности (до 25 этажей) на основе сборных элементов существующих типовых серий.

Ключевые слова: крупнопанельные здания, платформенный стык, экспериментальные исследования, несущая способность, расчет.

Типовая конструкция платформенного стыка обладает рядом конструктивных недостатков (наличие горизонтальных растворных швов, имеющих меньшие прочностные и деформативные характеристики по сравнению с бетоном панелей, вертикального шва между торцами панелей перекрытий), что приводит к снижению несущей способности опорного сечения стеновой панели. Наличие дефектов стыка, связанных с монтажом здания, существенно снижает его несущую способность [1]. Она может составлять всего 15–20 % несущей способности среднего сечения стеновой панели [2]. Вследствие чего поставлена задача — разработать конструкцию стыка, позволяющую полностью использовать несущую способность стеновой панели.

На кафедре железобетонных конструкций НГАСУ (Сибстрин) разработана конструкция стыка панелей перекрытий со стеновыми панелями для крупнопанельных зданий повышенной этажности (рис. 1), позволяющая повысить уровень действующих нагрузок в стыке.

Монолитный участок 5 позволяет компенсировать возможные отклонения в отметках монтажного горизонта и высоте стеновой панели 1, исключить нижний горизонтальный и вертикальный (между торцами перекрытий) швы, а верхний горизонтальный шов 6 выполнить минимальной толщины. Для восприятия поперечной силы на торцевых поверхностях панелей перекрытий предусмотрены пазы для формирования шпонки после обетонирования узла сопряжения.

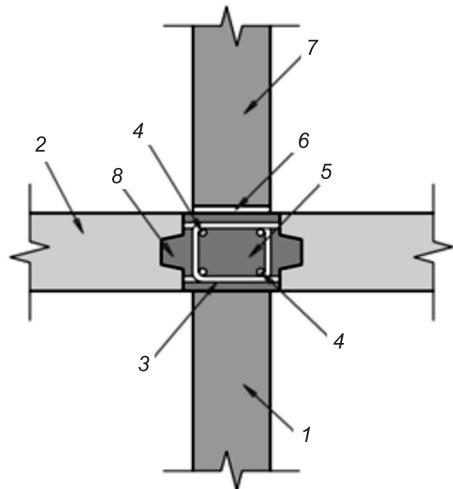


Рис. 1. Разработанная конструкция стыка
1 — стеновая панель нижнего этажа; 2 — панель перекрытия; 3 — петлевые выпуски арматуры; 4 — продольная арматура; 5 — бетон замоноличивания; 6 — горизонтальный шов цементно-песчаного раствора толщиной 5 мм;
7 — стеновая панель верхнего этажа

дает возможность обойтись без вспомогательных опорных площадок определяются расчетом на восприятие поперечной силы от собственного веса панели и монтажных нагрузок. После набора бетоном необходимой прочности поперечная сила будет восприниматься шпонкой.

Применение разработанной конструкции стыка позволяет:

- повысить несущую способность платформенного стыка;
- увеличить расстояние между поперечными стеновыми панелями;
- снизить влияние дефектов, связанных с монтажом здания, на несущую способность стыкового соединения;
- повысить надежность стыковых соединений здания при действии аварийных нагрузок;
- использовать для стеновых панелей и панелей перекрытий бетоны, имеющие существенную разницу по прочностным показателям.

Для определения несущей способности и деформативных характеристик новой конструкции стыка проведены натурные экспериментальные исследования. Геометрические параметры, класс бетона сборных элементов стыка разработанной конструкции соответствовали ранее проведенным испытаниям типовой конструкции платформенного стыка (рис. 2) [2].

Результаты испытаний типовой конструкции платформенного стыка показали, что исчерпание несущей способности образца связано с разрушением опорной зоны стеновых панелей и растворных швов (рис. 3, а) либо только растворного шва, даже без повреждения стеновых панелей и панелей перекрытия. Исчерпание несущей способности стыка разработанной конструкции связано с разрушением основного сечения стеновых

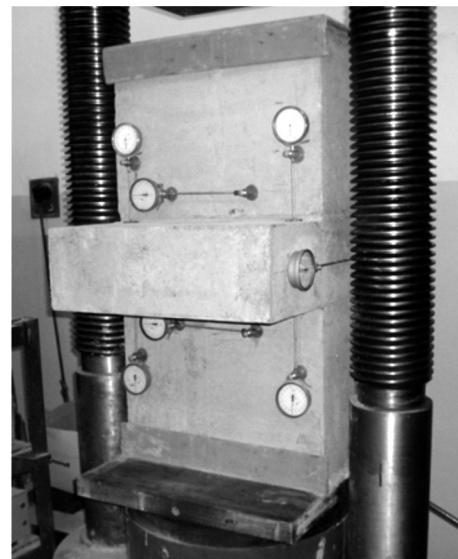


Рис. 2. Стык разработанной конструкции, смонтированный в прессе

Для снижения трудоемкости монтажа панель перекрытия имеет опорные площадки с противоположных сторон панели. Такое решение



Рис. 3. Схема разрушения стыка типовой конструкции (а); схема разрушения стыка разработанной конструкции (б); состояние монолитного сердечника, панелей перекрытий, растворного шва после испытания стыка новой конструкции (в)

панелей (за пределами зоны стыка). При этом монолитный участок панели перекрытий и растворный шов практически не имеют повреждений (рис. 3, в). В нижней стеновой панели имелись отдельные силовые повреждения, однако интенсивность этих повреждений была значительно ниже повреждений верхней стеновой панели.

Исчерпание несущей способности стыков разработанной конструкции происходило при напряжениях в бетоне стеновых панелей, в среднем на 18 % превышающих призменную прочность бетона. Полученные значения разрушающих нагрузок в 1,7–5,3 раза выше (в зависимости от наличия дефектов в стыке) несущей способности платформенного стыка типовой конструкции. При использовании стыков разработанной конструкции расчетная нагрузка на вертикальные несущие столбы в крупнопанельных зданиях не ограничивается несущей способностью опорных участков сборных элементов, а определяется по несущей способности среднего сечения стеновой панели (рис. 4).

Основной характеристикой деформативности платформенного стыка является коэффициент податливости, численно равный деформации растворного шва, вызванной единичной силой вдоль направления ее действия. Деформации горизонтального растворного шва определялись как разность средних показаний деформаций сжатия, зафиксированных индикаторами над панелью перекрытия и индикаторами под панелью перекрытия. Значение коэффициента податливости растворного шва в стыке разработанной конструкции для диапазона эксплуатационных нагрузок соответствует значению $\lambda = 1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н}$, что существенно ниже вели-

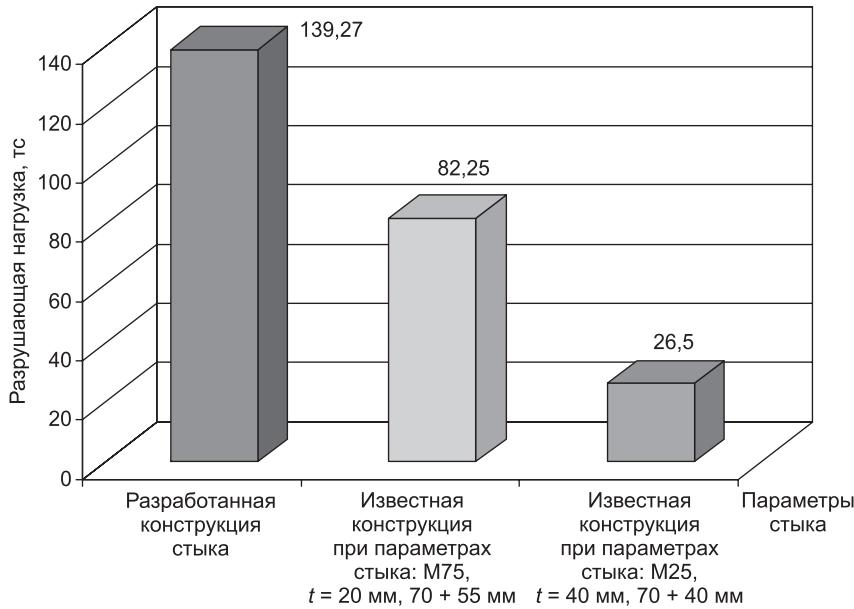


Рис. 4. Диаграмма значений разрушающих нагрузок стыков разработанной конструкции и типовой конструкции платформенного стыка

чины податливости растворного шва в платформенном стыке типовой конструкции. Анализ графика коэффициента податливости шва в стыке разработанной конструкции (рис. 5) показал: величина коэффициента податливости не является величиной постоянной и зависит от уровня напряжений в стыке. С увеличением уровня действующей нагрузки до $N/N_u = 0,15$ (где N — действующая нагрузка; N_u — значение разрушающей нагрузки) величина коэффициента податливости падает, что связано с обжатием поверхности контакта опорная зона верхней стено-вой панели — растворный шов — монолитный участок. В диапазоне нагрузок $0,15 N/N_u - 0,8 N/N_u$ значение коэффициента податливости практически не изменяется, при более высоком уровне напряжений

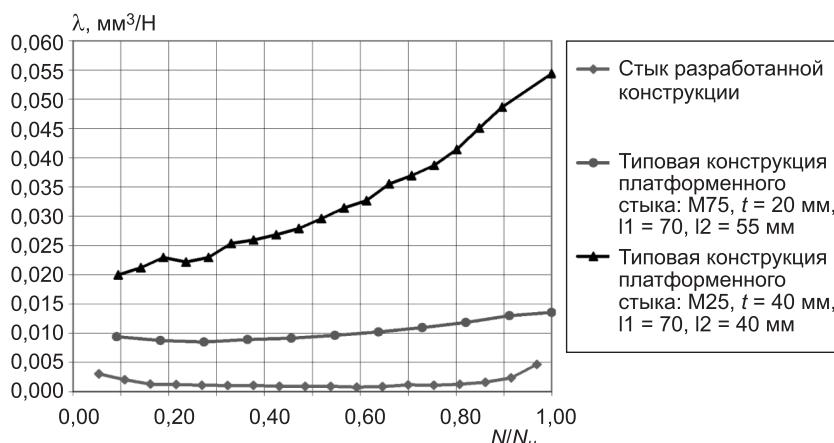


Рис. 5. Податливость горизонтальных растворных швов стыков разработанной и типовой конструкции, $\text{мм}^3/\text{Н}$

значение коэффициента податливости увеличивается, что, по всей видимости, вызвано процессом микротрецинообразования в растворном шве. При этом сопоставительный анализ значений коэффициентов податливости швов в стыке новой конструкции и платформенном стыке типовой конструкции позволяет отметить существенную разницу в этих значениях.

Сопоставительный анализ значений относительных деформаций растяжения (по длине стыка) в стеновых панелях с предлагаемым стыком и платформенным стыком типовой конструкции (рис. 6) позволяют сделать следующие выводы: в результате исключения нижнего растворного шва и уменьшения толщины верхнего шва величина деформации растяжения в бетоне стеновых панелей разработанной конструкции стыка в среднем ниже в 1,6 раза для верхней панели и в 1,9 раза для нижней панели относительно деформаций растяжения в стеновых панелях платформенного стыка типовой конструкции (при параметрах стыка, близких к проектным значениям).

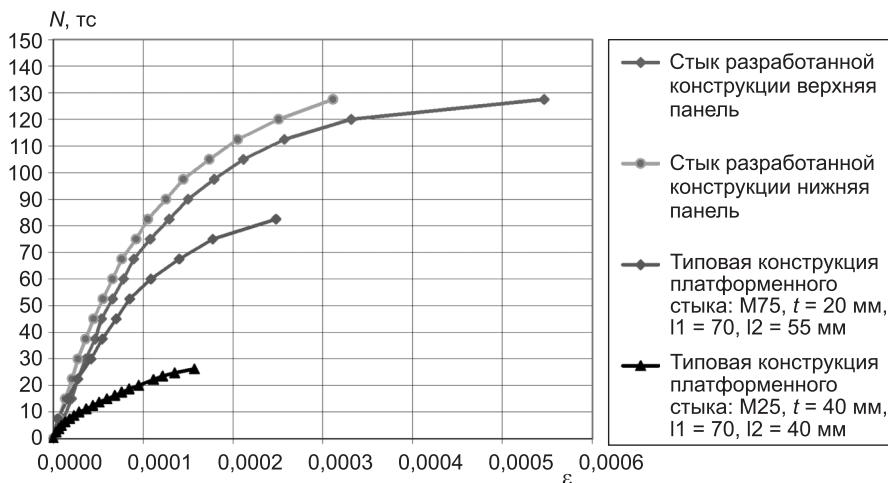


Рис. 6. Относительные деформации растяжения бетона стеновых панелей по длине элемента в стыке разработанной конструкции и типовой конструкции платформенного стыка

При наличии дефектов в платформенном стыке типовой конструкции величина деформаций растяжения в бетоне стеновых панелей разработанной конструкции стыка в среднем ниже в 4,1 раза для верхней панели и в 5,3 раза для нижней стеновой панели. Таким образом, разработанная конструкция стыка позволяет существенно снизить значения деформаций растяжения в опорных участках стеновых панелей относительно типовой конструкции платформенного стыка.

Сопоставительный анализ значений горизонтальных перемещений панелей перекрытий в стыках разработанной конструкции и платформенном стыке типовой конструкции (рис. 7) позволяет отметить: вследствие наличия петлевых выпусков арматуры панелей перекрытий и обетонирования монолитного участка в стыке разработанной конструкции существенно уменьшается величина горизонтальных перемещений панелей перекрытия. В диапазоне эксплуатационных нагрузок снижение составляет до 9 раз при параметрах платформенного стыка, близких к проектным значениям, и до 20 раз — при наличии дефектов в платформенном стыке

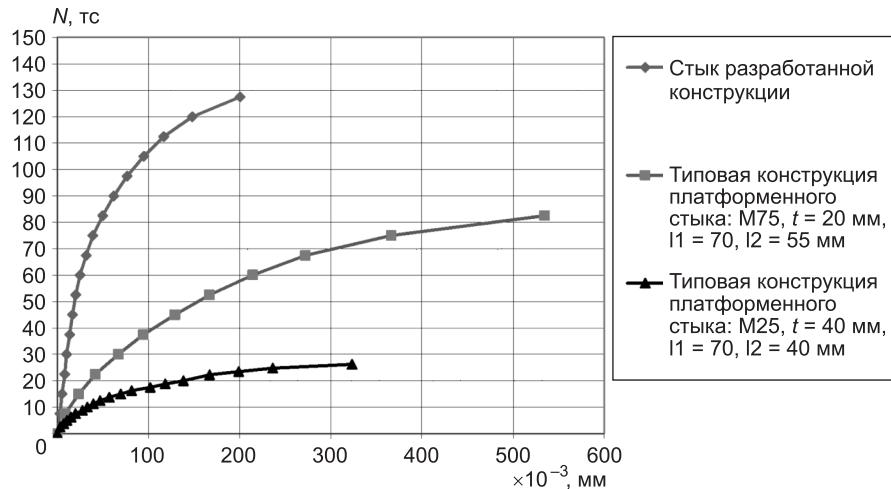


Рис. 7. Горизонтальные перемещения панелей перекрытий (раздвижка) в стыках разработанной конструкции и типовой конструкции платформенного стыка, мм

типовой конструкции. В результате чего существенно снижаются растягивающие усилия по толщине стеновой панели.

Методика оценки несущей способности стыкового соединения заключается в расчете монолитного сердечника. На рис. 8, а представлена расчетная схема узла сопряжения, включающая внутренние стеновые панели, панели перекрытий и монолитный сердечник, на рис. 8, б — расчетная модель монолитного сердечника. С учетом принятой расчетной модели (рис. 8, б) напряжения по поверхности монолитного сердечника соответствуют модели двухосного сжатия. Фактически прочность бетона монолитного сердечника близка к прочности бетона в обойме. С учетом принятых допущений несущая способность монолитного сердечника оп-

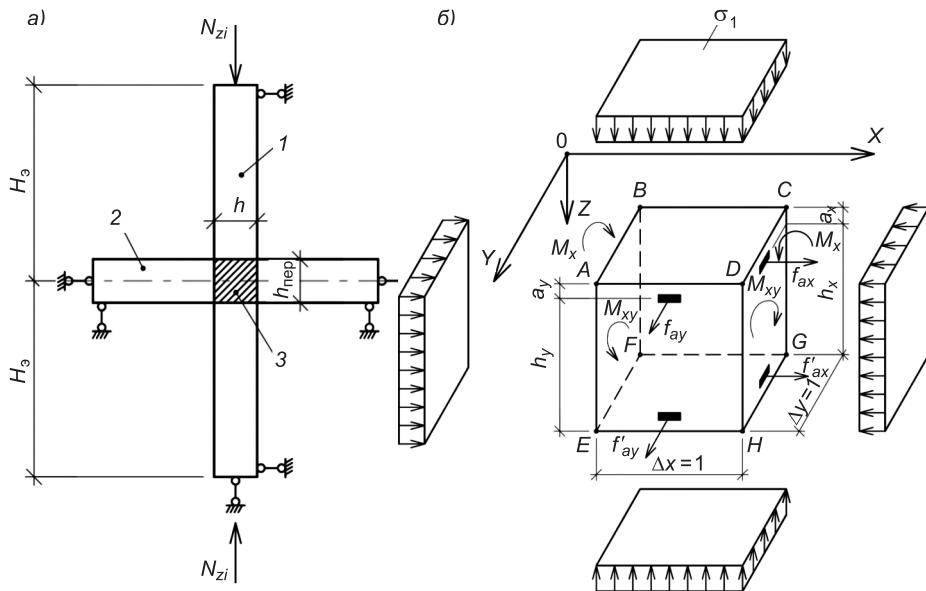


Рис. 8. Расчетная схема узла сопряжения перекрытия со стеновыми панелями (а); расчетная модель монолитного сердечника (б)

1 — внутренняя панель; 2 — панель перекрытия; 3 — монолитный сердечник

ределяется как для внецентренно-сжатых бетонных элементов с учетом повышающего коэффициента к расчетному сопротивлению бетона, учитывающего двухосное сжатие — k_2 :

$$N_b \leq k_2 \cdot R_b \cdot A_b,$$

где $A_b = d \cdot h \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_0}{h}\right)$;

R_b — расчетная прочность при сжатии бетона стеновой панели в опорной зоне, равная расчетной призменной прочности бетона;

d — длина участка стыка;

h — толщина стеновой панели;

e_0 — эксцентриситет продольной силы.

Значение коэффициента k_2 зависит от величины распора σ_2 и может быть определено в соответствии с предложениями В.Н. Байкова [3].

Согласно результатам проведенных натурных испытаний, тонкий растворный шов толщиной 5 мм не оказывает влияния на несущую способность стеновой панели — разрушение происходило при напряжениях, превышающих призменную прочность бетона. Это означает, что при параметрах стыка, соответствующих разработанной конструкции, проверка опорной зоны верхних стеновых панелей не требуется. Стоит отметить, что аналогичные результаты получены при испытании контактных стыков [4], согласно которым горизонтальный шов толщиной 5 мм независимо от прочности раствора шва не вызывает снижения несущей способности опорной зоны панели.

Выводы. 1. Разработана новая конструкция узла сопряжения стеновых панелей с панелями перекрытия, позволяющая полностью использовать несущую способность стеновых панелей в крупнопанельных зданиях.

2. Применение стыка новой конструкции позволит возводить крупнопанельные здания повышенной этажности (до 25 этажей) на основе парка существующей опалубки конструкций типовых серий крупнопанельных зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Митасов, В.М. Оценка надежности типовой конструкции платформенного стыка на основе результатов натурных обследований [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев, В.Г. Себешев, А.Н. Нарушевич, Д.С. Шмаков // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9–10. — С. 5–12.
- Нарушевич, А.Н. Экспериментальная оценка несущей способности платформенных стыков, имеющих первоначальные дефекты [Текст] / А.Н. Нарушевич, В.А. Беккер // Матер. Междунар. академич. чтений 9–11 апреля 2009 г. — Курск, 2009. — С. 151–155.
- Байков, В.Н. Взаимосвязь диаграммы прочности двухосно сжатого бетона и характеристик $\sigma - \epsilon$ при одноосном сжатии и растяжении [Текст] / В.Н. Байков // Бетон и железобетон. — 1991. — № 11. — С. 24–26.
- Морозов, Ю.Б. Исследования прочности и деформаций горизонтальных стыков стеновых панелей [Текст] / Ю.Б. Морозов, Г.Ф. Седловец // Исследования прочности и расчет конструкций многоэтажных зданий. — М.: МНИИТЭП, 1970. — С. 157–170.

МИТАСОВ Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mitassov@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ПАНТЕЛЕЕВ Николай Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: jbk@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

НАРУШЕВИЧ Александр Николаевич, ст. препод.; E-mail: narushevich_an@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 18.11.14

Mitasov Valeriy Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mitassov@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Panteleev Nikolay Nikolayevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: jbk@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Narushevich Alexander Nikolayevich, senior lecturer; E-mail: narushevich_an@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF A NEW DESIGN OF JUNCTION OF WALL PANELS OVERLAPPING IN LARGE-PANEL BUILDINGS

In connection with the urgent problem of increasing the number of stories of large-panel buildings on the basis of formwork design elements of the standard series of large-panel buildings, developed the design solution of the pair of vertical and horizontal structures for large panel of high-rise buildings. Experimental study has shown that the depletion of the carrying capacity of the junction of the new design caused by the destruction of the main section of the wall panels (outside joint area), rather than support zones of prefabricated elements as in the platform interface standard design. Application interface the new design will enable the construction of large high-rise buildings (up to 25 stories) on the basis of the prefabricated elements of the existing model series.

Key words: large-panel buildings, platform interface, experimental studies, bearing capacity, calculation.

REFERENCES

1. M it a s o v , V.M. Otsenka nadezhnosti tipovoy konstruktsii platformennogo styka na osnove rezul'tatov naturnykh obsledovaniy [Reliability reliability evaluation of platform joint's type construction based on full-scale survey results] [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adishchev, V.G. Sebeshev, A.N. Narushevich, D.S. Shmakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 9–10. — P. 5–12.
2. N a r u s h e v i c h , A.N. Eksperimental'naya otsenka nesushchey sposobnosti platformennykh stykov, imeyushchikh pervonachal'nye defekty [The results of experimental research platform junctions with initial defects] [Text] / A.N. Narushevich, V.A. Bekker // Materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chtenii 9–11 aprelya 2009. — Kursk, 2009. — P. 151–155.
3. B a y k o v , V.N. Vzaimosvyaz' diagramy prochnosti dvukhosno szhatogo betona i kharakteristik $\sigma - \epsilon$ pri odnoosnom szhatii i rastyazhenii [The relationship diagram of the biaxial strength of the compressed concrete and characteristics of the $\sigma - \epsilon$ under uniaxial compression and tension] [Text] / V.N. Baykov // Beton i zhelezobeton. — 1991. — N 11. — P. 24–26.
4. M o r o z o v , Yu.B. Issledovaniya prochnosti i deformatsiy gorizontálnykh stykov stenovykh paneley [Research on the strength and deformation of horizontal joints of wall panels] [Text] / Yu.B. Morozov, G.F. Sedlovs // Issledovaniya prochnosti i raschet konstruktsiy mnogoetazhnykh zdaniy. — M. : MNIIEP, 1970. — P. 157–170.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 666.97.015.001.24

Ш.М. РАХИМБАЕВ, А.В. ПОЛОВНЕВА, Т.В. АНИКАНОВА

ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ И ПЕНОБЕТОНОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Наиболее распространенным способом интенсификации производства изделий из бетона и железобетона является тепловая обработка. В Российской Федерации и странах ближнего зарубежья тепловую обработку осуществляют при 80–90 °C. Это приводит к большому перерасходу энергетических ресурсов, так как при такой пропарке тратится до 20 % от всей энергии на производство строительных изделий и конструкций. Данная работа посвящена изучению возможности снижения энергозатрат на тепловую обработку путем уменьшения температуры с 80–90 до 40 °C. Рассчитаны кинетические константы начальной скорости твердения, коэффициент торможения.

Ключевые слова: тепловая обработка, мелкозернистый бетон, пенобетон, кинетические константы, твердение.

Для учета температурного фактора твердения бетонов был проведен расчет кинетических констант начальной скорости твердения и коэффициента торможения. Их расчет производился по уравнению теории переноса [1]

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_{\text{top}} \cdot \tau,$$

где τ — время твердения (гидратации), сут;

σ — предел прочности при сжатии, МПа;

$(\tau/\sigma)_0$ — величина, обратная начальной скорости твердения, сут / МПа;

k_{top} — коэффициент торможения процесса твердения.

Начальная скорость U_0 характеризует интенсивность тепловыделения или твердения цементной системы в первые 1–2 ч тепловой обработки, а коэффициент торможения k_{top} — темп уменьшения скорости процесса во времени [2].

Необходимо стремиться увеличивать начальную скорость и уменьшать коэффициент торможения процессов тепловыделения и твердения.

Величины начальной скорости и коэффициента торможения, рассчитанные по уравнению теории переноса, позволяют оценить влияние температуры тепловой обработки на кинетические и диффузионные факторы, интенсификацию процессов твердения и структурообразования. Это дает также возможность сопоставить между собой результаты исследований разных авторов. В работе изучено влияние температуры тепловой обработки на кинетику твердения мелкозернистого бетона и пенобетона на цементном вяжущем.

Таблица 1. Изотермическое удельное тепловыделение цементов в бетонах, кДж/кг

Температура твердения, °C	Срок твердения, ч	Изотермическое удельное тепловыделение, кДж/кг					
		цемент					
		алексеевский	белгородский	ленинградский	вольский	себряковский	пикалевский
20	18	69,9	121,8	86,7	71,2	66,9	70,3
	24	94,2	137,8	110,5	92,5	84,6	93,8
	48	141,1	185,1	148,6	135,7	128,1	164,5
	72	161,2	213,1	176,7	164,9	144	193,5
	96	178,4	233,6	198,9	183,8	190,1	212,7
	120	191,3	252,1	217,3	203,5	209,4	229
	144	198	267,5	225,3	—	—	244,5
40	168	209,4	285,6	242,4	—	—	260
	6	59,5	108	96,7	54,4	64,5	100,1
	18	140,7	197,6	200,9	141,5	142,4	184,6
	24	161,2	219,8	231,1	162,9	169,2	213,1
	48	210,2	272,2	293,9	218,1	220,7	270,5
	72	239,1	308,2	328,3	249,1	246,2	299,4
	96	263,4	329,5	355,1	274,7	262,9	321,6
70	12	240,3	339,1	367,6	290,6	275,5	335,8
	144	297,3	348,8	380,6	304,4	285,9	349,2
	168	311,9	356,3	396,9	311,9	296	362,2
	5	89,6	151,9	114,3	73,7	88,8	—
80	9	144	196,8	167,5	151,6	139,4	515,2
	18	195,9	253,7	215,6	211,9	178,8	215,6
	24	213,1	217,3	231,1	231,9	198	238,7
	5			133,1			66,2
	9			195,5			160,8
	18			255,4			232,4
	24			276,8			257,5
	36			189,3			278,4

В табл. 1 приведены результаты исследований по определению количества адиабатического удельного тепловыделения цементов в бетонах, полученные Л.И. Чумадовой на шести портландцементах различного состава [3]. Бетонные смеси были изготовлены с расходом цемента 330 кг/м³, при В/Ц = 0,45 и осадке конуса 2 см.

Расчет начальной скорости твердения U_0 и коэффициента торможения производился по уравнению [1]. Результат приведен на рис. 1, 2.

В работе С.М. Трембицкого [4] приведена кинетика твердения бетона класса В15 при разных температурах (рис. 3).

По данным, приведенным на рис. 3, были рассчитаны кинетические константы твердения (рис. 4, 5).

Наряду с мелкозернистыми бетонами рассмотрим влияние условий твердения на рост прочности пенобетона [2] (табл. 2, рис. 6, 7).

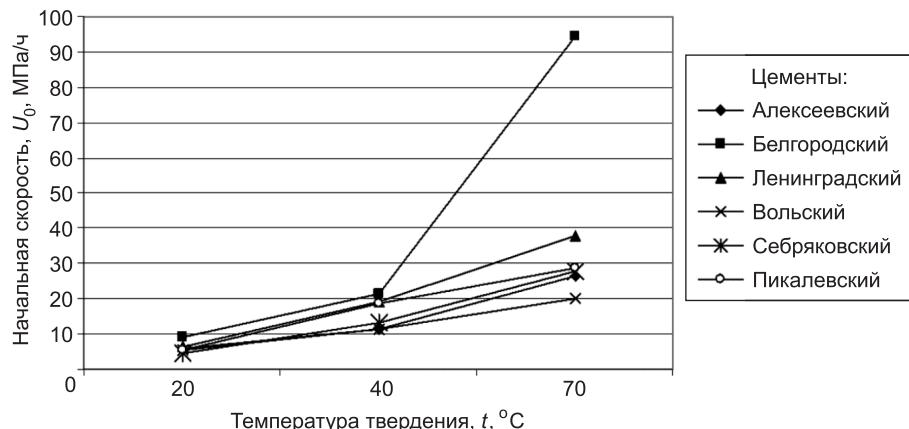


Рис. 1. График зависимости начальной скорости (U_0) тепловыделения от температуры тепловой обработки (t , °C) цементов мелкозернистого бетона на основе различных цементов

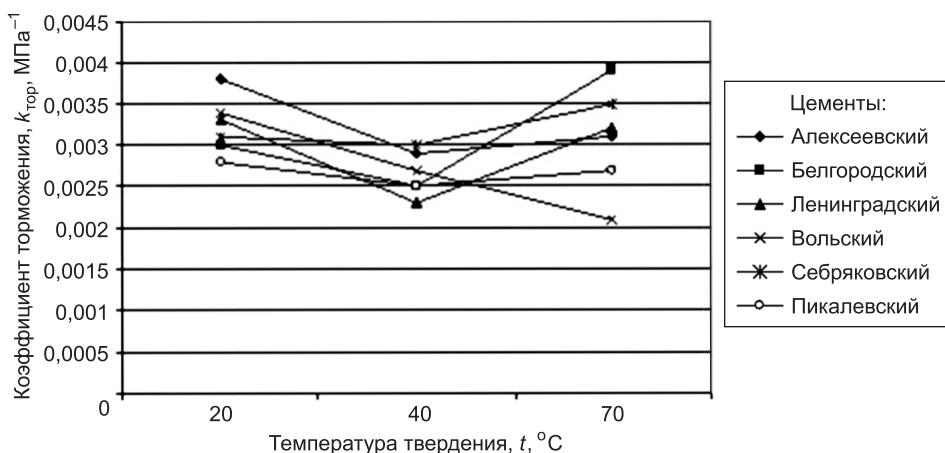


Рис. 2. График зависимости коэффициента торможения (k_{top}) тепловыделения от температуры твердения цементов (t , °C) (мелкозернистый бетон)

Обсуждение результатов исследований. На графике зависимости начальной скорости (U_0) тепловыделения от температуры тепловой обработки (t , °C) мелкозернистого бетона на основе различных цементов (см. рис. 1) видно, что начальная скорость тепловыделения всех исследуемых бетонов с повышением температуры от 20 до 70 °C интенсивно возрастает, особенно на основе цемента Белгородского завода.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента торможения (k_{top}) тепловыделения от температуры твердения цементов (t , °C) (мелкозернистый бетон). Рассмотрение этого графика показывает, что для всех цементов за исключением вольского коэффициент торможения при 40 °C имеет минимальное значение. Коэффициент торможения вольского цемента монотонно снижается от 20 до 70 °C.

На рис. 4, 6 представлена зависимость начальной скорости твердения от температуры среды для мелкозернистого бетона и пенобетона соответственно. С повышением температуры начальная скорость твердения

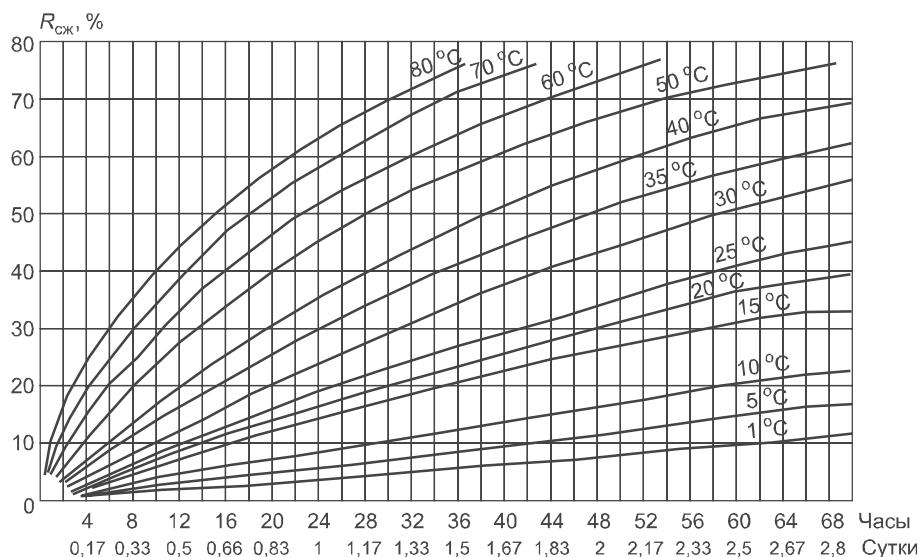


Рис. 3. Графики изменения прочности бетона B15 (M200) на портландцементе ПЦ 400 ДО, %, от марочной прочности при различной температуре выдерживания

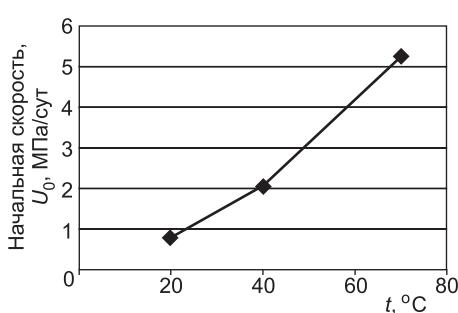


Рис. 4. График зависимости начальной скорости (U_0) от температуры твердения цементов (t , °C) (мелкозернистый бетон)

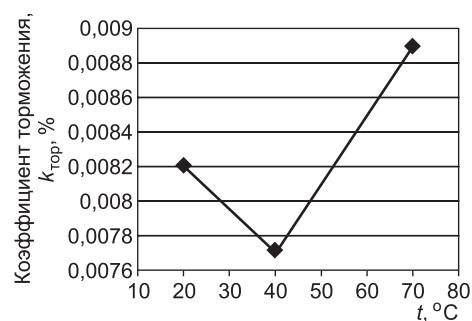


Рис. 5. График зависимости коэффициента торможения (k_{top}) от температуры твердения (t , °C) (мелкозернистый бетон)

плавно растет. Как видно из рис. 5, 6, коэффициент торможения твердения имеет минимальное значение при 40 °C.

Анализируя графики зависимости начальной скорости твердения и коэффициента торможения тепловыделения и твердения от температуры (рис. 1-6), можно отметить, что во всех случаях они имеют одинаковый характер как для мелкозернистого бетона, так и для пенобетона. Харак-

Таблица 2. Влияние тепловой обработки на кинетику твердения пенобетона

Возраст, сут	Прочность при сжатии, %, от 28-суточной прочности				
	температура тепловой обработки, °C				
	22	40	50	60	70
3	26	50	78	145	150
7	47	115	162	164	152
28	100	234	234	175	152
56	149	250	250	177	158

тер зависимости кинетических констант тепловыделения и твердения цемента от температуры мало зависит от минерального состава цемента и плотности бетона. Начальная скорость твердения плавно возрастает с повышением температуры. Коэффициент торможения имеет минимальное значение при температуре 40 °C. Это говорит о том, что прочность материала будет сильнее всех увеличиваться во времени именно при этой температуре. Исходя из этого можно предположить, что пенобетон, подвергшийся тепловой обработке при температуре 40 °C, будет иметь высокие прочностные показатели в отдаленные сроки твердения.

Такое поведение цементов может быть обусловлено тем, что в нем во время предварительной выдержки образуется существенное количество этtringита, который в сравнительно жидкой системе кристаллизуется без отрицательного влияния на прочность. Его кристаллы имеют игольчатую форму, которые впоследствии будут армировать цементную матрицу бетона.

Когда производится пропарка изделий при 40 °C, этtringит остается в той же форме и не разлагается, а при высокотемпературной обработке с температурой теплоносителя 80 °C и выше он разлагается до моносульфатной формы гидросиликата кальция. После отгрузки на склады может образоваться вторичный этtringит, который оказывает отрицательное действие на прочность изделий, пропаренных при 80–90 °C.

Таким образом, переход тепловой обработки от 80–90 к 40 °C позволит не только значительно снизить расходы на нее, но и улучшить кинетику твердения бетонов как мелкозернистых, так и пенобетонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Рахимбаев, Ш.М. Скорости некоторых процессов технологии искусственных строительных конгломератов [Текст] / Ш.М. Рахимбаев // Проблемы материаловедения и совершенствование технологии производства строительных изделий. — Белгород : БТИСМ, МИСИ, 1990. — С. 184.
- Аниканова, Т.В. К вопросу о применении тепловой энергии для интенсификации процессов твердения поробетонов [Текст] / Т.В. Аниканова, Ш.М. Рахимбаев,

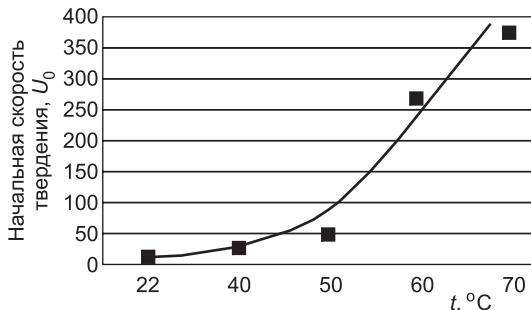


Рис. 6. График зависимости начальной скорости (U_0) от температуры твердения цементов (t , °C) (пенобетон)

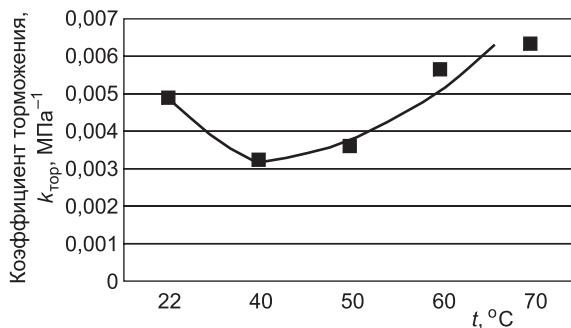


Рис. 7. График зависимости коэффициента торможения (k_{top}) от температуры твердения (t , °C) (пенобетон)

- А.В.Половнева // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. — 2014. — № 6. — С. 66–70.
3. Миронов, С.А. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении [Текст] / С.А. Миронов. — М. : Стройиздат, 1973. — 96 с.
4. Трембецкий, С.М. Энергоэффективные режимы теплотехнологии бетона и методы их реализации [Текст] / С.М. Трембецкий // Бетон и железобетон. — 2005. — № 9. — С. 26–28.

РАХИМБАЕВ Шарк Матрасулович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПОЛОВНЕВА Анастасия Валерьевна, асп.; E-mail: polovnev4ik@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

АНИКАНОВА Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 28.11.14

Rakhimbaev Shark Matrasulovich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Polovneva Anastasiya Valeryevna, post-graduate student; E-mail: polovnev4ik@yandex.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Anikanova Tatyana Viktorovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

FEATURES OF FINE-GRAINED AND FOAM CONCRETES HARDENING AT VARIOUS TEMPERATURES

The most popular way of the production process intensification of concrete and reinforced concrete products is thermal treatment. In the Russian Federation and neighboring countries thermal treatment is carried out at 80–90 °C. It leads to the big overspend of energy resources since at such steaming about 20 % of all energy for production of building products and constructions are spent. This work is devoted to the studying of the possibility of energy consumption decrease on thermal treatment by reduction of temperature from 80–90 to 40 °C. Designed kinetic constants of initial speed of hardening process, braking coefficient.

Key words: thermal treatment, fine-grained concrete, foam concrete, kinetic constants, hardening.

REFERENCES

1. Rakhimbaev, Sh.M. Speeds of some processes of technology of artificial construction conglomerates [Text] / Sh.M. Rakhimbaev // Problems of material science and improvement of the production technology of construction products. — Belgorod : BTISM, MISI, 1990. — P. 184.
2. Anikanova, T.V. On the application of heat to intensify the processes of porous concrete curing [Text] / T.V. Anikanova, Sh.M. Rakhimbaev, A.V. Polovneva // Bulletin of Belgorod Shukhov State Technological University. — 2014. — N 6. — P. 66–70.
3. Mironov, S.A. The growth of concrete strength by steaming and subsequent hardening [Text] / S.A. Mironov. — M. : Stroyizdat, 1973. — 96 p.
4. Trembitskiy, S.M. Energy-efficient modes of heat technologies and methods and concrete implementation [Text] / S.M. Trembitskiy // Concrete and reinforced concrete. — 2005. — N 9. — P. 26–28.

УДК 941.542:539.4

Г.И. ОВЧАРЕНКО, Е.Г. АВВАКУМОВ, А.В. ПЕСОЦКИЙ,
А.В. ВИКТОРОВ, А.О. САДРАШЕВА

ВЛИЯНИЕ ВИДА ТОНКОИЗМЕЛЬЧЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Часть 1

Исследована прочность камня из теста нормальной густоты из смешанных цементов с добавками на основе кремнеземов (кварц, микрокремнезем), корунда, силикатов кальция (природный и искусственный волластониты, ранкинит), гидросиликатов кальция (тоберморит, ксонотлит), техногенных шлаков (топливные высококальциевые, каменноугольные кислые, доменные). Показана зависимость прочности камня от тонкости минерально-гого наполнителя и особенностей кристаллохимического строения кремнекислородного аниона добавок. Предложена новая классификация минеральных добавок для цемента.

Ключевые слова: смешанные цементы, минеральные добавки, взаимосвязь прочности, дисперсности и тонкой структуры добавок, новая классификация.

Введение. В технологии вяжущих веществ широко применяются различные минеральные добавки. Как правило, это активные минеральные добавки (АМД), связывающие при твердении известняк. Однако в последние годы появились публикации [1, 2], указывающие на то, что инертные в химическом отношении к минералам цементного камня кристаллические минералы (например, волластонит, диопсид) при обычном и очень тонком измельчении могут оказывать положительный эффект на твердение цемента. Вместе с тем часто в публикациях эффект волластонита не сравнивается с эффектом от других добавок в этих же условиях. Не предпринимались попытки выявления родственных по механизму и эффекту действия других подобных веществ. Кроме того, в публикациях не была выявлена роль условий твердения и добавок-пластификаторов для таких цементов. В связи с этим была исследована группа минеральных добавок, которые, по нашим оценкам, способны оказать влияние на формирование C–S–H-геля цементного камня и дать ответы на отмеченные вопросы.

Влияние волластонита авторами [1, 2] объяснялось вероятной родственностью структур и воздействием поверхности, так как при прокаливании C–S–H-геля цементного камня тоже образуется волластонит. Однако необходимо отметить, что основные элементы структуры C–S–H-геля цементного камня можно выделить в структурах различных других минералов и материалов.

Известно, что гель C–S–H цементного камня представлен аморфными образованиями, имеющими в своей структуре портландитовые слои, закрытые («бронированные») с обеих сторон «обрывками» цепей кремнекислородных тетраэдров. Эти цепи короткие, длина их часто не

превышает одного-двух сдвоенных тетраэдров (одной-двух диортогрупп $[Si_2O_7]$). Две диортогруппы могут «сшиваться» отдельным тетраэдром и тогда образуется пентагруппа. Средний тетраэдр в ней называется мостиковым и в нем вместо кремния может находиться алюминий. Бесконечная цепочка из пентагрупп будет идентична волластонитовой цепочке. Подробный анализ структур различных гидросиликатов кальция дал I.G. Richardson [3].

Диортогруппы $[Si_2O_7]$ можно выделить во многих водных и безводных минералах-силикатах, а также в некоторых силикатных материалах. Пример, кристаллические гидросиликаты кальция тоберморит $Ca_5Si_6O_{17} \cdot 5H_2O$ и ксонотлит $Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$ в качестве основы структуры содержат ленты из диортогрупп. В ранкините $Ca_3[Si_2O_7]$ диортогруппа является основным изолированным элементом структуры. В шлаковых стеклах (доменный гранулированный и топливный высококальциевый) диортогруппа содержится до 70 %. Поэтому эти минералы и материалы были взяты в качестве добавок к цементу наряду с кварцем, корундом, микрокремнеземом — для сравнения.

Сырьевые материалы. В качестве минеральных добавок применялись отмеченные выше кварцевый песок с содержанием кварца около 98 %, микрокремнезем ферросплавного производства завода «Кузнецкие ферросплавы» с содержанием аморфного SiO_2 87 %, корунд с содержанием Al_2O_3 99 %, топливный высококальциевый шлак от сжигания канского-ачинских углей на ТЭЦ-3 г. Барнаула с содержанием $[Si_2O_7]$ 58 %, доменный гранулированный шлак (ДГШ) ЗАПСИБа, содержащий $[Si_2O_7]$, 62 %, природный волластонит месторождения близ пос. Сейка, Республика Алтай с содержанием минерала около 95 %. Также применяли добавки, синтезированные в лабораторных условиях. Это тоберморит, полученный 150-часовой автоклавной обработкой известково-кварцевой смеси, ксонотлит, полученный по такой же технологии, но с отношением CaO к SiO_2 равным 1, ранкинит, полученный дегидратацией предварительно автоклавированной смеси соответствующего ранкинита состава, и синтетический волластонит, полученный прокаливанием тоберморита при 1000 °C. В качестве вяжущего использовались цементы ПЦ400 Д20 (аналог цемента в [1, 2]) и ПЦ500 ДО Искитимского цементного завода.

Методика эксперимента. Для проведения эксперимента добавки размалывались в планетарной мельнице АГО-3 при одинаковых условиях помола и имели средний диаметр 50 % тонкой фракции, изменяющийся от 5 до 25 мкм (см. таблицу). Самое тонкое измельчение получили такие добавки, как кварцевый песок и доменный гранулированный шлак. Напротив, гидросиликаты кальция (тоберморит, ксонотлит) и добавки, полученные дегидратацией гидратов (синтетический волластонит, ранки-

Средний диаметр 50 % тонкой фракции измельченного материала, мкм

Материал	Доменный гранулированный шлак	Кварцевый песок	Природный волластонит	Топливный шлак	Корунд	Микрокремнезем	Синтетический волластонит	Ранкинит	Тоберморит	Ксонотлит
Размер частиц	5,14	5,27	5,57	6,3	6,86	9,25	14,97	16,32	18,71	25,28

нит), имели повышенную крупность из-за эффекта контактного «спаивания» при измельчении (контактно-конденсационный эффект).

Для определения прочности при сжатии формовались образцы-кубики размером $2 \times 2 \times 2$ см. Образцы изготавливались из теста нормальной густоты и твердели при нормальных условиях (20°C , относительная влажность 100 %) или при пропаривании при 80°C , по режиму 3 ч + 6 ч + 3 ч. Прочность испытывалась на 3-и, 28-е сутки и через 3 месяца для образцов, твердевших в нормальных условиях (НУ), а для образцов, прошедших тепловлажностную обработку (ТВО), сразу после пропаривания и спустя 28 сут хранения при НУ. Вяжущее изготавливалось из портландцемента с заменой 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 и 30 % тонкодисперсными минеральными добавками. Или в отдельных экспериментах — только 10 %. Контролем являлся состав 100 % ПЦ.

Приблизив размеры исследуемых материалов к размерам, описанным в [1], был исследован эффект, при котором добавление минеральных добавок, имеющих среднеобъемный размер частиц 50 % тонкой фракции в пределах 5–6 мкм, наиболее значительно повышает прочность цементного камня.

Результаты и обсуждение. Анализируя графики зависимости прочности от размера вводимых в цемент добавок, можно выделить несколько закономерностей.

Первая — при одинаковом содержании минеральных добавок прочность цементов изменяется обратно пропорционально среднему диаметру их частиц (рис. 1).

Вторая — наиболее эффективно на прочность цемента влияют добавки, имеющие в своей структуре элементы структуры С–S–Н-геля, которая включает в качестве основного элемента диортогруппу $[\text{Si}_2\text{O}_7]$. Это

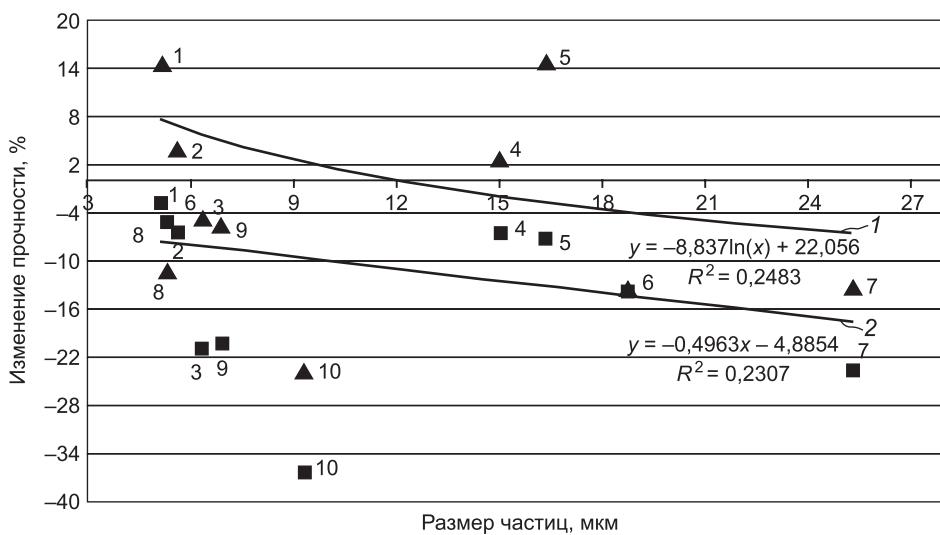


Рис. 1. Зависимость относительной прочности цементного камня после твердения в НУ в течение 3 (линия 1) и 28 сут (линия 2) от размера частиц добавок при их содержании 15 % (цемент ПЦ400 Д20)

1 — ДГШ; 2 — природный волластонит; 3 — топливный шлак; 4 — синтетический волластонит; 5 — ранкинит; 6 — тоберморит; 7 — ксонотлит; 8 — кварцевый песок; 9 — корунд; 10 — микрокремнезем

относится к доменному шлаку (№ 1), ранкиниту (№ 5), природному и синтетическому волластониту (№ 2 и 4). Эффект от тоберморита и ксенофилита меньший, но здесь, вероятно, оказывает влияние крупность порошков. Проведенный количественный рентгеновский анализ по методу Ритвелда показал, что доля введенного волластонита при гидратации не изменяется, т.е. он не участвует в химических реакциях при твердении цемента.

Введение таких добавок, как кварцевый песок, корунд и микрокремнезем значительно снижает прочность исследуемых образцов. Поэтому третья закономерность сводится к тому, что цементы с высокодисперсными кремнеземами (молотый кварц, микрокремнезем) или корундом (скорее аморфизированным глиноземом) показывают более низкую прочность, несмотря на то, что в процессе гидратации связывают известь гидролизующихся клинкерных силикатов и образуют дополнительное количество геля C-S-H и других гидратов. На графике (см. рис. 1) эти добавки кучно располагаются в нижнем левом углу и показывают наименьшие результаты по прочности (№ 8–10). В то же время ДГШ также связывает известь, и его эффект мог бы быть приписан именно этому явлению. Но за 3 сут гидратации и количество извести мало, и пущелановая реакция ничтожна. Поэтому приоритет в росте прочности для ДГШ следует отдать именно тонкой структуре его стеклофазы.

Выявленные закономерности подтверждаются и в эксперименте с ПЦ500 ДО (рис. 2), где отражается влияние количества воды затворения на прочность цемента с добавками.

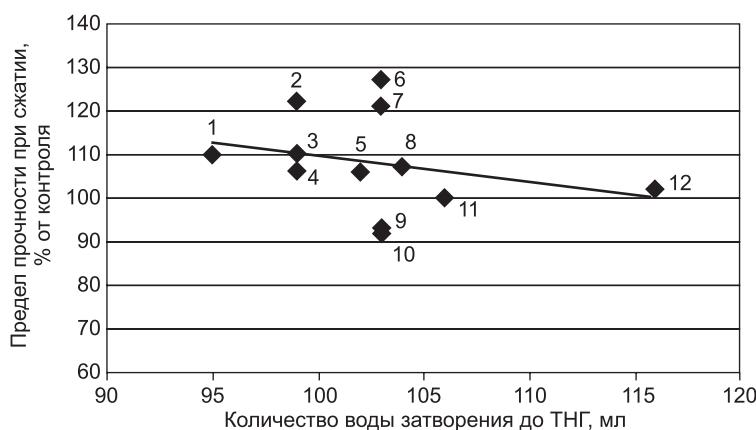


Рис. 2. Зависимость прочности цементного камня на 28-е сутки нормального твердения с 10 % минеральных добавок от ТНГ (цемент ПЦ500 ДО)

1 — корунд; 2 — ДГШ; 3 — ЗШО; 4 — высококальциевая зола; 5 — тоберморит; 6 — природный волластонит; 7 — ранкинит; 8 — синтетический волластонит; 9 — топливный шлак; 10 — кварцевый песок; 11 — контроль; 12 — ксенофиллит

Из рис. 2 видно, что добавки ДГШ (№ 2), природного волластонита (№ 6), ранкинита (№ 7) существенно отклоняются от пропорциональной зависимости в положительную область, так же как и молотый кварц (№ 9) — в отрицательную область.

Полученные данные позволяют предложить новую классификацию минеральных добавок для цемента. Если добавки, связывающие известь, в том числе и при гидратации и твердении цемента, мы называем активные — АМД, то добавки, не участвующие в химических реакциях гидратации, но обеспечивающие прирост прочности цемента за счет особенностей их тонкой (кристаллохимической) структуры, также следует назвать активными. Для того чтобы отличить одну группу добавок от другой, предлагается первые назвать «химически активные минеральные добавки — ХАМД», а вторые — «структурно-активные минеральные добавки — САМД». Добавки, обладающие и тем, и другим свойством (например, доменный граншлак), следует назвать «структурно химически активные минеральные добавки — СХАМД».

Выводы. 1. Неактивные минеральные добавки (несвязывающие известь) могут существенно влиять на прочность смешанного цемента. Наиболее эффективно влияют добавки, имеющие в своей структуре элементы структуры С—S—Н-геля, содержащие в качестве основного элемента диортогруппу $[Si_2O_7]$, или элементы структуры, в которых легко выделяются диортогруппы. Это ранкинит, природный и синтетический волластониты. Доменный граншлак, содержащий около 60 % $[Si_2O_7]$, проявляет наибольшую активность, однако «структурный» эффект от этой добавки трудно отделить от пущоланового эффекта.

2. Эффективность влияния добавок, содержащих диортогруппу, на прочность смешанных цементов пропорциональна их дисперсности.

3. Тонкодисперсные кремнеземы (кварц, микрокремнезем), а также корунд в качестве добавок к цементам значительно уменьшают прочность вяжущего.

4. Предложена новая классификация минеральных добавок для цемента, включающая такие их разновидности, как химически активные, структурно-активные и структурно химически активные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердов, Г.И. Влияние минеральных добавок на свойства цементных материалов [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина, Н.А. Машкин // Современные научно-исследовательские технологии. — 2011. — № 1. — С. 49–52.
2. Бердов, Г.И. Влияние волластонита на прочность цементного камня из длительно хранившегося портландцемента [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Строительные материалы : Науч.-техн. и производств. журн. — 2011. — № 1. — С. 48–49.
3. Richardson, I.G. The calcium silicate hydrates [Текст] / I.G. Richardson // Cement and Concrete Research. — 2008. — Vol. 38. — P. 137–158.

ОВЧАРЕНКО Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.

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

АВВАКУМОВ Евгений Григорьевич, д-р хим. наук, проф.

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

ПЕСОЦКИЙ Артем Владимирович, асп.

Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул

ВИКТОРОВ Артем Владимирович, асп.

Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул

САДРАШЕВА Айжана Олеговна, асп.

Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул

Получено после доработки 17.11.14

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Avvakumov Evgeniy Grigorevich, doctor of chemical sciences, professor, Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

Pesotskiy Artem Vladimirovich, post-graduate student, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Viktorov Artem Vladimirovich, post-graduate student, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Sadrasheva Ayzhana Olegovna, post-graduate student, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

EFFECT OF THE TYPE OF FINELY GRINDING MINERAL ADDITIVES ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE

Part 1

Strength of the stone from the cement paste of mixed cements based on silica (quartz, silica fume), corundum, calcium silicates (natural and artificial wollastonite, rankinite), hydrosilicates calcium (tobermorite, xonotlite), slags (granulated blast furnace, high calcium coal) are investigated. The dependence of the strength of the stone from the fineness of mineral filler and the features of crystal-chemical structure of silicon-oxygen anion additives is shown. A new classification of mineral additives for cement is given.

Key words: blended cements, mineral admixtures, relationship strength, fineness and the fine structure of additives, new classification.

REFERENCES

1. Berdov, G.I. Influence of additives on the properties of cement materials [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina, N.A. Mashkin // Modern high technologies. — 2011. — N 1. — P. 49–52.
2. Berdov, G.I. Effect of wollastonite on the strength of cement stone long-term storage of portland cement [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina // Construction Materials: Science and technology and production magazine. — 2011. — N 1. — P. 48–49.
3. Richardson, I.G. The calcium silicate hydrates [Text] / I.G. Richardson // Cement and Concrete Research. — 2008. — Vol. 38. — P. 137–158.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 666.342:62-52

А.И. КУДЯКОВ, А.С. АПКАРЬЯН, В.Г. ХРИСТЮКОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ

На основе стеклобоя, глины и органических добавок разработан гранулированный теплоизоляционный стеклокристаллический материал и технология его получения. Рассмотрены физико-химические процессы при обжиге гранулированного материала. Установлены основные параметры, влияющие на устойчивость процесса вспучивания стекломассы и образования гранул с мелкими закрытыми порами с остеклованной поверхностью. Разработана автоматическая система управления технологическим процессом обжига гранулированной пеностеклокерамики.

Ключевые слова: стеклобой, отходы, пеностеклокерамика, гранулы, плотность, температура, теплоизоляция, печь, давление, газ, исполнительный механизм, регулятор, клапан, термометр, автоматическое регулирование.

Производство многих строительных материалов для ограждающих конструкций зданий осуществляется с использованием высокотемпературных технологий, т.е. процессов обжига в печах. Авторами на основе стеклобоя, глины и органических добавок разработан и получен патент на новый теплоизоляционный гранулированный стеклокристаллический материал (пеностеклокерамика), обладающий следующими свойствами: насыпная плотность 260–290 кг/м³, прочность гранул 1,74–2,5 МПа · с, коэффициент теплопроводности 0,075–0,085 Вт/(м · °C), водопоглощение 2,6–3,0 % по массе [1, 2]. Исследованы технологические процессы и предложены практические рекомендации его изготовления. Для обеспечения стабильного качества гранулированной пеностеклокерамики, снижения удельного расхода топлива и повышения производительности печей необходимо управлять процессами (режимами) в тепловом агрегате.

Целью работы является автоматизация технологического процесса обжига гранулированной пеностеклокерамики во вращающейся печи.

Общая задача управления технологическим процессом обжига во вращающейся печи заключается в нормализации теплового режима и поддержания его в процессе работы с помощью средств контроля и управления [3].

Обжиг гранулированной пеностеклокерамики — сложный, ответственный и энергоемкий передел. Общие энергозатраты на производство гранул распределяются следующим образом: подготовка сырья — 20 %, обжиг — 79 %, прочие — 1 %. Поэтому оптимизация процесса обжига,

энергозатрат и затрат топлива имеет важное значение. Максимальная температура, при которой происходит обжиг сырцовых гранул, — 830–850 °C, период вспенивания и порообразования — 4–6 мин. Конечная температура готовых изделий — 90 °C. Длина печи 18 м. Топливо — газ.

Вращающаяся печь обжига гранулированной пеностеклокерамики в зависимости от характера процессов, протекающих в обжигаемом материале на различных ее участках, условно можно разделить на зоны сушки и обжига (вспенивания) и охлаждения. При высокотемпературном обжиге гранул пеностеклокерамики происходят физико-химические процессы в окислительно-восстановительной среде.

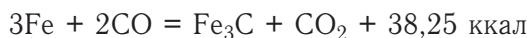
Последовательность химических процессов в соответствии с установленным температурным режимом обжига зернистого материала представлена на рис. 1.

Загрузка сырцовых гранул в печь обжига производится при температуре 280–350 °C. В этом диапазоне температур имеет место эндотермический эффект, сопровождающийся выделением влаги и газообразных углеводородов.

С повышением температуры до 500 °C происходят экзотермические реакции окисления оксида углерода и углерода:



При температуре 520–570 °C примеси железа и оксидов железа взаимодействуют с оксидом углерода



и железа с серой

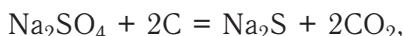


При температуре 580–600 °C происходит эндотермическая реакция диссоциации газообразных углеводородов.

Эндотермические эффекты при 620–700 °C объясняются взаимодействием неразложившихся карбонатов натрия с SO_2



и восстановлением сульфатов в присутствии SiO_2 , который находится как в составе стеклопорошка, так и глины:



При подъеме температуры на 70–110 °C выше температуры размягчения сульфата натрия (740–760 °C), находящегося в составе стекла, он вступает в реакцию с углеродом кокса и древесных опилок

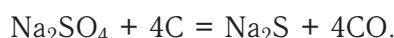


Схема реакции восстановления шестивалентной серы, содержащейся в стекле, до серы сульфидной при синтезе пеностеклокерамики имеет вид:



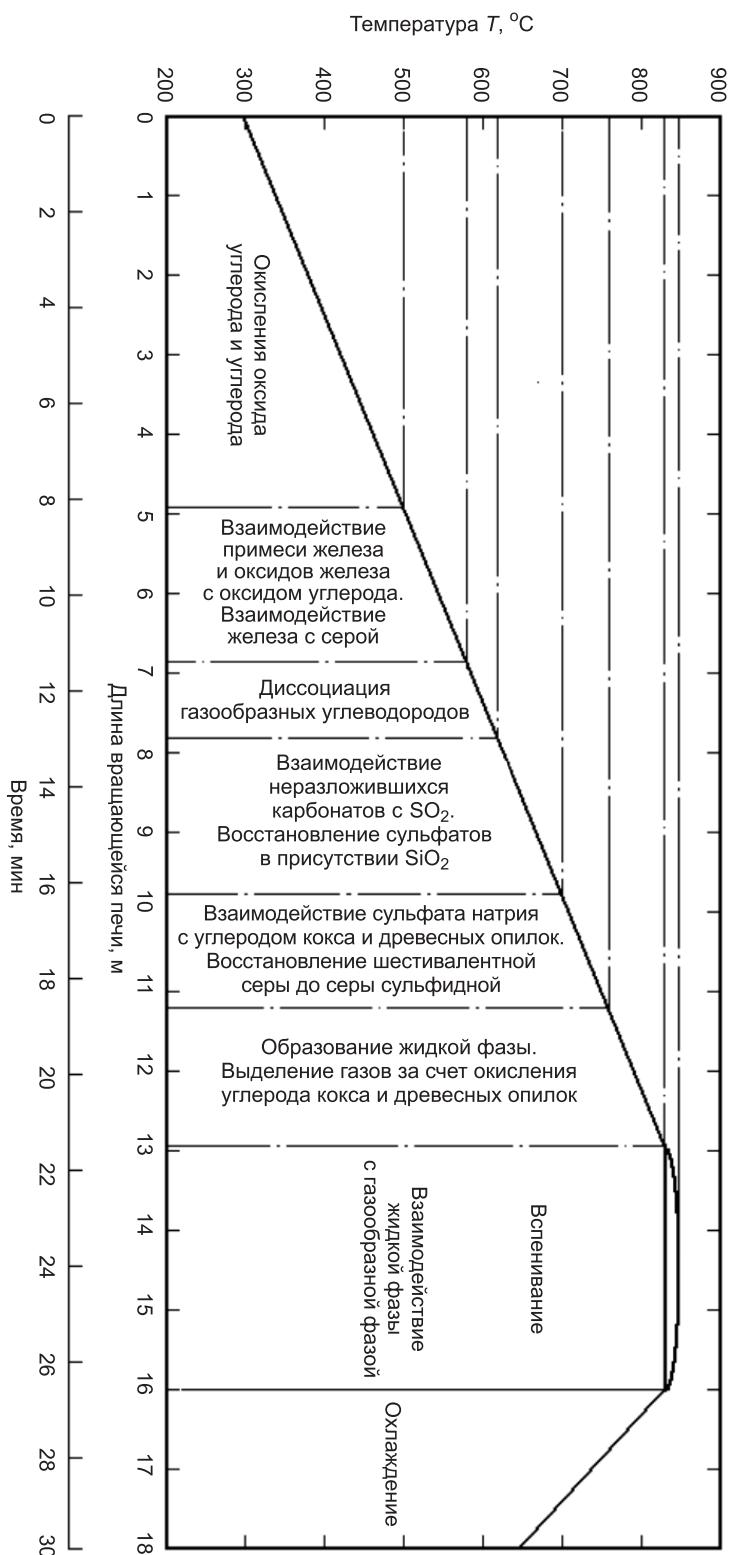
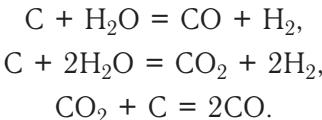


Рис. 1. Термопрофиль печи и последовательность химических процессов при обжиге зернистого материала

Важную роль для процесса газообразования играет влажность образцов сырцовых гранул, которая для предлагаемого рационального состава шихты составляет 10 %. Наличие влаги способствует выделению газов в области температур 740–830 °C за счет окисления углерода согласно реакций:



Система контроля и управления технологическим процессом обжига гранулированной пеностеклокерамики во вращающейся печи представлена на рис. 2.

В блок преобразования и программной обработки сканированных сигналов температуры наружной поверхности печи 7 вводятся исходные данные, включая критерии управления и значения параметров, контролируемых блоками 5 и 10. В блоке преобразования и программной обработки 7 с помощью математической модели, адекватной технологическому процессу, по разработанному алгоритму для заданных критериев управления осуществляется оперативный расчет оптимальной температуры гранул в функции длины печи. Одновременно рассчитываются значения уставок для регуляторов 2, 3 и 4, которые сохраняются в памяти блока 5. В блоке преобразования и программной обработки 7 с помощью математической модели, адекватной технологическому процессу, для заданных

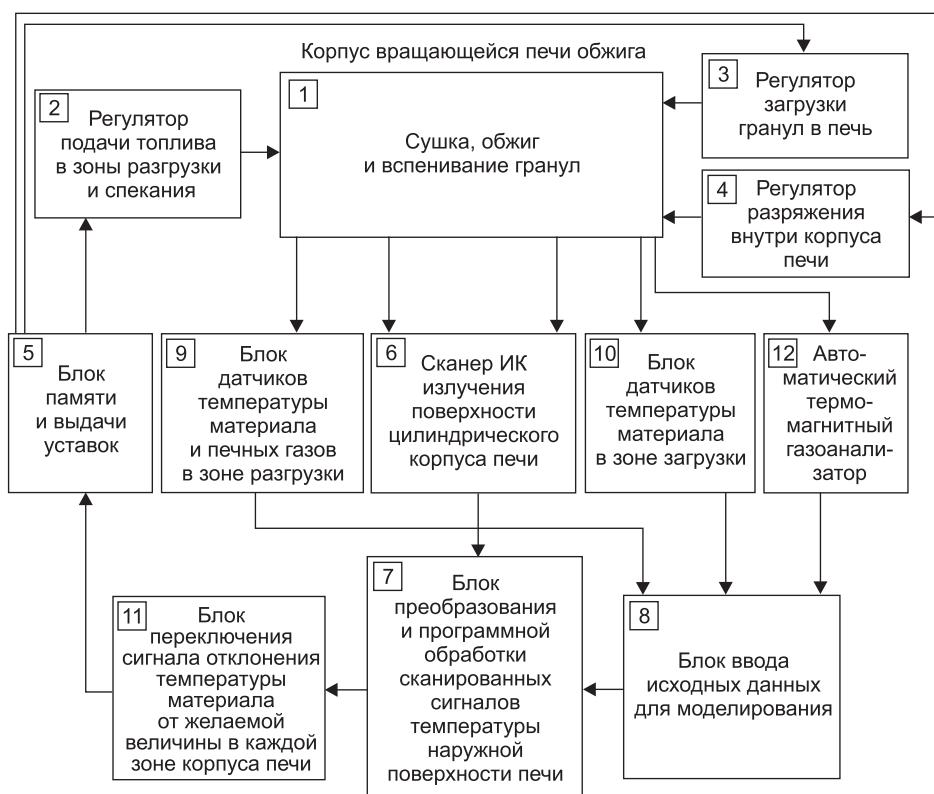


Рис. 2. Структурная схема системы управления процессом обжига гранулированной пеностеклокерамики во вращающейся печи

критериев управления осуществляется оперативный расчет оптимальной температуры гранул в функции длины печи в соответствии с температурными зонами (см. рис. 1) и концентрации кислорода. При этом синхронно по зонам осуществляется расчет как абсолютной ошибки отклонения заданной температуры материала от идентифицированной (ΔT), так и концентрации кислорода в печи 12. Полученные значения абсолютной ошибки отклонения ΔT и содержание кислорода в печи через блоки 11 и 5 поступают на регуляторы 2, 3 и 4 соответственно. Согласно заданному закону регулирования управляющего воздействия по методологии ТАР (ПИ или ПИД), рассчитываются корректирующие воздействия [4, 5].

Выводы. Предложенная система контроля и управления технологическим процессом обжига гранулированной пеностеклокерамики обеспечивает высокую точность поддержания температур и газовой среды по всей длине печи. Это способствует увеличению срока службы элементов печи (корпуса, футеровки), обеспечивает изготовление гранулированной пеностеклокерамики с заданными теплофизическими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2374191 РФ, МПК C03C 11/00. Способ изготовления пеностеклокерамики [Текст] / А.С. Апкарьян, Е.П. Абакумов, В.Г. Христюков. — Заявл. 18.12.2006; опубл. 27.11.2009.
2. А п к а р ь я н, А.С. Теплоизоляционные материалы. Пеностеклокерамика. Оптимизация теплофизических процессов [Текст] : монография / А.С. Апкарьян, А.И. Кудяков. — Томск : ТУСУРа, 2013. — С. 216.
3. Л и с и е н к о, В.Г. Вращающиеся печи. Теплотехника, управление и экология [Текст]: справ. изд. В 2-х кн. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Шероков, М.Г. Ладыгичев. — М. : Теплотехник, 2004.
4. Б а р л а с о в, Б.З. Наладка приборов и систем автоматизации [Текст] / Б.З. Барласов, В.И. Ильин. — М. : Вышш. школа, 1985. — С. 64.
5. Пат. 2232959 РФ, МПК F27B7/00; F27D19/00. Система управления процессом обжига материала во вращающейся печи [Текст] / З.Г. Салихов, В.И. Шубин, А.А. Бекаревич, К.З. Салихов. — № 2002102511; заяв. 01.02.2002; опубл. 20.07.2004.

*КУДЯКОВ Александр Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kudyakov@tsuab.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

АПКАРЬЯН Афанасий Saakovich, канд. техн. наук, доц.; E-mail: asaktc@ispms.tsc.ru, руководитель Филиала научно-образовательного центра ТГУ по «нанотехнологиям»; Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

*ХРИСТИЮКОВ Владимир Григорьевич, доц.; E-mail: tec@main.tusur.ru
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

Получено 10.11.14

Kudyakov Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kudyakov@tsuab.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Apkaryan Afanasy Saakovich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: asaktc@ispms.tsc.ru, head of the Branch Scientific-educational Center TSU on «Nanotechnology» Institute of strength physics and materials science, Tomsk Scientific Center (IFPM SB RAS); Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia

Chistyukov Vladimir Grigoryevich, assistant professor; E-mail: tec@main.tusur.ru, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FIRING GRANULATED FOAM GLASS CERAMIC

Based on broken glass, clay and organic additives granular insulating glass crystalline material and technology of its receipt is developed. The effect of the basic physical characteristics of the components of the charge on the process of pore formation is studied. According to the research results, the basic parameters affecting the sustainability of the swelling glass are specified. Rational charge composition, thermal and gas synthesis mode, are chosen so that the partial pressure of gases is below the surface tension of the melt. This enables the formation of granules with small closed pores and vitrified surface. Developed automatic control system of technological process of burning granulated foamed glass ceramic.

Key words: broken glass, wastes, foam glass ceramic, granular, density, temperature, thermal insulation, furnace, pressure, gas, actuator, controller, valve, thermometer, automatic regulation.

REFERENCES

1. Patent № 2374191, IPC S03S 11/00. A method of manufacturing foam glass ceramic [Text] / A.S. Apkaryan, E.P. Abakumov, V.G. Chistyukov. — Appl. 18.12.2006; publ. 27.11.2009.
 2. Apkaryan, A.S. Insulation materials. Protelateridae. Optimization of thermal processes [Text]: monograph / A.S. Apkaryan, A.I. Kudyakov. — Tomsk : TUSUR, 2013. — P. 216.
 3. Lisienko, V.G. Rotary kilns. Heat engineering, management and ecology [Text] / V.G. Lisienko, Ya.M. Sherokov, M.G. Ladygichev. — M. : Teplotekhnik, 2004.
 4. Barlasov, B.Z. Adjustment devices and automation systems [Text] / B.Z. Barlasov, V.I. Ilyin. — M. : Graduate School, 1985. — P. 64.
 5. Patent № 2232959 RF, IPC F27B7/ 00; F27D19 / 00. The process control system of the material during the firing of the rotary kiln [Text] / Z.G. Salikhov, V.I. Shubin, A.A. Bekarevich, K.Z. Salikhov. — N 2002102511; appl. 01.02.2002; publ. 20.07.2004.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.511:533.6

К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА, Е.И. ТОЛМАЧЕВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СПЕКТРЕ ДЕЙСТВИЯ КРУГЛОГО МЕСТНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ОТСОСА-РАСТРУБА*

Сообщение 3. Динамика пылевых частиц

Приводятся вычислительные алгоритмы расчета предельных траекторий пылевых частиц в спектре действия местного вентиляционного отсоса-раструба. Определяются объемы аспирации и коэффициенты улавливания пылевых частиц разных фракций в зависимости от длины и угла раскрытия раструба. Делается вывод о наиболее эффективном круглом отсосе-раструбе.

Ключевые слова: местный вентиляционный отсос, предельные траектории, метод дискретных вихрей.

Эта статья является продолжением сообщений 1 и 2 [1, 2]. Нумерация формул и рисунков продолжается.

5. Динамика пылевых частиц в спектре действия круглого отсоса-раструба в неограниченном пространстве. Траектории пылевых частиц строились с использованием дифференциального уравнения ее динамики [3]:

$$\frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p \vec{g} - \psi \chi S_m \rho_a \frac{|\vec{v}_p - \vec{v}_a| \cdot (\vec{v}_p - \vec{v}_a)}{2}, \quad (7)$$

где \vec{v}_a — скорость воздуха;

ρ_a — плотность воздуха;

\vec{v}_p — скорость частицы;

ρ_p — плотность частицы;

d_e — эквивалентный диаметр частицы;

\vec{g} — ускорение свободного падения;

$S_m = \pi d_e^2 / 4$ — площадь миделевого сечения частицы;

χ — коэффициент ее динамической формы;

ψ — коэффициент сопротивления воздуха, вычисляемый по формулам Стокса, Клячко, Адамова:

$$\psi = \begin{cases} 24 / Re, & \text{если } Re < 1, \\ 24(1 + 1 / 6 \cdot Re^{2/3}) / Re, & \text{если } 1 \leq Re < 10^3, \\ 24 / Re \cdot (1 + 0,065 Re^{2/3})^{1.5}, & \text{если } Re \geq 10^3, \end{cases} \quad (8)$$

где $Re = \frac{\rho_a |\vec{v}_p - \vec{v}_a| d_e}{\mu}$, μ — коэффициент динамической вязкости воздуха.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-41-08005_офи_м) и Президента РФ (проект МК-103.2014.1).

Уравнение (7) преобразуем к системе обыкновенных дифференциальных уравнений следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dv_{px}}{dt} = -\frac{3\Psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |v_{px} - v_{ax}| (v_{px} - v_{ax}), \\ \frac{dx}{dt} = v_{px}, \\ \frac{dv_{py}}{dt} = -g - \frac{3\Psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |v_{py} - v_{ay}| (v_{py} - v_{ay}), \\ \frac{dy}{dt} = v_{py}. \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) решается методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} y_1 &= x, \quad y_2 = y, \quad y_3 = v_{px}, \quad y_4 = v_{py}, \\ \dot{f}_1 &= y_3, \quad \dot{f}_2 = y_4, \quad \dot{f}_3 = -\frac{3\Psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |y_3 - v_{ax}| (y_3 - v_{ax}), \\ \dot{f}_4 &= -g - \frac{3\Psi\rho_a\chi}{4d_e\rho_p} |y_4 - v_{ay}| (y_4 - v_{ay}). \end{aligned}$$

Таким образом, алгоритм решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (9) состоит из следующих шагов.

1. По заданным начальным условиям (при $t = 0$ $y_j = y_{j0}$, $j = 1, 2, 3, 4$) и шаге по времени $\Delta\tau$ вычисляются массивы коэффициентов по формулам:

$$\begin{aligned} k_{1j} &= \Delta\tau \cdot \dot{f}_j; \quad y_j = y_{j0} + 0,5 \cdot k_{1j}; \quad k_{2j} = \Delta\tau \cdot \dot{f}_j; \quad y_j = y_{j0} + 0,5 \cdot k_{2j}; \\ k_{3j} &= \Delta\tau \cdot \dot{f}_j; \quad y_j = y_{j0} + k_{3j}; \quad k_{4j} = \Delta\tau \cdot \dot{f}_j. \end{aligned}$$

Заметим, что необходимо произвести вычисления по каждой из формул при изменении параметра $j=1,2,3,4$.

2. Определяются элементы массива y_1, y_2, y_3, y_4 в момент времени $t = t + \Delta\tau$:

$$y_j = y_{j0} + (k_{1j} + 2k_{2j} + 2k_{3j} + k_{4j}) / 6, \quad j=1, 2, 3, 4.$$

3. Запоминаются полученные значения координат пылевой частицы и составляющих скорости:

$$y_{j0} = y_j, \quad j=1, 2, 3, 4$$

и осуществляется переход к пункту 1.

Построение траектории производится до тех пор, пока пылевая частица не попадет во всасывающий патрубок либо не осаждется.

Определение предельной траектории осуществлялось следующим образом. Задавался диаметр пылевой частицы, начальное ее положение $y_1 = d\cos\beta$, $y_2 = R$. Начальные скорости полагались равными нулю. В переменную U_l помещалась ордината частицы, которая улавливается патрубком, а в переменную U_p — которая осаждается. В начальном приближении полагалось $U_l = R$, $U_p = 30R$. Переменная $S_r = (U_p + U_l) / 2$.

Далее организовывался цикл, который выполняется пока $|U_p - U_l| > 0,00000001$. Внутри организовывался цикл, где строились траектории частиц. Он выполнялся до тех пор, пока $y_1 > -R / 2$ и $y_1 < 30R$. При выходе из внутреннего цикла проверялось условие $y_3 < 0$. Если оно истинно, то переменная $U_l = S_r$, в противном случае $U_p = S_r$. Далее происходит переприсвоение $S_r = (U_p + U_l) / 2$, $y_1 = d \cos \beta$, $y_2 = S_r$, $y_3 = 0$, $y_4 = 0$. На этом внешний цикл заканчивается.

На каждом шаге интегрирования системы (9) определялись составляющие скорости воздушного потока по формуле

$$v_n(x) = \frac{10 \left(\sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q) \right)}{|v_0|},$$

где для определения v_x используется $\bar{n} = \{1,0\}$, а для v_y используется $\bar{n} = \{0,1\}$. Величина v_0 определялась по формуле (5) и изменялась в зависимости от угла и длины раскрытия раstra. Поэтому для корректного сравнения расчетов при разных углах и длинах раскрытия раstra найденную величину скорости необходимо было разделить на $|v_0|$ и умножить на заданную среднюю скорость в патрубке. Число 10 в числителе обозначает, что расчеты выполнялись при средней скорости 10 м/с во всасывающем патрубке.

Рассмотрим предельные траектории пылевых частиц в спектре действия круглого отсоса-раструба. Предельные траектории пылевых частиц диаметрами 10–120 мкм (цифры над кривыми обозначают диаметры пылевых частиц в мкм) имеют параболическую форму, ветви которых асимптотически стремятся к вертикальным прямым (рис. 13).

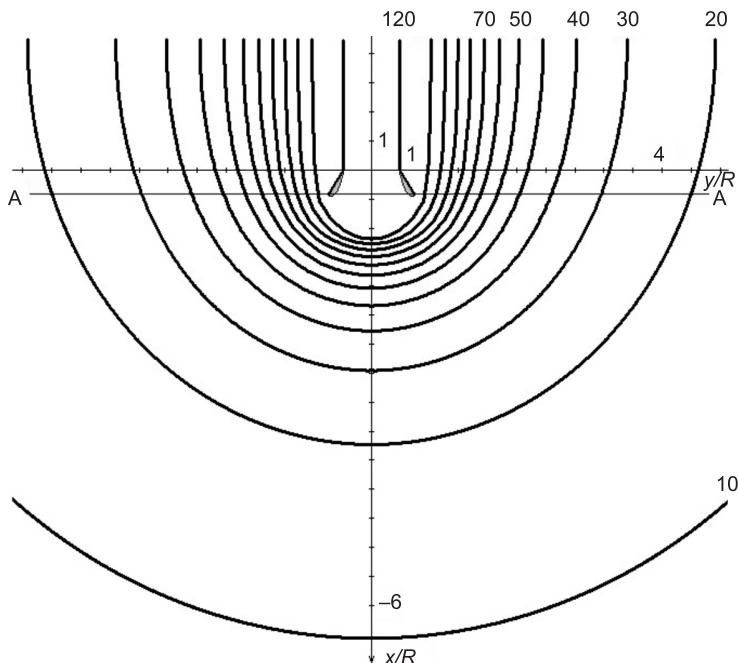


Рис. 13. Предельные траектории пылевых частиц в спектре действия круглого отсоса-раструба длиной в 1 калибр с углом раскрытия $\alpha = 60^\circ$ при средней скорости в отсосе 10 м/с

Объем аспирации — это объем между плоскостью А-А (рис. 13), проходящей через вход в раструб, и соответствующей поверхностью предельных траекторий пылевых частиц.

Объем аспирации V_a для данной пылевой частицы определялся путем построения траектории, которая являлась предельной. В процессе ее построения в переменную V_a , начальное значение которой равно 0, накапливались значения с использованием формулы объема усеченного конуса:

$$V_a = V_a + \pi(y_1 - y'_1)(y_2^2 + y_2 y'_2 + y'^2_2) / 3,$$

где y'_1 , y'_2 — координаты пылевой частицы в предыдущий момент времени. Данная циклическая структура выполнялась, пока $y_1 > y'_1$ и $y_2 > 0,001$.

Под критерием эффективности местного вентиляционного отсоса-раструба для пылевой частицы с заданными геометрическими и физическими свойствами будем понимать коэффициент улавливания

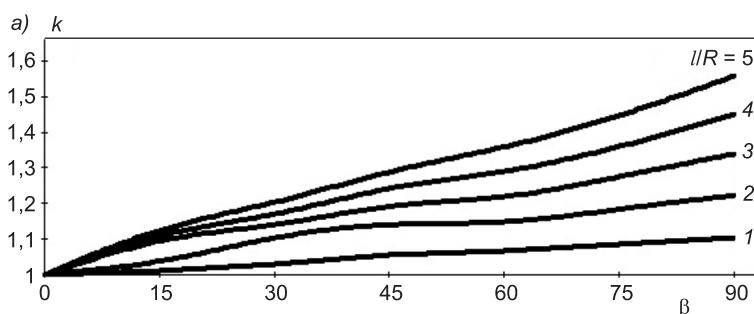
$$k = V_a / V_0,$$

где V_a — объем аспирации отсоса с раструбом;

V_0 — объем аспирации отсоса без растрuba.

Очевидно, что $k \geq 1$. Чем больше величина k , тем эффективней отсос. Предложенный коэффициент улавливания является более содержательным критерием эффективности местного вентиляционного отсоса, чем коэффициент неравномерности, поскольку учитывается не только вертикальная составляющая скорости воздуха, но и горизонтальная, сносящая загрязняющие вещества ближе к оси симметрии отсоса, т.е. в зону более эффективного улавливания.

В расчетах использовались следующие исходные данные и параметры дискретности: плотность пылевой частицы $\rho_p = 2500 \text{ кг} / \text{м}^3$; коэффициент динамической формы частицы $\chi = 1$; ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м} / \text{с}^2$; плотность воздуха $\rho_a = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$; кинематическая вязкость воздуха $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$; шаг интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (9) $\Delta t = 0,001 \text{ с}$; шаг дискретности $r_h = 0,0025 \text{ м}$; длина стенок патрубка $60R$; шаг построения линии тока $0,00001 \text{ м}$; циркуляция кольцевых вихрей, составляющих свободную поверхность тока $\gamma = -0,02$; средняя скорость в отсосе $v_0 = 10 \text{ м} / \text{с}$. Расчеты выполнялись при $R = 0,1 \text{ м}$ и затем обезразмеривались. Количество итераций по определению свободной поверхности тока было фиксированным и равным 15.



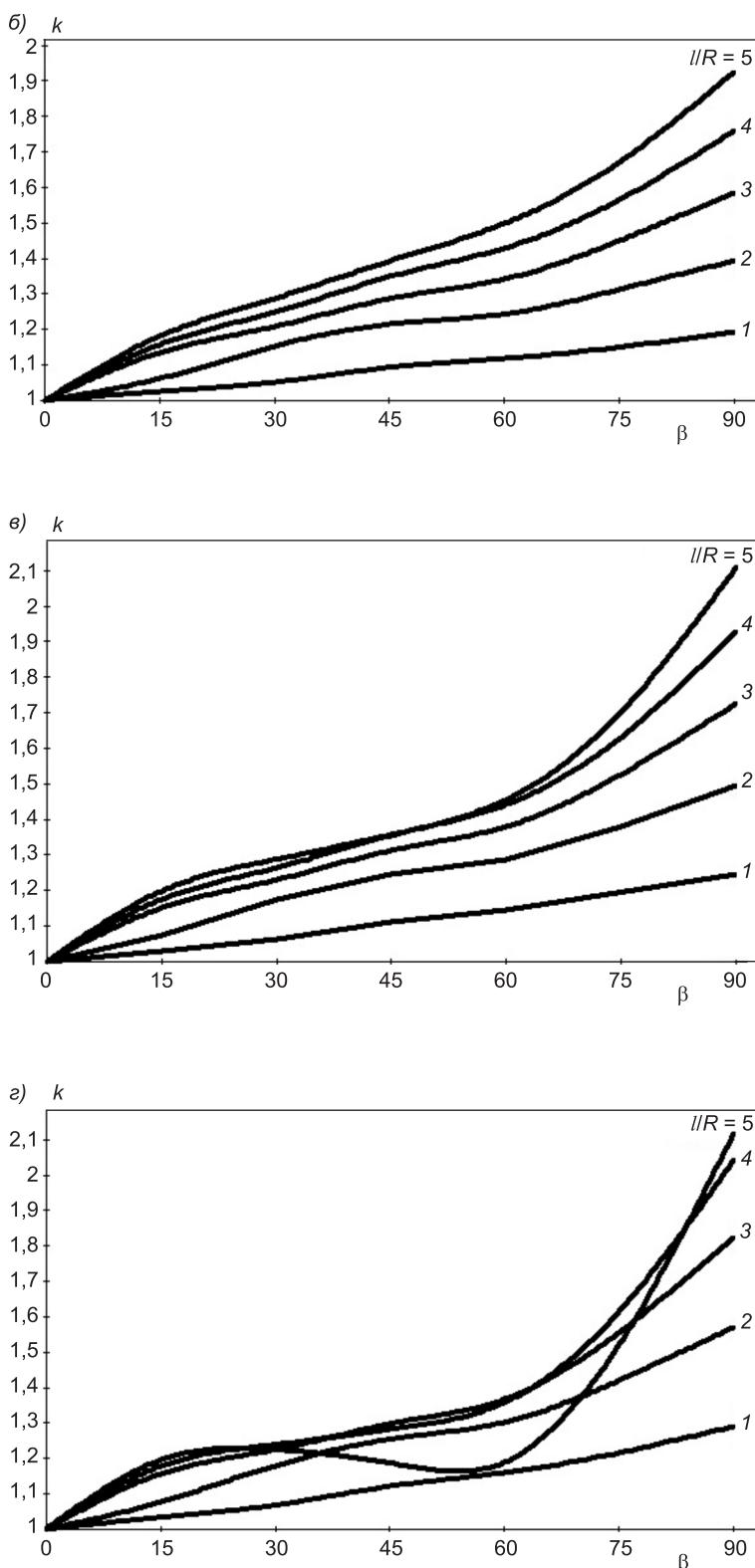


Рис. 14. Изменение коэффициента улавливания от угла β при разных длинах раstrauba
 $a = 20 \text{ мкм}, \beta = 40, \nu = 60, \varepsilon = 80 \text{ мкм}$

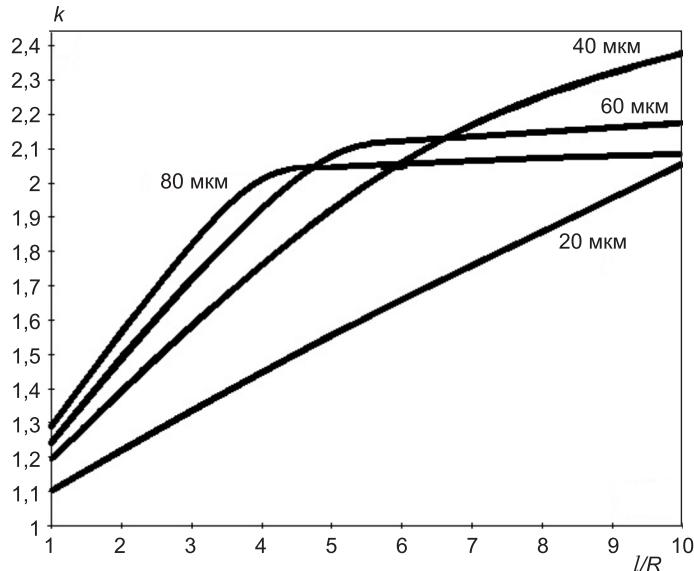


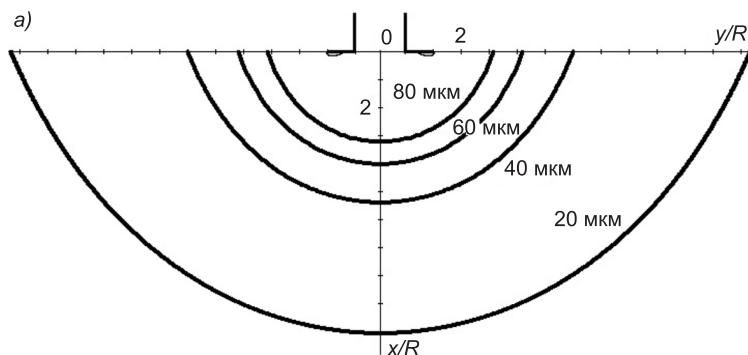
Рис. 15. Изменение коэффициента улавливания в зависимости от длины раструба при $\beta = 90^\circ$

Как видно из проведенных вычислительных экспериментов, для частиц диаметрами 20, 40, 60, 80 мкм коэффициент улавливания наибольший при $\beta = 90^\circ$ (рис. 14). Профилирование отсоса-раструба по найденным границам отрывной области позволяет снизить коэффициент местного сопротивления входа в отсос [2].

Заметим, что при длинных раструбах и крупных фракциях частиц (рис. 14, *г*) кривая, иллюстрирующая поведение коэффициента улавливания, прогибается (кривая *б*), что свидетельствует о падении вертикальной составляющей скорости на входе в раструб при увеличении его длины.

При увеличении длины раструба коэффициент улавливания изменяется практически линейно для мелких фракций (рис. 15) и стабилизация его роста наблюдается при значительных длинах раструба. Так, для 40 мкм это 10 калибров. Для более крупных фракций наблюдается замедление его роста, начиная с 4–5 калибров.

С использованием расчетов для предельных траекторий (рис. 16) можно произвести выбор оптимального места размещения местного вентиляционного отсоса.



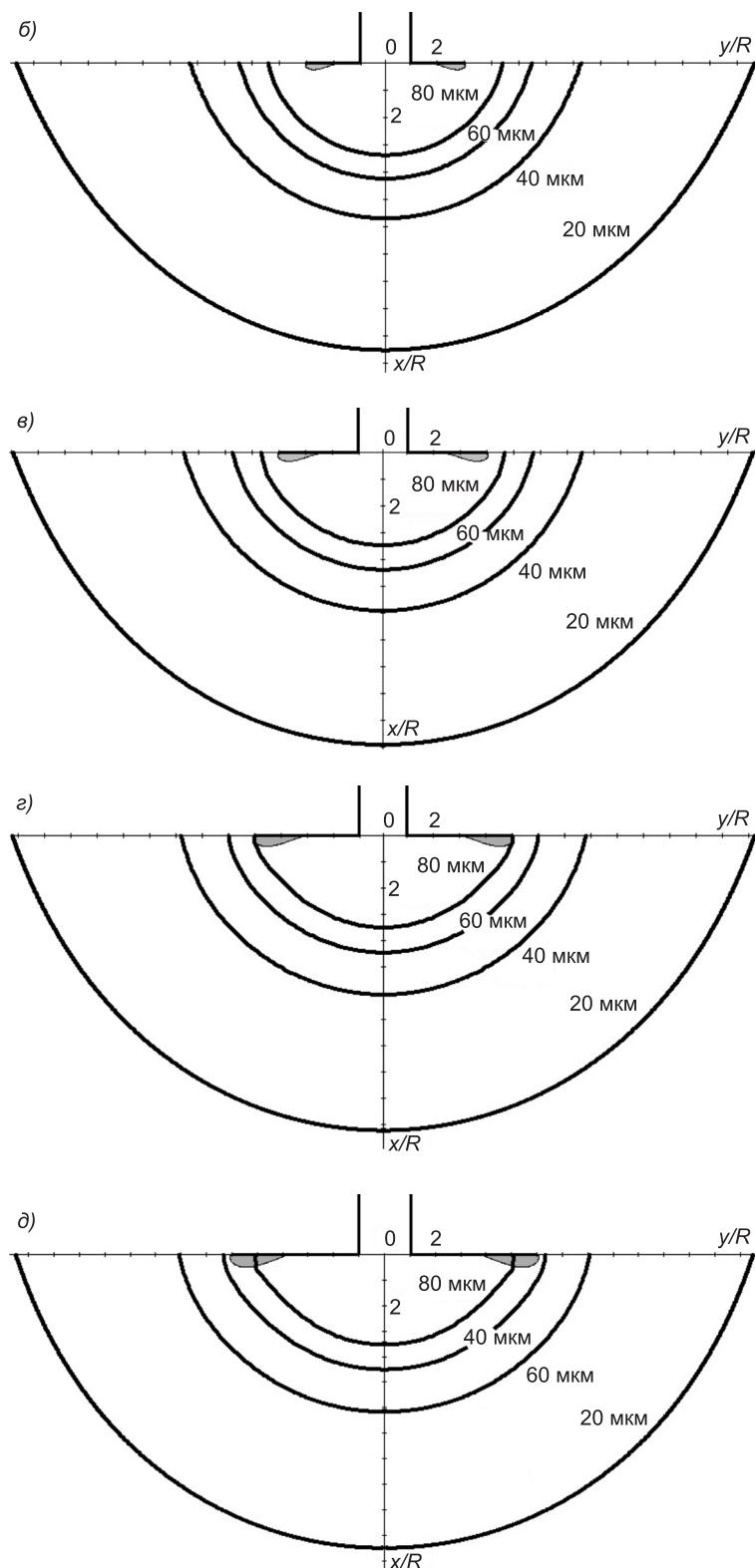


Рис. 16. Предельные траектории у отсоса-раструба с углом раскрытия $\alpha = 180^\circ$ ($\beta = 90^\circ$)

a — $d / R = 1$; δ — $d / R = 2$; ε — $d / R = 3$; ε — $d / R = 4$; ∂ — $d / R = 5$

Выводы. Разработаны математическая модель, вычислительный алгоритм и компьютерная программа для расчета отрывных течений на входе в круглые отсосы-растворы и для исследования поведения пылевых частиц в спектре их действия.

Определены характерные размеры вихревых областей на входе в круглый отсос-раструб. Получена аналитическая формула для расчета границы отрывной области на входе в длинный отсос-раструб. Профилирование растворов по найденным очертаниям отрывной области позволит улучшить аэродинамические и акустические свойства местных вентиляционных отсосов.

Построены предельные траектории пылевых частиц разных размеров в спектре действия круглого отсоса-раструба. Предложен критерий эффективности местного вентиляционного отсоса в виде коэффициента улавливания данной пылевой частицы, равного отношению объемов аспирации отсоса с раствором и без него.

Наиболее эффективным отсосом является раствор с углом раскрытия $\alpha = 180^\circ$ и длиной не менее 4 калибров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев, К.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 1. Разработка математической модели и вычислительного алгоритма [Текст] / К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9–10. — С. 56–64.
2. Логачев, К.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 2. Исследование параметров отрывной области [Текст] / К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 11. — С. 30–38.
3. Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. — СПб. : Химиздат, 2005. — 659 с.

ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kilogachev@mail.ru

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

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ТОЛМАЧЕВА Елена Игоревна, асп.*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 28.11.14

Logachev Konstantin Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kilogachev@mail.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

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

Tolmacheva Elena Igorevna, post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

MODELING THE DUST-AIR FLOWS IN THE ACTION SPECTRUM OF LOCAL ROUND VENTILATION BELL EXHAUST

Message 3. DYNAMICS OF DUST PARTICLES

There are given the computational algorithms of calculating dust particles' extreme trajectories in the action spectrum of local bell ventilation exhaust. The aspiration capacity

and the collection efficiency of dust particles of various fractions depending on the length and expansion angle of the bell have been determined. There is made a conclusion about the most efficient round bell exhaust.

Key words: local ventilation exhaust, extreme trajectories, discrete vortex method.

REFERENCES

1. Logachev, K.I. Modeling the dust-air flows in the action spectrum of local round ventilation bell exhaust. Message 1. Developing a mathematical model and computational algorithm [Text] / K.I. Logachev, O.A. Averkova, E.I. Tolmacheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 9–10. — P. 56–64.
 2. Logachev, K.I. Modeling the dust-air flows in the action spectrum of local round ventilation bell exhaust. Message 2. Research of the separation regions parameters [Text] / K.I. Logachev, O.A. Averkova, E.I. Tolmacheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 11. — P. 30–38.
 3. Logachev, I.N. Aerodynamic basis of suctions [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev. — SPb. : Khimizdat, 2005. — 659 p.
-

УДК 628.161

**В.Г. КАМБУРГ, М.А. САФРОНОВ, И.А. ЛУШКИН, Е.А. ТИТОВ,
А.В. ДЕМКОВ**

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ПРИ РЕАГЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ В ПРИСУТСТВИИ КОНТАКТНЫХ СРЕД

Дано теоретическое обоснование ускорения процесса хлопьеобразования при реагентной обработке воды в присутствии дополнительных поверхностей раздела фаз, образованных пузырьками воздуха. На основании проведенных исследований предложена конструкция смесителя с пневматическим перемешиванием и рециркуляцией водовоздушной смеси.

К л ю ч е в ы е с л о в а: природная вода, коагуляция, контактная среда, смеситель, пневматическое перемешивание.

Для ускорения удаления из воды грубодисперсных и коллоидных органических и минеральных примесей, а также значительной части микробиологических загрязнений используются процессы коагуляции, осуществляемые, как правило, в смесительных устройствах.

В смесителях водоочистных станций закладываются основы направленного коагуляционного структурообразования: создается определенная численная концентрация зародышевых агрегатов (микрохлопьев), регулируется плотность упаковки первичных астабилизированных частиц загрязнений и продуктов гидролиза коагулянта (ПГК) [1].

Для интенсификации образования микрохлопьев весьма широко используется метод контактной коагуляции, при котором в объем смесителя вводится дополнительная контактная среда, имеющая развитую удельную поверхность. Агрегативно неустойчивые примеси воды за счет сил адгезии прилипают к более крупным частицам контактной среды, при этом скорость агломерации значительно выше скорости агломерации примесей в свободном объеме воды. Кроме того, контактные среды способствуют более равномерному и быстрому распределению обрабатываемой воды по объему смесителя, что также ускоряет процессы хлопьеобразования. Использование контактной среды в смесителе значительно улучшает седиментационные характеристики скоагулированной взвеси и повышает эффект последующей очистки воды отстаиванием и фильтрованием.

В качестве контактных сред в смесительных устройствах водопроводных очистных сооружений (ВОС) могут использоваться мелкозернистый кварцевый песок [2], пузырьки воздуха [3, 4] и крупнозернистая контактная загрузка [5]. Анализ работы типовых смесителей с контактными средами на ВОС показал, что одним из наиболее рациональных способов интенсификации коагуляции с точки зрения эксплуатационных и капитальных затрат является пневматическое перемешивание воды с коагулянтом.

© Камбург В.Г., Сафонов М.А., Лушкин И.А., Титов Е.А., Демков А.В., 2014

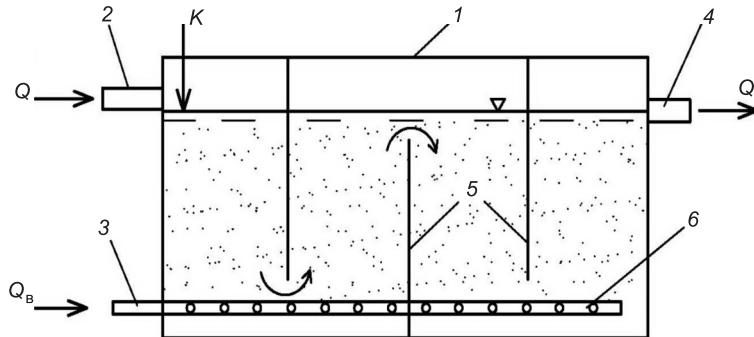


Рис. 1. Схема перегородчатого смесителя с аэрированием воды

1 — корпус смесителя; 2, 4 — подача и отвод воды; 3 — подача воздуха; 5 — перегородки; 6 — дырчатая труба (аэратор); к — раствор коагулянта

Пузырьки воздуха при перемешивании воды с коагулянтом являются центрами хлопьеобразования, прежде всего, за счет самопроизвольного стремления системы «вода — примеси — ПГК» к уменьшению удельной энергии. Работа закрепления твердых частиц на поверхности пузырьков определяется величиной поверхностного натяжения, а также электростатическими силами взаимодействия.

Рассмотрим кинетику процесса коагуляции примесей воды в типовом смесителе, оснащенном системой пневматического перемешивания, схема которого показана на рис. 1.

При вводе коагулянта в начало смесителя практически сразу в обрабатываемой воде образуются микрохлопья, состоящие из слипшихся частиц примесей и ПГК. Размер микрохлопьев по ходу движения в смесителе увеличивается за счет перемешивания и контакта с пузырьками воздуха.

Между параметрами микрохлопьев в начале смесителя и хлопьев, выходящих из него, существует соотношение

$$n_2 = \frac{\rho_1 \cdot n_1}{\rho_2} \left(\frac{d_{mf}}{d_f} \right)^3 = \frac{n_1}{K_y} \left(\frac{d_{mf}}{d_f} \right)^3, \quad (1)$$

где ρ_1 , n_1 и ρ_2 , n_2 — соответственно плотности и численные концентрации микрохлопьев в воде, поступающей в смеситель, и хлопьев, выходящих с водой из патрубка 4 (см. рис. 1);

d_{mf} — диаметр микрохлопьев в воде в начале процесса коагуляции;
 d_f — диаметр хлопьев, находящихся в воде на выходе из смесителя;
 K_y — коэффициент, характеризующий степень уплотнения микрохлопьев, $K_y = \frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Перепишем уравнение (1) в виде

$$\frac{n_1}{n_2} = K_y \left(\frac{d_f}{d_{mf}} \right)^3. \quad (2)$$

Е.Д. Бабенков на основании анализа уравнений кинетики коагуляции вывел соотношение для определения среднего диаметра образующихся хлопьев [6]

$$d_f = \frac{6 \sqrt{k_1 n_1} \cdot n_{\kappa}^{0.17}}{G^{0.17} \cdot \Phi^{0.33}} \cdot d_{mf}, \quad (3)$$

где k_1 — параметр, характеризующий отношение интенсивности прилипания и отрыва микрохлопьев от контактной среды, в данном случае пузырьков воздуха;

G — градиент скорости перемешивания, с^{-1} ;

n_{κ} — осредненное количество частиц ПГК в микрохлопьях скоагулированной взвеси, влияющее на крупность агрегата;

Φ — объемное содержание твердой фазы в агрегатах скоагулированной взвеси.

В соответствии с (3) можно записать приблизительное соотношение

$$\left(\frac{d_f}{d_{mf}} \right)^3 = \frac{\sqrt{k_1 n_1 n_{\kappa}}}{G^{0.5} \Phi}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{K_y \sqrt{k_1 n_1 n_{\kappa}}}{G^{0.5} \Phi}. \quad (5)$$

Если плотности хлопьев и микрохлопьев будут равны ($\rho_1 = \rho_2$), то в формуле (2) $K_y = 1$. В этом случае формулу (5) можно записать в виде

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{k_1 n_1 n_{\kappa}}}{G^{0.5} \Phi}. \quad (6)$$

В работе [6] дается зависимость $\Phi = f(G)$, удовлетворительно соответствующая уравнению

$$\Phi = \beta_f \cdot G^x, \quad (7)$$

где β_f — константа;

x — показатель степени, изменяющийся от 0,49 до 0,67 при увеличении градиента скорости.

Так как типовые смесители характеризуются низким градиентом скорости перемешивания ($G = 120-150 \text{ с}^{-1}$), то можно принять $x = 0,5$.

Подставляя (7) в (5), получим при $x = 0,5$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{K_y \sqrt{k_1 n_1 n_{\kappa}}}{\beta_f G}. \quad (8)$$

Анализ формулы (8) показывает, что эффективность коагуляции, определяемая степенью укрупнения микрохлопьев, прямо пропорциональна их первоначальному количеству (концентрации) в исходной воде и дозе коагулянта в степени 0,5, а также обратно пропорциональна градиенту скорости в первой степени.

Определим характер зависимости степени укрупнения микрохлопьев в смесителе от характеристик водовоздушной смеси.

Параметр k_1 в формулах (3)–(6) и (8) зависит от степени покрытия ПГК поверхности частиц загрязнений, которая, в свою очередь, при постоянной дозе коагулянта является функцией удельной поверхности S_n пузырьков воздуха в единичном объеме обрабатываемой воды. Таким образом, можно в обобщенном виде записать

$$k_1 = k_s \cdot S_n^m, \quad (9)$$

где k_s — константа, характеризующая физико-механические свойства скоагулированной взвеси;

m — показатель степени, $0,5 \leq m \leq 1,0$ [7].

При воздухонасыщении воды φ , а также известных значениях среднего диаметра пузырьков d_n количество пузырьков в единице объема смесителя будет равно, шт./ м^3

$$N_n = \frac{1 \cdot \varphi \cdot 6}{\pi \cdot d_n^3}. \quad (10)$$

Общую площадь поверхности пузырьков воздуха, $\text{м}^2/\text{м}^3$, в единичном объеме смесителя можно определить по соотношению

$$S_n = S_{ln} \cdot N_n, \quad (11)$$

где $S_{ln} = \pi \cdot d_n^2$ — площадь поверхности одного пузырька, м^2 .

Подставляя (10) в (11), получим новое выражение для удельной поверхности пузырьков, $\text{м}^2/\text{м}^3$

$$S_n = \frac{6\varphi}{d_n}. \quad (12)$$

Следовательно, величина параметра k_1 в формуле (9) прямо пропорциональна воздухонасыщению обрабатываемой воды и обратно пропорциональна среднему диаметру пузырьков воздуха в степени от 0,5 до 1.

Воздухонасыщение воды в смесителе будет определяться из соотношения

$$\varphi = \frac{Q_b}{Q + Q_b}, \quad (13)$$

Q, Q_d — соответственно расходы воды и воздуха, поступающие в смеситель (см. рис. 1).

С учетом (12) и (9) при $m = 0,5$ формула (8) запишется в виде

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1,57 K_y (k_s \cdot n_1 \cdot n_k)^{0,5} \varphi^{0,25}}{d_n^{0,25} \beta_f G}, \quad (14)$$

а при $m = 1$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{2,45 K_y (k_s \cdot \varphi \cdot n_1 \cdot n_k)^{0,5}}{d_n^{0,5} \beta_f G}. \quad (15)$$

Анализ формул (14) и (15) показывает, что при увеличении воздухонасыщения воды в смесителе и снижении размера пузырьков воздуха интенсивность укрупнения хлопьев возрастает.

Эффективность очистки воды на всех типах водоочистных устройств определяется не только крупностью образующихся коагуляционных

структур, но и в значительной степени их прочностью и плотностью. По Е.Д. Бабенкову [6] зависимость прочности агрегатов скоагулированных примесей P от градиента скорости при постоянной дозе коагулянта имеет общий характер с зависимостью (7)

$$P = K_2 \cdot G^y, \quad (16)$$

где K_2 — коэффициент, зависящий от величины d_f ;
 y — показатель степени, $y = 0,56$.

Таким образом, при возрастании градиента скорости G прочность P , а также объемное содержание твердой фазы Φ в хлопьях, образующихся после контактной коагуляции, должны увеличиваться, а их степень укрупнения $\frac{n_1}{n_2}$ уменьшается. Укрупнение хлопьев при высоких значениях

G , очевидно, можно достичь за счет увеличения количества первичных частиц ПГК n_k в микрохлопьях скоагулированной взвеси, например, при использовании приема рециркуляции коагулируемой воды через зону ввода сжатого воздуха.

На основании проведенных теоретических исследований для интенсификации процесса коагуляции примесей с образованием крупных и прочных агрегатов скоагулированной взвеси предлагается на типовых гидравлических смесителях водоочистных станций дополнительно устраивать рециркуляторы водовоздушной смеси (рис. 2).

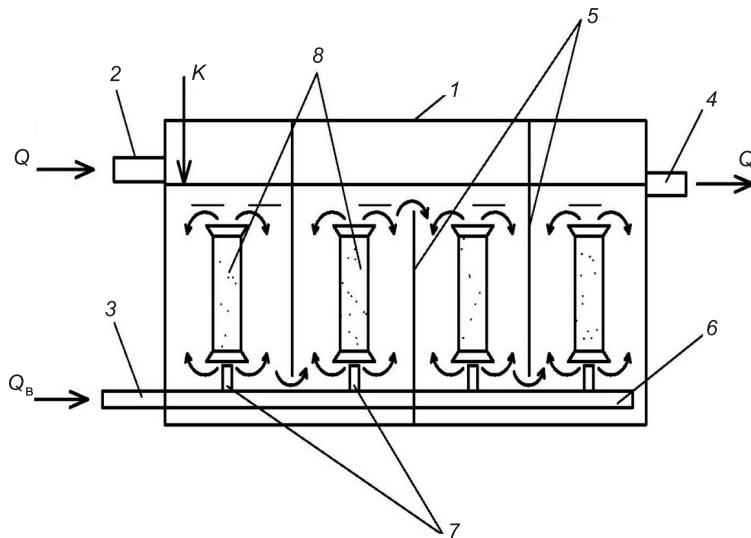


Рис. 2. Схема смесителя с рециркуляторами водовоздушной смеси
1 — корпус смесителя; 2, 4 — подача и отвод воды; 3 — подача воздуха; 5 — перегородки; 6 — воздухораспределительная труба; 7 — сопла; 8 — рециркуляторы; к — раствор коагулянта

Подача воды в каждую камеру между перегородками смесителя осуществляется через сопла 7, под которыми располагаются рециркуляторы 8, работающие по принципу эрлифтов. В нижнем (входном) сечении каждого рециркулятора создается разряжение, вследствие которого часть во-

довоздушной смеси с микрохлопьями скоагулированной взвеси из пространства камеры повторно попадает в рециркулятор, увеличивая тем самым время контакта с пузырьками воздуха. В предлагаемой конструкции смесителя будет осуществляться более интенсивное хлопьеобразование, позволяющее улучшить эффект последующего осветления воды.

Выводы. 1. На основе теоретического анализа процесса коагуляции примесей с использованием пневматического перемешивания получены математические зависимости, позволяющие оценить влияние различных факторов на степень укрупнения микрохлопьев в контактной среде.

2. Предложена конструкция смесителя, работающего в технологической схеме водоподготовки ВОС с применением пневматического перемешивания и рециркуляции водовоздушной смеси для интенсификации процессов хлопьеобразования и повышения эффекта последующей очистки воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабенков, Е.Д. Режим перемешивания воды в процессах водоподготовки [Текст] / Е.Д. Бабенков // Химия и технология воды. — 1984. — Т. 2, № 3.
2. Бабенков, Е.Д. Исследование работы вертикального смесителя с фонтанирующим слоем зернистого материала [Текст] / Е.Д. Бабенков, Т.П. Лимонова // Тр. ВНИИ ж.-д. транспорта. — 1979. — Вып. 613.
3. Пособие по проектированию сооружений для очистки и подготовки воды (к СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения») [Текст] / НИИ КВОВ АКХ им. К.Д. Памфилова. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. — 128 с.
4. Гришин, Б.М. Исследование реагентосберегающего способа коагуляционной очистки воды поверхностного источника [Текст] / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, Е.А. Титов, В.В. Голубев, М.А. Сафонов // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 48–55.
5. Гришин, Б.М. Теоретические исследования процесса коагуляции примесей воды с использованием крупнозернистой контактной загрузки [Текст] / Б.М. Гришин, А.Н. Кошев, С.М. Салмин // Водоочистка. — 2014. — № 6. — С. 22–27.
6. Бабенков, Е.Д. Влияние степени дисперсности примесей на физические параметры коагулированной взвеси [Текст] / Е.Д. Бабенков // Химия и технология воды. — 1983. — Т. 5, № 1.
7. Сафонов, М.А. Повышение эффективности реагентной обработки поверхностных природных вод алюмосодержащими коагулянтами [Текст] / М.А. Сафонов: дис. ... канд. техн. наук. — Пенза : ПГУАС, 2010. — 156 с.

КАМБУРГ Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, проф.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
САФРОНОВ Максим Александрович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: voda@rguas.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ЛУШКИН Игорь Александрович, канд. техн. наук, доц.*

Тольяттинский государственный университет

ТИТОВ Евгений Александрович, канд. техн. наук, доц.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ДЕМКОВ Александр Владимирович, студ.*

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 12.11.14

Kamburg Vladimir Grigoryevich, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Safronov Maksim Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: voda @pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Lushkin Igor Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Togliatti State University, Russia

Titov Evgeny Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Demkov Alexander Vladimirovich, student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

KINETICS OF COAGULATION PROCESS AT NATURAL WATER REAGENT TREATMENT WITH CONTACT MEDIUM PRESENCE

Theoretical basis of flocculation process acceleration of water reagent treatment with additional interface formed by air bubbles is given. In virtue of conducted investigations the construction of mixer with pneumatic agitation and water-air mix recirculation is suggested.

Key words: natural water, coagulation, contact medium, mixer, pneumatic agitation.

REFERENCES

1. Babenkov, E.D. Regime of agitation at water treatment processes [Text] / E.D. Babenkov // Chemistry and water technology. — 1984. — Vol. 2, N 3.
2. Babenkov, E.D. Investigation of vertical mixer work with spouting layer of granular material [Text] / E.D. Babenkov, T.P. Limonova // Transactions of AUSII railway transport. — 1979. — Issue 613.
3. Benefit after designing of constructions for water treatment and purification (at CNR 2.04.02-84 «Water supply. Outside nets and constructions») [Text] / SII MWSWT AME n. K.D. Pamfilov. — M. : CIID SC USSR, 1989. — 128 p.
4. Grishin, B.M. Investigations of the reagent method of surface source water coagulation treatment [Text] / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, E.A. Titov, V.V. Golubev, M.A. Safronov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 48–55.
5. Grishin, B.M. Theoretical research of water contaminants coagulation using coarse grain contact bed [Text] / B.M. Grishin, A.N. Koshev, S.M. Salmin // Water purification. — 2014. — N 6. — P. 22–27.
6. Babenkov, E.D. Influence of impurities dispersion degree of coagulated suspension physical parameters [Text] / E.D. Babenkov // Chemistry and water technology. — 1983. — Vol. 5, N 1.
7. Safronov, M.A. Increase of surface natural water treatment efficiency by aluminium contained coagulants [Text] / M.A. Safronov: dis. ... candidate of technical sciences. — Penza : PSUAC, 2010. — 156 p.