

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

№ 11 (671)  
Ноябрь 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](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 24.11.14. Формат 70×108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Усл. печ. л. 10,0+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6866

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Полуэктов В.А., Миренков В.Е., Шутов В.А. Напряженное состояние пластины с отверстием ..... 5

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Калашников В.И., Белякова Е.А., Мороз М.Н., Москвин Р.Н., Белякова В.С. Гигрометрические свойства порошковых и порошково-активированных бетонов на основе различных горных пород ..... 10

Пименов С.И., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Влияние гидромеханохимической активации цементной суспензии на физико-механические свойства тяжелого бетона ..... 16

Шепелев И.И., Бочков Н.Н., Дашкевич Р.Я., Сахачев А.Ю. Опыт применения нетоксичных отходов глиноземного производства в дорожном строительстве . 22

### САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Логачев К.И., Аверков О.А., Толмачева Е.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-распределителя. Сообщение 2. Исследование параметров отрывной области ..... 30

Шиляев М.И., Горбунков А.И., Богомолов А.Р.,

<b>Хромова Е.М.</b> Обезвоживание угольной суспензии в вакуум-фильтрах и фильтр-прессах .....	39
<b>Кононова М.С.</b> Сравнительный анализ вариантов расположения теплообменников в системах централизованного горячего водоснабжения жилой застройки ...	49
<b>Савельев Е.Г., Рохлецова Т.Л.</b> Опыт применения солнечной энергии и грунтового аккумулятора в условиях юга Сибири .....	55
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Кутумов А.А.</b> Анализ принципиальных схем пневмоударных механизмов с выпусктом отработавшего воздуха из камеры холостого хода и их физико-математическое описание .....	61
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Манацкова О.А.</b> Взаимосвязь сакральных сооружений Западной Сибири с окружающей застройкой .....	71
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Вальгер С.А., Данилов М.Н., Федорова Н.Н., Федоров А.В.</b> Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием ПК ANSYS, AUTODYN и LS-DYNA .....	77
<b>Высоцкий Л.И.</b> К вопросу о понятии «зона гладкостенного сопротивления» ...	93
<b>Шахов С.А., Ключникова Н.С., Кожемяченко А.С.</b> Состав и технологические свойства осадков водоотведения и зол, образующихся при их сжигании .....	103

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 11 (671)

November 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

### THE THEORY OF ENGINEERING SRTUCTURES

- Poluektov V.A., Mirenkov V.E., Shutov V.A.** Stress state of plates with a hole ..... 5

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Kalashnikov V.I., Belyakova E.A., Moroz M.N., Moskvin R.N., Belyakova V.S.** Hygrometric properties of powder and powder-activated concrete on the basis of various rocks ..... 10

- Pimenov S.I., Ibragimov R.A., Izotov V.S.** Influence hydromechanically activation of cement slurry on the physico-mechanical properties of heavy concrete ..... 16

- Shepelev I.I., Bochkov N.N., Dashkevich R.Ya., Sakhachev A.Yu.** Experience of application of nontoxic waste of aluminous manufacture in road construction .... 22

### 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 exhaust. Message 2. Research of the separation regions parameters ..... 30

- Shilyaev M.I., Gorbunkov A.I., Bogomolov A.R., Khromova E.M.** Dehydration of coal slurry in vacuum-filters and filter-presses ..... 39

<b>Kononova M.S.</b> The comparative analysis of versions of an arrangement of heat exchangers in systems of the centralized hot water facilities of habitation building .....	49
<b>Savel'yev E.G., Rokhletsova T.L.</b> Experience with the use of solar energy and groundwater in south Siberia .....	55
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Dedov A.S., Krutikov E.I., Kutumov A.A.</b> Analysis of schematic diagrams air percussion mechanisms with the exhaust of air from the chamber idling and their physico-mathematical description .....	61
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Manatskova O.A.</b> The relationship of the sacred buildings of Western Siberia with the surrounding buildings .....	71
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Valger S.A., Danilov M.N., Fedorova N.N., Fedorov A.V.</b> The comparison of results of simulation of shock wave action on structures using ANSYS and AUTODYN and LS-DYNA software .....	77
<b>Vysotsky L.I.</b> To the question of the concept «zone of smooth-walls resistance» .....	93
<b>Shahov S.A., Klyuchnikova N.S., Kozhemyachenko A.S.</b> The composition and technological properties of sewage sludge and ashes from sewage sludge combustion ....	103

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

В.А. ПОЛУЭКТОВ, В.Е. МИРЕНКОВ, В.А. ШУТОВ

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАСТИН С ОТВЕРСТИЕМ\*

Рассмотрено плосконапряженное состояние сжимаемой на бесконечности изотропной пластины (плоскости), ослабленной круговым отверстием. Показан характер поведения касательных напряжений, особенностью которого является наличие у них экстремума, определяющего зону их концентрации в окрестности отверстия. Обсуждается возможность использования полученного эффекта возникновения круговой области повышенных касательных напряжений при нагружении пластины.

**Ключевые слова:** плоскость, отверстие, упругость, напряжение, сдвиги, буферная зона, разрушение.

При расчете напряженно-деформированного состояния сжимаемых (растянутых) пластин с произвольным отверстием аналитического решения не существует. Для пластин с полигональным отверстием или образованным дугами окружностей и прямых в [1] решение сведено к системам сингулярных интегральных уравнений. Нет решения и для конечной пластины с круговым отверстием. Дальнейшее упрощение, предполагающее, что радиус отверстия существенно меньше характерного размера пластины, позволяет получить аналитическое решение для случая одностороннего сжатия. Формулировка задачи при этом звучит так: плоскость с круговым отверстием сжимается на бесконечности постоянными напряжениями  $p$  в направлении оси  $x$ . Точное решение такой задачи, имеющее приложения, приводится в учебниках по теории упругости, например в [2].

В данной работе исследуется возможность разрушения конструкции с круговым отверстием. Классический подход к проблеме нагружения пластины предполагает образование пластической области на контуре отверстия. С увеличением  $p$  пластическая область растет и может полностью содержать внутри себя круговое отверстие. В то же время при сжатии образца без отверстия наблюдаются линии Чернова–Людерса. Рассмотрим возможность разрушения плоскости с круговым отверстием по схеме, в которой касательные напряжения являются определяющими. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Исследуем упругую плоскость, ослабленную круговым отверстием радиуса  $R$ , контур которого свободен от напряжений, т.е.  $\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$  на  $r = R$ . На бесконечности в направлении оси  $x$  действуют сжимающие напряжения  $p$ . Решение этой задачи в полярных координатах имеет вид [2]

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00133).

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{p}{2} \left(1 - \frac{R_2}{r^2}\right) - \frac{p}{2} \left(1 - \frac{4R^2}{r_2^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= -\frac{p}{2} \left(1 + \frac{R_2}{r^2}\right) + \frac{p}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{p}{2} \left(1 + \frac{2R_2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Как следует из (1), значения  $\sigma_\theta$  на контуре отверстия

$$\sigma_\theta = p(1 - 2\cos 2\theta). \quad (2)$$

Максимальное значение  $\sigma_\theta$  из (2) равно

$$\sigma_{\theta_{\max}} = 3p \text{ при } \theta = \pm \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

т.е. в 3 раза больше сжимающих напряжений на бесконечности.

Если напряжения  $p$  близки к пределу прочности материала плоскости на сжатие, то материал не выдержит сжимающих напряжений (3) и разрушится, т.е. отверстие должно схлопнуться. На практике этого не происходит, природа встречает «смерть» на полпути, т.е. заранее, начав деформироваться, продлевая срок службы плоскости с отверстием и приводя, в конечном счете, к падению разрушающих напряжений, снося их вглубь плоскости с отверстием.

Рассмотрим поведение касательных напряжений  $\tau_{r\theta}(r, \theta)$ . Из (1) следует, что для любого фиксированного значения  $r$  величина  $\tau_{r\theta}(r, \theta)$  периодически достигает своего максимального по абсолютной величине значения

$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2} \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right). \quad (4)$$

Учитывая зависимость  $\tau_{r\theta}$  от  $\theta$  из (1), достаточно рассмотреть процесс изменения  $\tau_{r\theta}(r)$  на луге  $\theta = \frac{\pi}{4}$ , т.е. (4). Согласно (4),

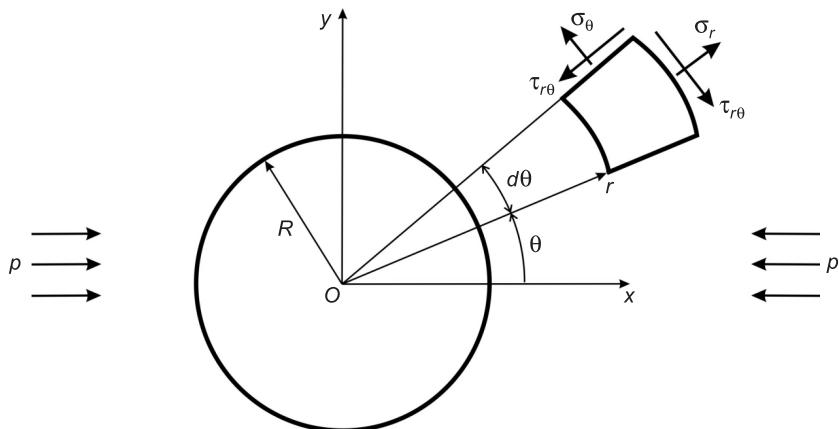


Рис. 1. Расчетная схема ослабления в полярных координатах

$$\tau_{r\theta}(r=R)=0, \quad \tau_{r\theta}(r \rightarrow \infty) = \frac{p}{2}. \quad (5)$$

Для определения координаты экстремального значения  $\tau_{r\theta}$  имеем уравнение

$$\frac{d\tau_{r\theta}}{dr} = \frac{p}{2} \left( -\frac{4R^2}{r^3} + \frac{12R^4}{r^5} \right) = 0,$$

из которого следует

$$r^2 = 3R^2, \quad (6)$$

и соответственно экстремальное значение касательного напряжения

$$\tau_{r\theta}(r=R\sqrt{3}) = \frac{2}{3} p. \quad (7)$$

На рис. 2 приведен график зависимости  $\tau_{r\theta}\left(\theta = \frac{\pi}{4}, r\right)$  в безразмерном

виде.

Таким образом, на окружности радиуса  $r_0 = \sqrt{3}R$  касательные напряжения  $\tau_{r\theta}(r_0, \theta)$  достигают максимальных значений при растяжении или сжатии плоскости, ослабленной круговым отверстием в направлении оси  $x$ . При растяжении или сжатии образцов перед разрушением наблюдают возникновение линий Чернова–Людерса как результат сдвигов и только затем с увеличением нагрузки идет образование шейки с последующим разрушением. Сравним эти две задачи, для которых получены аналитические решения. В случае деформирования пластиинки без ослабления усилиями  $p$  получаем

$$\tau_{\alpha,\max} = \pm \frac{p}{2}$$

на площадках под углом  $\alpha = 45^\circ$  к оси  $x$ , для которых нормальные напряжения  $\sigma_\alpha = 0,5p$ . Аналогичная ситуация наблюдается и в окрестности кругового отверстия в плоскости сжимаемой (растягиваемой) на бесконечности, т.е. максимальные касательные напряжения достигают величины  $\frac{2}{3}p$ , а нормальные напряжения на этих же площадках — значений

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3}p.$$

Другими словами можно ожидать образование линий Чернова–Людерса, в окрестности ослабления на  $r=R\sqrt{3}$ , как предшественников последующего разрушения.

В случае сжатия плоскости с круговым отверстием вертикальными и горизонтальными напряжениями  $q$  и  $p$  соответственно решение строится исходя из (1). Действие вертикальной компоненты  $q$  легко получить из (1) заменой  $p$  на  $q$  и  $\theta$  на  $\theta_1 = \theta + \frac{\pi}{2}$ . Сумма этих двух воздействий приводит к решению

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{q+p}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{q-p}{2} \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= -\frac{q+p}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{q-p}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{q-p}{2} \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta,\end{aligned}\quad (8)$$

которые определяют аналогично (6) экстремальные значения  $\tau_{r\theta}(r, \theta)$  на  $r = \sqrt{3}R$ .

При  $q = p$ , т.е. в случае гидростатического нагружения плоскости с отверстием, касательные напряжения  $\tau_{r\theta}(r, \theta) \equiv 0$  всюду в плоскости с круговым ослаблением. Этот аномальный случай, казалось бы, отрицает возможность реализоваться такому виду сдвигового деформирования, как в случае  $q \neq p$ , и подтверждает математическую теорию пластичности, исключающую разрушение в случае гидростатического нагружения (но без ослабления).

Решение (8) при  $q = p$  имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{q+p}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) = -q \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right), \\ \sigma_\theta &= -\frac{q+p}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) = q \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right), \quad \tau_{r\theta} = 0,\end{aligned}$$

т.е. гидростатика напряженного состояния присутствует только на бесконечности, где  $\sigma_r = \sigma_\theta = -q$ . На самом деле достичь условия  $\tau_{r\theta} \equiv 0$  невозможно. С одной стороны, можно утверждать, что ни одна практическая задача не эквивалентна решениям (1), (8), которые используются как некоторое приближение. С другой стороны, приведенные решения не учитывают собственный вес материала, что исключает симметрию в принципе. Для этого последнего случая решения пока нет. Однако тенденция к ослаблению влияния касательных напряжений при  $q = p$  сохраняется.

Задача об устойчивости пластин с отверстием при растяжении рассматривалась в [3], где есть обзор других работ. Потеря устойчивости пластин возникает из-за образования около кромок отверстий зон сжимающих напряжений. При одноосном растяжении пластин с круговым отверстием образуются локальные зоны сжимающих окружных напряжений согласно решения (2), с чем и связана механическая природа локального выпучивания в окрестности отверстия на  $y = 0$ , при достаточно большом значении усилий  $p$ . Необходимо отметить, что для тонких пластин образование зон повышенных касательных напряжений может привести к изменению формы прогиба при потере устойчивости, рассматриваемой в [3].

Таким образом, на основе аналитического решения задачи о напряженном состоянии в окрестности ослабления в форме круга зафиксирована кольцевая область повышенных значений касательных напряжений, на поверхности которой могут появиться линии, характеризующие наличие больших деформаций сдвига. В силу приближенности граничных условий в аналитическом решении кольцевая область образуется на расстоянии  $R\sqrt{3}$  от центра отверстия, что является достаточной оценкой для реальных экспериментов. Такая оценка может использоваться в случаях ослабленной сложной формы, когда возможно заменить их эквивалентной (например, по площади) круговой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миренков, В.Е. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов. — Новосибирск : Наука, 2009. — 176 с.
2. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] / Н.И. Мусхелишвили. — М. : Наука, 1966. — 708 с.
3. Bauer, S.M. Stability of a nanoscale-thickness plate weakened by a circular hole [Text] / S.M. Bauer, S.V. Kashtanova, N.F. Morozov, B.N. Semenov // Doklady Physics. — 2014. — Vol. 59(9). — P. 416–418.

*ПОЛУЭКТОВ Вячеслав Александрович, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия  
МИРЕНКОВ Валерий Егорович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия  
ШУТОВ Валерий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

Получено 27.10.14

**Poluektov Vyacheslav Aleksandrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Mirenkov Valery Egorovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Shutov Valery Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

## STRESS STATE OF PLATES WITH A HOLE

Plane stress of an isotropic plate (plane), compressed at infinity, is considered. The plate is weakened by a circular hole. The behavior of shear stress distribution is shown. Its special feature is the presence of extremum, which defines the zone of stress concentration in the vicinity of the hole. We discuss the possibility of utilizing the discovered effect of appearing circular region with increased shear stresses.

**Key words:** plane, hole, elasticity, stress, shear, buffer zone, fracture.

## REFERENCES

1. Mirenkov, V.E. Matematical modeling of mining rock deformation near the weakening [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov. — Novosibirsk : Nauka, 2009. — 176 p.
2. Muskhelishvili, N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity [Text] / N.I. Muskhelishvili. — M. : Nauka, 1966. — 708 p.
3. Bauer, S.M. Stability of a nanoscale-thickness plate weakened by a circular hole [Text] / S.M. Bauer, S.V. Kashtanova, N.F. Morozov, B.N. Semenov // Doklady Physics. — 2014. — Vol. 59(9). — P. 416–418.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327:66.972.7

В.И. КАЛАШНИКОВ, Е.А. БЕЛЯКОВА, М.Н. МОРОЗ,  
Р.Н. МОСКВИН, В.С. БЕЛЯКОВА

### ГИГРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ И ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Представлены результаты исследований 24 составов тяжелых порошковых, порошко-активированных песчаных и щебеночных бетонов нового поколения без использования микрокремнезема. Они по сравнению с традиционными бетонами отличаются не только увеличенным количеством дисперсных компонентов, но и повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В качестве высокодисперсных наполнителей в таких бетонах использовались тонкомолотые горные породы различного химико-минералогического состава и генетического происхождения. Определены прочностные и гигрометрические свойства исследуемых бетонов на 8 видах наполнителей. Наряду с высокой прочностью обеспечивается высокая морозостойкость, водонепроницаемость и долговечность бетонов нового поколения.

Ключевые слова: тонкомолотые наполнители, высокопрочные бетоны, водопоглощение, морозостойкость.

Тяжелые пластифицированные бетоны нового поколения (БНП) с высоким содержанием дисперсных добавок, образующих значительное количество суспензионной составляющей, классифицируются нами на 4 вида [1]:

1) порошковые (ПБ), состоящие из цемента, дисперсного микрометрического наполнителя, тонкого песка фр. 0,16–0,63 мм (0,1–0,5 мм) и суперпластификатора (СП). Эти бетоны полностью суспензионны и состоят из водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии;

2) реакционно-порошковые (РПБ), суспензионные, дополнительно содержащие высокодисперсную реакционно-активную пущоланическую добавку (микрокремнезем, белую сажу, дегидратированный каолин, золу);

3) порошково-активированные песчаные или мелкозернистые (ПАПБ) — это комбинация составов порошковых или реакционно-порошковых бетонов с высоким содержанием суспензионной составляющей и с добавлением песка-заполнителя фр. 0,63–5,0 мм;

4) порошково-активированные щебеночные бетоны (ПАЩБ) — это комбинация составов порошково-активированных песчаных бетонов с добавлением щебня.

Последние два вида бетонов имеют повышенный объем суспензионной составляющей, несравненно больший, чем в бетонах старого поколения: в ПАПБ — 65–80 %, в ПАЩБ — 60–75 %. Термин «порошково-активированный», введенный нами ранее [2], наиболее полно характеризует сущ-

© Калашников В.И., Белякова Е.А., Мороз М.Н., Москвин Р.Н.,  
Белякова В.С., 2014

ность кардинальных реологических преобразований пластифицированных бетонных смесей в самоуплотняющиеся. Решающая роль при этом принадлежит порошковым компонентам из различных горных пород, образующих совместно с цементом и суперпластификатором агрегативно-устойчивые суспензии [3]. В такие бетоны, кроме суперпластификаторов, вводятся добавки нового поколения, разработанные в последние 5–10 лет: суперадсорбирующие полимеры для внутреннего ухода за бетоном; регуляторы вязкости; нанометрические гидросиликаты кальция и т.д.

Перечисленные бетоны — это будущее бетонов. Все они изготавливаются из высокопластичных и самоуплотняющихся бетонных смесей.

Важнейшую реологическую функцию в бетонных смесях выполняют минеральные дисперсные компоненты (каменная мука), образующие совместно с цементом и СП при малом количестве воды агрегативно-устойчивые высококонцентрированные суспензии. Они при затвердевании образуют плотный цементно-минеральный камень с малой капиллярной пористостью и низким водопоглощением. Поэтому получение БНП связано с физико-химией агрегативно-устойчивых суспензий, а такие бетоны являются научными.

Водопоглощение по массе обычного щебеночного бетона старого поколения марок М300–М400 не бывает меньше 3,0–4,0 %. Объемное водопоглощение, характеризующее насыщение объема бетона водой, при этом составляет не менее 7–10 %. По кинетике водопоглощения бетона за 3–4 сут и по значениям длительного водопоглощения можно прогнозировать морозостойкость. Морозостойкость разработанных порошковых бетонов нами не изучалась, так как исследования, проведенные ранее сотрудниками кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки» Пензенского ГУАС, показали, что бетоны нового поколения с низким водопоглощением и прочностью 80–100 МПа выдержали более 500, а некоторые высокоплотные — более 900–1000 циклов попеременного замораживания и оттаивания без потери прочностных показателей, а иногда и с повышением их.

Были изготовлены порошковые, порошково-активированные песчаные и щебеночные бетоны. Важно, что все они получены без реакционно-активной пущоланической добавки — микрокремнезема, которая в настоящее время становится чрезвычайно дефицитной. Это существенно снижает стоимость бетонов. К тому же расширяются географические горизонты использования БНП за счет введения в бетонное производство местных материалов [4].

Для оценки экономических показателей рецептуры определялся удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии  $\left( \frac{\Pi_{уд}}{R_{сж}} = \frac{\Pi}{R_{сж}}, \text{ кг / МПа} \right)$ . Этот оценочный критерий является всеобъемлю-

щим: техническим, экономическим и экологическим. И какие бы бетоны не создавались и не исследовались, их высокую эффективность необходимо оценивать по этому критерию.

В исследованиях в качестве дисперсных наполнителей использовали известняки трех месторождений, песчаники двух месторождений, гранит, диабаз, мрамор и молотый кварцевый песок. Породы измельчались до удельной поверхности, равной 3000–4000 см<sup>2</sup> / г, применяли портландцементы пяти производителей. В качестве суперпластификатора вводи-

**Гигрометрические и прочностные показатели образцов порошкового и порошково-активированного песчаного и щебеночного бетонов**

№ п/п	Бетон	Цемент, кг	Вид каменной муки	B/T	B/C	$\rho_{вл}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}^{28}$ , МПа	$\Pi_{R_{сж}}^{уд}$ , кг/МПа	$W_m^3$ , %, через 3 сут	$\varepsilon_{yc}$ , мм/м, через 180 сут
-------	-------	------------	-------------------	-----	-----	---------------------------------	---------------------	------------------------------	--------------------------	--

**Порошковые бетоны без микрокремнезема**

1	РПБ-2	655 ЦД	Известняк (Исса)	0,116	0,361	2302	110,5	5,93	2,11	0,34
2	РПБ-7	670 ЦД	Доломит (Воронеж)	0,117	0,363	2335	105,4	6,36	2,11	0,36
3	РПБ-19	680 ЦД	То же	0,106	0,328	2324	110,5	6,15	2,52	0,31
4	РПБ-23	683 ЦД	—»—	0,099	0,308	2328	113,1	6,04	2,19	0,27
5	РПБ-43	670 ЦК	—»—	0,106	0,328	2304	102,9	6,51	2,38	0,31
6	РПБ-44	678 ЦК	—»—	0,106	0,328	2307	109,7	6,18	2,32	0,28
7	РПБ-51	681 ЦД	Пылевидный кварц	0,124	0,386	2333	103,7	6,57	2,94	0,39
8	РПБ-53	681 ЦД	То же	0,124	0,386	2289	113,9	5,98	2,84	0,37
9	РПБ-57	677 ЦД	Песчаник (Никольск)	0,154	0,479	2095	85,0	8,00	5,89	0,80
10	РПБ-63	664 ЦД	Пылевидный кварц	0,123	0,383	2296	113,9	5,83	2,34	0,38
11	РПБ-64	669 ЦД	Известняк (Тольятти)	0,123	0,383	2318	113,9	5,87	2,97	0,35
12	РПБ-65	657 ЦД	Песчаник (Саловка)	0,123	0,383	2234	103,7	6,34	2,69	0,42
13	РПБ-66	660 ЦД	Диабаз	0,123	0,383	2305	107,1	6,16	2,81	0,32
14	РПБ-73	664 ЦЩ	Пылевидный кварц	0,128	0,397	2253	105,4	6,30	2,70	0,35
15	РПБ-80	690 ЦЩ	Гранит	0,115	0,347	2302	108,8	6,34	2,17	0,32
16	РПБ-81	697 ЦЩ	Известняк (Тольятти)	0,115	0,347	2331	112,2	6,21	2,22	0,40

**Порошково-активированные песчаные бетоны без микрокремнезема**

17	ПАПБ-101	623 ЦЩ	Гранит	0,128	0,379	2296	107,2	5,81	1,69	0,36
18	ПАПБ-104	643 ЦЩ	Мрамор	0,096	0,314	2303	105,4	6,10	1,76	0,42

**Порошково-активированные щебеночные бетоны без микрокремнезема**

19	ПАЩБ-84	310 ЦН	Известняк (Тольятти)	0,064	0,496	2538	78,2	3,96	2,09	0,31
20	ПАЩБ-89	300 ЦН	То же	0,074	0,570	2445	68,0	4,41	2,47	0,28
21	ПАЩБ-90	247 ЦН	—»—	0,069	0,650	2404	52,7	4,69	2,61	0,35
22	ПАЩБ-91	300 ЦН	—»—	0,068	0,515	2451	90,1	3,33	2,37	0,24
23	ПАЩБ-112	294 ЦЧ	—»—	0,055	0,427	2369	54,4	5,40	2,41	0,28
24	ПАЩБ-113	450 ЦЧ	—»—	0,066	0,326	2370	97,8	4,60	2,89	0,24

П р и м е ч а н и е. ЦД – ПЦ СЕМ I 52,5R (белый), AlborgWeit, Дания; ЦК – ЦЕМ I 42,5Н, ОАО «Красноярск»; ЦЩ – ПЦ500 ДО (белый), ОАО «Шуровский цемент», Московская область; ЦН – ПЦ500 ДО, ОАО «Новотроицкий цементный завод», Оренбургская область; ЦЧ – ЦЕМ I 42,5Н, ЗАО «Катавский цемент», Челябинская область.

лись высокоэффективные поликарбоксилатные СП Melflux 5581F и Хидетал 9γ (в составах № 23, 24).

У всех представленных в таблице составов определялись водопоглощение ( $W_m^3$ ), усадка в естественно-воздушных условиях при относительной влажности воздуха  $60 \pm 5\%$  ( $\varepsilon_{yc}$ ), а также набухание в воде после усадки.

Водопоглощение ПБ через 3 сут насыщения, в основном, находится в пределах 2–3 % и не превышает значений водопоглощения традиционных тяжелых щебеночных бетонов старого поколения с высоким расходом плотного щебня и количеством цемента 300–400 кг/м<sup>3</sup>. Усадочные деформации находятся в диапазоне 0,3–0,4 мм/м, т.е. также не превышают допустимых значений для тяжелого бетона. Необходимо при этом учесть, что в отличие от бетонов со щебнем и песком, порошковые бетоны более чем наполовину состоят из тонкомолотых и тонкозернистых компонентов, а тонкозернистый песок расположен дискретно в суспензионной матрице. В связи с этим утверждение о существенном возрастании усадки с увеличением расхода цемента (600–700 кг/м<sup>3</sup>) и тонкомолотых добавок, справедливо для бетонов старого поколения, неправомерно для бетонов нового поколения.

Из анализа результатов таблицы следует, что водопоглощение порошковых бетонов на всех видах наполнителей из горных пород, за исключением никольского песчаника, находится в пределах 2,1–3,0 %. Усадка образцов практически всех составов варьируется от 0,27 до 0,42 мм/м. Из данной серии выделяются несколько образцов. Так, водопоглощение образцов на никольском песчанике составляет  $W_m^3 = 5,89\%$ , а усадка возрастает до 0,8 мм/м. Причина состоит в высоком водосодержании бетона и его низкой плотности (2095 кг/м<sup>3</sup>), вследствие значительного водопоглощения высокодисперсного никольского молотого песчаника.

Анализ водопоглощения ПАПБ показал, что водопоглощение на 3 сут составляет 1,7–1,76 % по массе. Такое низкое водопоглощение может свидетельствовать о высокой плотности матрицы и об оптимальной гранулометрии смесей.

Усадка порошково-активированного малоцементного щебеночного бетона (№ 21) с расходом цемента 247 кг/м<sup>3</sup>, прочностью 52,7 МПа и с повышенным отношением В/Ц равна 0,35 мм/м. При снижении водоцементного отношения (№ 22 и 23) усадка понижается до 0,24–0,30 мм/м. В целом низкие значения усадочных деформаций самоуплотняющихся порошковых бетонов нового поколения дают основание говорить о повышенной их трещиностойкости от средовых и силовых воздействий при эксплуатации конструкций.

Удельный расход цемента на единицу прочности в ПБ и ПАПБ в среднем составляет от 5,8 до 6,5 кг/МПа. Наиболее низкие удельные показатели расхода цемента получены у малоцементных ПАЩБ, где минимальное значение  $\bar{C}_{R_{cjk}}^{уд}$  составляет 3,3–4,7 кг/МПа. При этом повышение водоцементного отношения в 1,5–2,4 раза приводит к значительному увеличению удельного расхода цемента на единицу прочности до 7,2 кг/МПа. Необходимо отметить, что для песчаных бетонов старого поколения  $\bar{C}_{R_{cjk}}^{уд} = 12–14$  кг/МПа, а для бетонов переходного поколения

с суперпластификаторами удельный расход обычно составляет от 9 до 12 кг/МПа и более. Самые лучшие бетоны переходного поколения с микропремнеземом имеют удельный расход цемента 6–8 кг/МПа.

Получены ПАЩБ нового поколения с низким расходом цемента до 300 кг/м<sup>3</sup>, которые свидетельствуют о том, что без дорогостоящего микропремнезема возможно достижение прочности 54–90 МПа.

**Выводы.** 1. Установлено, что молотые горные породы различного химико-минералогического состава и генетического происхождения являются высокоэффективными дисперсными добавками, которые, будучи введенными в значительных количествах от 40 до 100 % от массы цемента, позволяют получать бетоны с прочностью при сжатии от 54 до 110 МПа в зависимости от содержания цемента и вида порошковых и порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонов.

2. Установлено, что удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии, являющийся всеобъемлющим оценочным критерием всех выпускаемых бетонов, находится в пределах 3,3–6,6 кг/МПа, что значительно ниже, чем в бетонах старого и переходного поколений с СП.

3. Выявлены гигрометрические свойства бетонов нового поколения: усадка и водопоглощение. Установлено, что водопоглощение этих бетонов находится в пределах 1,7–3,0 % в зависимости от вида бетона, что гарантирует высокую их водостойкость, низкую водопроницаемость и морозостойкость, и определяет их долговечность.

4. Усадочные деформации порошковых бетонов нового поколения не превышают деформаций высоконаполненных щебеночных бетонов старого и переходного поколений, а усадочные деформации ПАПБ в 2,0–2,5 раза меньше, чем у современных традиционных песчаных бетонов. Учитывая, что самоуплотняющиеся бетоны являются шагом в будущее, переход на технологию их производства гарантирует высокие технико-экономические показатели бетонов нового поколения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения [Текст] / В.И. Калашников // Стройт. материалы. — 2012. — № 10. — С. 70–71.
2. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения [Текст] / В.И. Калашников // Стройт. материалы. — 2011. — № 3. — С. 103–106.
3. Тараканов, О.В. Влияние суперпластификаторов на пластичность цементных и минеральных паст [Текст] / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Технологии бетонов. — 2013. — № 2 (79). — С. 18–20.
4. Тараканов, О.В. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов [Текст] / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. — 2014. — № 2. — С. 47–53.

*КАЛАШНИКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Kalashnikov\_v@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*БЕЛЯКОВА Елена Александровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: var\_lena@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*МОРОЗ Марина Николаевна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; E-mail: mn\_moroz@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*МОСКВИН Роман Николаевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: moskva\_in@mail.ru  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
БЕЛЯКОВА Варвара Сергеевна, студ.  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено 16.10.14

**Kalashnikov Vladimir Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Kalashnikov\_vii@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Belyakova Elena Aleksandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: var\_lena@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Moroz Marina Nikolaevna**, candidate of technical sciences, senior researcher; E-mail: mn\_moroz@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Moskovin Roman Nikolaevich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: moskva\_in@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Belyakova Varvara Sergeevna**, student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **HYGROMETRIC PROPERTIES OF POWDER AND POWDER-ACTIVATED CONCRETE ON THE BASIS OF VARIOUS ROCKS**

The results of investigations 24 compositions heavy powder, powder-activated sand and crushed stone concrete of a new generation without silica fume are presented. They are compared with conventional concretes differ not only an increased amount of dispersed components, but also improved physical and mechanical performance properties. As a highly fillers in such concretes used mill ground rocks of different chemical and mineralogical composition and genetic origin. Determined strength and hygrometric properties of concretes investigated by 8 kinds of fillers. Along with high strength ensures high frost resistance, water resistance and durability of concrete of new generation.

**Key words:** mill ground fillers, high-strength concrete, water absorption, frost.

### **REFERENCES**

1. Kalashnikov, V.I. What is powder-activated concrete new generation [Text] / V.I. Kalashnikov // Building materials. — 2012. — N 10. — P. 70–71.
2. Kalashnikov, V.I. Terminology science of concrete new generation [Text] / V.I. Kalashnikov // Building materials. — 2011. — N 3. — P. 103–106.
3. Tarakanov, O.V. Effect of superplasticizers on the plasticity of cement and mineral pastes [Text] / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // Technology of concrete. — 2013. — N 2 (79). — P. 18–20.
4. Tarakanov, O.V. Self-compacting concrete new generation based on local raw materials [Text] / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskovin // Regional architecture and engineering. — 2014. — N 2. — P. 47–53.

**УДК 691.327:53**

**С.И. ПИМЕНОВ, Р.А. ИБРАГИМОВ, В.С. ИЗОТОВ**

## **ВЛИЯНИЕ ГИДРОМЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТНОЙ СУСПЕНЗИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА**

Представлены результаты влияния гидромеханохимической активации цементной супензии на физико-механические свойства тяжелого бетона. Определена оптимальная доля активированного портландцемента от его общей массы в составе бетонной смеси заданного состава. Изучено влияние суперпластифицирующей добавки Реламикс Т-2 на реологические свойства цементного теста и кинетику твердения тяжелого бетона как при гидромеханохимической активации вяжущего, так и без нее.

**Ключевые слова:** суперпластификатор, цементная супензия, тяжелый бетон, гидромеханохимическая активация, роторно-пульсационный аппарат.

Бетон является одним из ведущих строительных материалов, применяемых как в России, так и за рубежом. Постоянное совершенствование строительных технологий, их интенсификация предъявляют все более высокие требования к качеству материалов, в особенности, бетона, используемого для промышленного и жилищного строительства. В настоящее время активно ведется поиск и изучение новых, более совершенных способов повышения эффективности бетона, улучшения его качества и снижения себестоимости.

Наиболее широко применяемым в производстве способом повышения качества бетона является использование добавок, позволяющих увеличить его плотность, прочность, снизить водоцементное отношение и повысить долговечность [1, 2]. Не менее распространенным способом улучшения физико-механических свойств бетона служат различные методы активации цемента. Среди них, на наш взгляд, особый интерес вызывает гидромеханохимическая активация (ГМХА) цемента, позволяющая при минимальных энергозатратах создавать цементные композиты повышенной прочности за счет использования внутреннего потенциала цементного камня, направленного на увеличение его начальной прочности [3, 4].

В работах по исследованию влияния ГМХА цементной супензии на кинетику набора прочности цементно-песчаного раствора и бетона, в частности в [5, 6], отмечается, что прирост прочности бетона в зависимости от вида цемента, продолжительности гидромеханохимической активации цементной супензии в присутствии суперпластификатора С-3 в 1 сут твердения составляет от 20 до 100 %, на 28 сут — от 3 до 50 % от контрольного состава.

В данной статье приводятся результаты исследования влияния гидромеханохимической активации цементной супензии на плотность, прочность на сжатие тяжелого бетона.

На первом этапе исследований ГМХА цементной супензии без поверхностно-активных веществ (ПАВ) выполняли на роторно-пульсацион-

ном аппарате (РПА), выпускаемом по ТУ 5132-001-70447062. В качестве вяжущего использовали портландцемент М400 Д20 Ульяновского завода. Ранее нами выявлено оптимальное время гидромеханической активации (ГМА) цементной суспензии в РПА, которое составило 2 мин [7].

Изучено влияние доли активированного цемента от его общей массы, необходимого для приготовления бетонной смеси заданного состава, на кинетику твердения бетона. Активации подвергались суспензии, содержащие 25, 50, 75 и 100 % цемента от его общей массы.

Для эксперимента определен тяжелый бетон производственного состава ( $\bar{\rho} = 490 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\Pi = 555 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\bar{\eta} = 1315 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) класса В25 с осадкой конуса 7–9 см. Заполнителями служили обогащенный песок Камского месторождения с модулем крупности 2,7, щебень из гравия Камского месторождения фракции 5–20 мм.

Эксперимент проводили следующим образом: предварительно часть расчетного количества цемента (25, 50, 75, 100 % от общей массы) перемешивали с водой затворения и подвергали ГМА в РПА в течение 2 мин. Затем в полученную суспензию добавляли оставшуюся часть цемента, крупный и мелкий заполнители и перемешивали в бетоносмесителе в течение 5 мин. Из бетонных смесей изготавливали образцы — кубы размером  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ . Через 1, 3 и 28 сут нормального твердения образцы подвергали механическим испытаниям. Прочность образцов определяли в соответствии с ГОСТ 18105–86. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

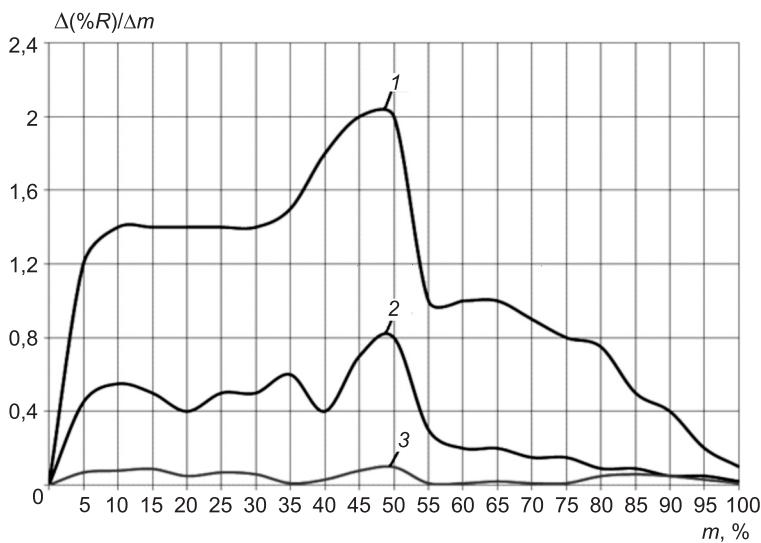
По данным табл. 1 видно, что с увеличением доли активированного цемента повышаются плотность бетона и его прочность на сжатие во все сроки твердения. Наибольший прирост прочности наблюдается в 1 сут твердения (от 33 до 80 %). На 3 сут темпы прироста прочности замедляются (от 12 до 27 %). На 28 сут прирост прочности составляет от 2 до 5 %.

Таким образом, ГМА цементной суспензии приводит к повышению прочности бетона только в ранние сроки твердения (в возрасте 1–3 сут). При этом, чем выше доля цемента в активированной суспензии, тем больше прирост прочности бетона в эти сроки.

**Таблица 1. Влияние гидромеханической активации цементной суспензии на физико-механические свойства тяжелого бетона**

Состав	Доля активированного цемента от общей массы, %	Средняя плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность бетона при сжатии, МПа		
			1 сут	3 сут	28 сут
1	0	2420	$\frac{8,13}{100}$	$\frac{23,2}{100}$	$\frac{42,8}{100}$
2	25	2435	$\frac{10,8}{133}$	$\frac{26,0}{112}$	$\frac{43,7}{102}$
3	50	2447	$\frac{13,8}{170}$	$\frac{28,3}{122}$	$\frac{44,5}{104}$
4	75	2451	$\frac{14,4}{177}$	$\frac{29,0}{125}$	$\frac{44,7}{104}$
5	100	2474	$\frac{14,6}{180}$	$\frac{29,5}{127}$	$\frac{44,8}{105}$

Примечание. В числителе приведено среднее значение показателя, в знаменателе — относительное значение показателя, %, от контрольного.



Дифференциальные кривые кинетики набора прочности бетонов при гидромеханической активации

1 — 1 сут; 2 — 3 сут; 3 — 28 сут твердения бетонов

На рисунке приведены дифференциальные кривые набора прочности тяжелого бетона при ГМА в отсутствии ПАВ. При этом по оси абсцисс представлена доля активированного цемента, %, от его общей массы ( $m, \%$ ), а по оси ординат — дифференциальное значение прироста прочности бетона к доли активированного цемента.

Наибольшая скорость изменения набора прочности бетона наблюдается при ГМА 50 % портландцемента от его общей массы. Увеличение количества используемого цемента более 50 % для активации в РПА приводит к значительному износу его рабочих органов. В связи с этим для дальнейших исследований количество активированного цемента составило 50 %.

Одним из направлений дальнейшего повышения эффективности ГМА цементной суспензии может служить его активация в присутствии ПАВ. С этой целью в качестве ПАВ нами использован суперпластификатор Реламикс Т-2 в количестве 0,8–1,2 % от массы цемента. В этом случае гидромеханическую активацию можно назвать как гидромеханохимическую.

Добавка Реламикс Т-2 — продукт конденсации на основе натриевой соли нафталинсульфокислоты и формальдегида, производимого по ТУ 5870-002-14153664-04, относится в соответствии с ГОСТ 24211–2008 к суперпластификаторам.

Предварительно изучено влияние добавки Реламикс Т-2 на нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста по ГОСТ 310.3–76. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Добавка Реламикс Т-2 при дозировке 0,8 % от массы цемента уменьшает нормальную густоту цементного теста на 15 %, при этом начало схватывания увеличивается на 35 мин, а конец схватывания — на 60 мин по сравнению с контрольным составом. При дозировке добавки 1–1,2 % от массы цемента нормальная густота цементного теста уменьшается на 23 %, начало схватывания увеличивается на 65–110 мин, а конец схва-

**Таблица 2. Влияние добавки Реламикс Т-2 на нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста**

Состав	Добавка Реламикс Т-2, %	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин	
			начало	конец
1	0	27	170	220
2	0,8	23	205	280
3	1	21	235	320
4	1,2	21	280	345

тывания — на 100–125 мин по сравнению с контрольным составом. В связи с этим в качестве оптимальной дозировки добавки определено ее содержание 1 % от массы портландцемента, при котором достигается наибольшее снижение водопотребности цементного теста.

На втором этапе исследования изучено влияние добавки Реламикс Т-2 на физико-механические свойства бетона, полученного на портландцементе, где половина его расчетной дозировки подвергалась ГМХА.

Эксперимент проводили следующим образом: предварительно 50 % расчетного количества цемента перемешивали с водой затворения, содержащей суперпластификатор Реламикс Т-2 в количестве 1 % от общей массы цемента, и далее цементную суспензию подвергали ГМХА в РПА в течение 2 мин. В полученную суспензию добавляли оставшуюся часть цемента, крупный и мелкий заполнитель и перемешивали в бетоносмесителе в течение 5 мин. Испытаниям подвергались образцы — кубы с ребрами 10 см. Результаты приведены в табл. 3.

Применение добавки суперпластификатора Реламикс Т-2 (состав № 2) повышает прочность бетона в возрасте 1 сут до 15,0 МПа, что выше прочности контрольного образца в 1,85 раза, при этом марочная прочность бетона составляет 59,8 МПа, что в 1,4 раза выше прочности бетона контрольного образца. Плотность бетона выше на 2 % по сравнению с контрольным составом.

Наибольшее повышение прочности бетона на сжатие наблюдается при ГМХА цементной суспензии в присутствии добавки Реламикс Т-2 (состав № 3). Прочность тяжелого бетона составляет 28,4 МПа в 1 сут твердения, что почти в 3,5 раза выше прочности бетона контрольного

**Таблица 3. Влияние ГМХА цементной суспензии на физико-механические свойства тяжелого бетона**

Состав	Дозировка добавки, %	Время ГМХА, мин	В/Ц	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность бетона при сжатии, МПа		
					1 сут	3 сут	28 сут
1	—	—	0,42	2420	8,13 100	23,2 100	42,8 100
2	1	—	0,31	2472	15,0 185	39,2 169	59,8 140
3	1	2	0,31	2492	28,4 349	59,4 256	71,2 166

Примечание. В числителе приведено среднее значение показателя, в знаменателе — относительное значение показателя, %, от контрольного.

состава. В марочном возрасте прочность бетона 71,2 МПа, что выше контрольного образца в 1,66 раза. Плотность бетона выше на 3 % по сравнению с контрольным составом.

Таким образом, эффективность диспергации цемента в РПА существенно повышается в присутствии ПАВ: увеличивается плотность бетона, резко возрастает его прочность, особенно в первые сутки нормально-влажностного твердения.

**Выводы.** 1. ГМА цементной суспензии в зависимости от доли используемого для активации цемента приводит к повышению прочности тяжелого бетона на 33–80 % в 1 сут твердения, на 12–27 % в 3 сут и на 2–5 % в возрасте 28 сут твердения по сравнению с контрольным составом.

2. Дальнейшее повышение эффективности ГМА, за счет введения в цементную суспензию добавки суперпластификатора Реламикс Т-2, позволяет значительно увеличить прочность тяжелого бетона на сжатие в 1 сут твердения на 249 %, на 3 сут твердения на 156 %, а в марочном возрасте на 66 % от контрольного состава.

3. Применение ГМХА цементной суспензии в технологии бетонных изделий и железобетонных конструкций представляет особый интерес в монолитном строительстве в связи с существенным повышением прочности бетона на сжатие в ранние сроки твердения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машкин, А.Н. Активация цементного вяжущего в гидродинамическом диспергаторе и свойства бетона на его основе : Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.Н. Машкин. — Новосибирск, 2009. — 17 с.
2. Изотов, В.С. Комплексная добавка для модификации бетона [Текст] / В.С. Изотов, Р.А. Ибрагимов // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 2. — С. 38–42.
3. Урханова, Л.А. Повышение эффективности строительных материалов за счет механической активации бесклинкерных вяжущих композиций. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / Л.А. Урханова. — Улан-Удэ, 2008. — 42 с.
4. Нагорняк, И.Н. Влияние гидромеханической активации цементных вяжущих на долговечность бетонов : Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / И.Н. Нагорняк. — Саранск, 2006. — 19 с.
5. Мощанский, Н.А. Механическое активирование начальной гидратации цемента в цементно-песчаных растворах [Текст] / Н.А. Мощанский // Исследования по технологии бетона. — М. : Стройиздат, 1960. — 115 с.
6. Ребиндер, П.А. Физико-механические основы эффективности мокрого помола вяжущих материалов [Текст] / П.А. Ребиндер, Т.И. Логинов // Вестн. АН ССР. — 1951. — № 10. — С. 47–50. — (Труды совещания ВПИТО строителей).
7. Пименов, С.И. Влияние механической активации цементной суспензии на прочность тяжелого бетона [Текст] / С.И. Пименов, Р.А. Ибрагимов, В.С. Изотов // VI Международная конференция молодых ученых «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов» / ПГУАС. — Казань, 2011. — С. 80–83.

*ПИМЕНОВ Сергей Иванович, асп.; E-mail: 3.14manon@mail.ru*

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

*ИБРАГИМОВ Руслан Абдирашитович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: rustmag007@yandex.ru*

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

**ИЗОТОВ Владимир Сергеевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: v\_s\_izotov@mail.ru  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 16.10.14

**Pimenov Sergey Ivanovich**, post-graduate student; E-mail: 3.14manon@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Ibragimov Ruslan Abdirashitovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: rusmag007@yandex.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Izotov Vladimir Sergeevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: v\_s\_izotov@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **INFLUENCE HYDROMECHANICALLY ACTIVATION OF CEMENT SLURRY ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE**

This article presents the results of the impact hydromechanically activation of cement slurry on the physico-mechanical properties of heavy concrete. The optimal proportion of activated portland cement from its total mass in the concrete mixture of a given composition. We studied the influence of superplasticizers supplements Relamix T-2 on rheological properties of cement paste and hardening kinetics of heavy concrete as when hydromechanically activation, and without it.

**Key words:** superplasticizer, cement slurry, heavy concrete, hydromechanical activation, rotary pulsation apparatus.

### **REFERENCES**

1. Mashkin, A.N. Activation of the cement binder in liquid dispersant and properties of concrete based on it: Abstract. dis. on the degree K. the so-called [Text] / A.N. Mashkin. — Novosibirsk, 2009. — 17 p.
2. Izotov, V.S. Complex additive for updating of concrete [Text] / V.S. Izotov, R.A. Ibragimov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 2. — P. 38–42.
3. Urhanova, L.A. Improving the efficiency of building materials by mechanochemical activation backlinking binder compositions: Abstract. dis. on competition of a scientific degree of doctor of so-called [Text] / L.A. Urhanova. — Ulan-Ude, 2008. — 42 p.
4. Nagorniyak, I.N. Impact hydro-mechanical activation of cement binders on the durability of concrete: Abstract. dis. on the degree K. the so-called [Text] / I.N. Nagorniyak. — Saransk, 2006. — 19 p.
5. Moshchanskiy, N.A. Mechanical activation of the initial hydration of cement in cement-peschanops solutions [Text] / N.A. Moshchanskiy // Studies on concrete technology. — M. : Stroyizdat, 1960. — 115 p.
6. Rebinder, P.A. Physical and mechanical bases of the efficiency of wet grinding binders [Text] / P.A. Rebinder, T.I. Loginov // Bull. of the Academy of Sciences of the USSR. — 1951. — N 10. — P. 47–50. — (Proceedings of the meeting VITP builders).
7. Pimenov, S.I. Influence of mechanical activation on the strength of the cement slurry heavy concrete [Text] / S.I. Pimenov, R.A. Ibragimov, V.S. Izotov // VI International Conference of Young Scientists «Theory and practice of increasing the efficiency of building materials» / PGUAS. — Kazan, 2011. — P. 80–83.

**УДК 691.32:625.81**

**И.И. ШЕПЕЛЕВ, Н.Н. БОЧКОВ, Р.Я. ДАШКЕВИЧ, А.Ю. САХАЧЕВ**

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ  
ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Проанализировано использование нефелинового шлама в качестве вяжущего при укреплении основания дорожных одежд. Проведены исследования по подбору составов комплексного вяжущего на основе отходов глиноzemного производства. Исследованы прочностные характеристики составов вяжущих компонентов и определены наиболее оптимальные и эффективные составы дорожных смесей, позволяющие обеспечить высокую прочность образцов.

**Ключевые слова:** нефелиновый шлам, гипсоангидрит, дорожные одежды, комплексное вяжущее, промышленные испытания.

При строительстве автомобильных дорог в РФ и за рубежом находят все более широкое применение основания из грунтов и каменных материалов, укрепленных различными вяжущими [1]. Основания из материалов, укрепленных вяжущим, не только прочны и долговечны, но и экономичны, поскольку открывают возможность использования местных некондиционных каменных материалов и промышленных отходов взамен дорогостоящего цемента. Увеличить прочностные свойства вяжущих компонентов может применение комплексных вяжущих на основе нефелинового шлама. В настоящее время определены и опробованы способы использования нефелинового шлама в цементном производстве, для получения силикатного кирпича, при закладочных работах и дорожном строительстве [2, 3].

Настоящие исследования были проведены с целью оценки практической реализации разрабатываемых ресурсосберегающих и малоотходных технологий и увеличения использования нетоксичных промышленных отходов в дорожном строительстве.

Методика исследований предусматривала изучение свойств твердеющих составов дорожных смесей, их прочностных характеристик на основе новообразований в процессе гидратации. Рентгенофазовый анализ (РФА) состава компонентов и получаемых дорожных смесей проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с использованием  $\text{Cu}-\text{K}_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1,544 \text{ нм}$ ), шаг сканирования 0,02 град, время накопления в точке 1 с. Микроструктуру и морфогеометрию минеральных продуктов исследовали на сканирующем электронном микроскопе TM-3000 (Hitachi, Япония) в обратноотраженных электронах (ускоряющее напряжение 15 кэВ). Микрорентгеноспектральный анализ выполняли на встроенным энергодисперсионном спектрометре (Bruker) с помощью системы микронализма Quantax-70. Порошковые минеральные образцы для электронной микроскопии пропитывали эпоксидной смолой Epoxyfix. После полимеризации полученные шашки шлифовали на шлифовально-полировальном

станке TegraPol 15 (бумага на основе SiC, Р200-Р2000) и полировали вручную на резиновом диске с использованием полировальных суспензий ЗМ на основе корунда. Прочность образцов определяли в возрасте 7, 14, 28 сут на пресс-машине УМЭ-10ТМ.

В качестве исходных материалов при проведении исследований по получению комплексного вяжущего применяли нефелиновый шлам и гипсодержащие отходы производства ОАО «РУСАЛ Ачинск». Нефелиновый (белитовый) шлам представляет собой пескообразную смесь с выраженным вяжущими свойствами. Нефелиновый шлам Ачинского глиноземного комбината (ОАО «РУСАЛ Ачинск») является «хвостовым» продуктом переработки кия-шалтырских нефелинов и известняка Мазульского рудника, получаемым после извлечения глинозема и содопродуктов. По данным РФА, нефелиновый шлам представлен в основном ларнитом ( $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ,  $d = 2,78; 2,74; 2,19 \text{ \AA}$ , JCPDS, 24-37) с небольшой примесью ранкинита ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $d = 5,48; 3,82; 3,04 \text{ \AA}$ , JCPDS, 24-37) (рис. 1). Отмечено также присутствие слабых линий соды (термонатрит,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $d = 5,29; 4,12; 2,44 \text{ \AA}$ , JCPDS, 8-448) и карбонатов кальция (кальцит,  $\text{CaCO}_3$ ,  $d = 3,04; 3,86; 1,912 \text{ \AA}$ , JCPDS, 47-1743). Возможно наличие диопсида ( $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ ,  $d = 3,34; 2,54; 2,215 \text{ \AA}$ , JCPDS, 19-239), но его основные пики перекрываются линиями других фаз.

Химический состав нефелинового отвального шлама приведен в табл. 1. Основной минеральный состав нефелинового отвального шлама в пробах составляет двухкальциевый силикат (более 80 %), в качестве следов до 5 % в отвальном шламе присутствуют: алюминаты натрия  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,

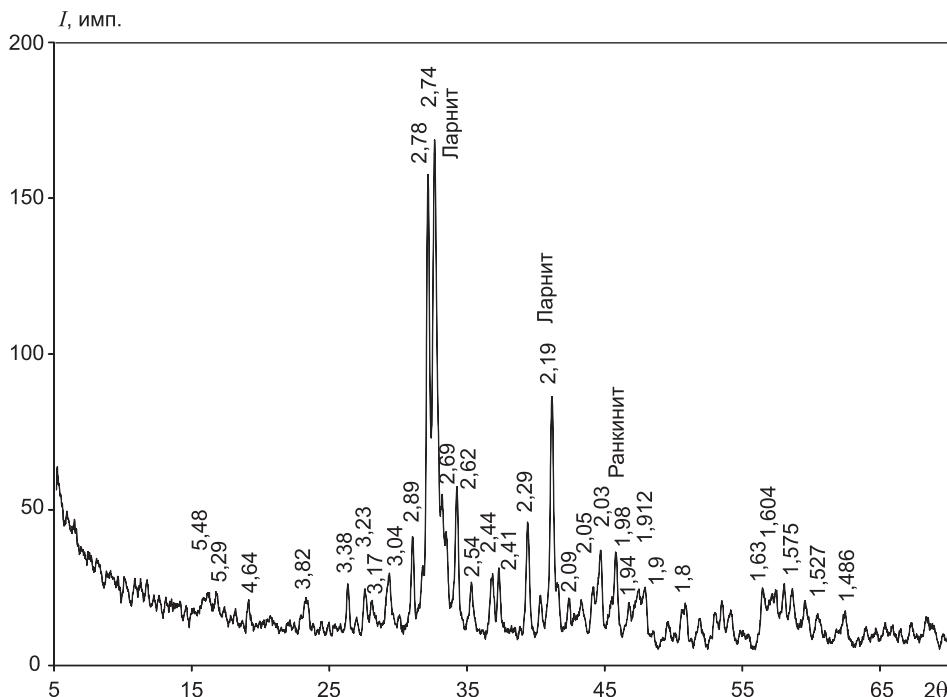


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы нефелинового шлама с указанием фазовой принадлежности основных пиков

**Таблица 1. Химический состав нефелинового шлама**

Компонент	Содержание, %
SiO <sub>2</sub>	29,9
CaO	54,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8
Na <sub>2</sub> O	1,4
K <sub>2</sub> O	0,4
MgO	1,4
SO <sub>3</sub>	0,2
F	0,3
Прочее	4,5

**Таблица 2. Минералогический состав нефелинового шлама**

Компонент	Содержание, %
Двухкальциевый силикат частично гидратированный	80–85,0
Алюминаты	3,5–4,0
Оксиды железа	4,0
Шелочи	2,2–2,8
Магний	1,5

кальций-магниевые силикаты CaO × × MgO · SiO<sub>2</sub>, натрокальциевые силикаты Na<sub>2</sub>O · CaO · SiO<sub>2</sub>, гидрогранаты кальция 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SiO<sub>2</sub> · (6-x)H<sub>2</sub>O, кальциевые алюминаты CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 2). Гранулометрический состав нефелинового шлама представлен в табл. 3.

Нефелиновый шлам является нетоксичным отходом. Подтверждением этого является заключение аккредитованной лаборатории АНО «Экспертно-аналитический центр по проблемам окружающей среды «ЭКОТЕРРА» г. Москва, основанное на исследовании экспериментальным методом биотестирования компонентного состава отхода и результатов определения токсического действия водной вытяжки из него. Экспериментально подтверждено отнесение нефелинового шлама к 5-му классу опасности (не опасные отходы) для окружающей природной среды. ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае» проведена санитарно-эпидемиологическая экспертиза нефелинового шлама по показателям радиационной безопасности и сделано заключение, что удельная активность естественных радионуклидов, содержащихся в нефелиновом шламе, не превышает гигиенический норматив, установленный НРБ-99 для отходов промышленного производства, используемых при изготовлении строительных материалов 1-го класса, и соответственно равна 66,9 Бк/кг при нормативе 370 Бк/кг [4].

**Таблица 3. Гранулометрический состав нефелинового шлама**

Размер фракции, мм	Менее 0,01	0,01–0,05	0,05–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	1,0–2,0	Более 2,0
Содержание фракции, %	1,2	5,7	8,1	20	26	26,6	11,1	1,3

Как показал опыт строительства и эксплуатации отдельных участков федеральной трассы М-53 («Байкал») от г. Боготола до г. Канска, нефелиновый шлам может достаточно эффективно использоваться в качестве неорганического вяжущего для укрепления основания дорог. Отделом контроля качества КГУ Краевого управления автомобильных дорог Красноярского края было проведено детальное обследование участков автодорог и отмечено, что эти дороги менее подвержены разрушению, служат значительно дольше, что сокращает затраты на их ремонт.

Несмотря на перспективность устройства дорожных оснований из грунтов и других материалов, укрепленных шламонефелиновыми вяжущими, та-

кие основания не получили широкого распространения в районах Сибири и на практике применяются в основном ООО «ДПМК “Ачинская”» ООО «Илан». В последние годы изыскания и исследования в практике дорожного строительства направлены на поиск комплексных вяжущих материалов, в том числе из отходов металлургических производств. Увеличить прочностные свойства вяжущих компонентов может применение комплексных вяжущих на основе нефелинового шлама и активаторов твердения.

В качестве другого возможного вяжущего компонента дорожных смесей нами был рассмотрен и исследован гипсоангидритовый отход (ГАО) производства фтористого алюминия ОАО «РУСАЛ Ачинск». На дифрактомограмме образца гипсоангидритовых отходов отмечены в основном характерные линии гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , JCPDS, 36-432) и бассанита ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , JCPDS, 41-224), присутствуют также линии кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ,  $d = 3,86; 3,03; 1,912 \text{ \AA}$ , JCPDS, 47-1743). Это подтверждается данными фазового состава этих отходов, которые на 90–95 % состоят из сульфата кальция, представленного смесью ангидрита и гипса (табл. 4). Данный отход размещен на гипсохранилище ОАО «РУСАЛ Ачинск» в количестве более 120 тыс. т и практически не используется. Ранее он вовлекался во вторичную переработку в ограниченных объемах, необходимых для производства содопродуктов ОАО «РУСАЛ Ачинск» [2]. В связи с длительным хранением гипсоангидрита на гипсохранилище для активации его поверхности он предварительно измельчался. Тонкость помола соответствовала 55–56 % доле материала, измельченного до класса 0,08 мм. Активацию проводили в лабораторной шаровой мельнице МЛБ-2 в периодическом режиме. Время, необходимое для активации минералов, при этом составляло 25 мин. Мелющие тела — сталь, диаметром 1–3 см. Шаровая загрузка 40 кг. Загрузка материала 50 кг. Длительность измельчения 30 мин. Нефелиновый шлам, который использовался во влажном состоянии, отбирался со шламохранилища ОАО «РУСАЛ Ачинск».

Для приготовления дорожной смеси щебеночную смесь фракции 0–40 мм смешивали с нефелиновым шламом с добавлением гипсоангидритовых отходов. По данным РФА, щебень представлен в основном кальцитом ( $\text{CaCO}_3$ ,  $d = 3,86; 3,03; 1,912 \text{ \AA}$ , JCPDS, 47-1743). В подчиненных количествах (до 10 % от основной фазы) присутствуют кварц ( $\text{SiO}_2$ ,  $d = 4,26; 3,34; 1,818 \text{ \AA}$ , JCPDS, 5-490), доломит ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ,  $d = 2,89; 2,20; 2,01 \text{ \AA}$ , JCPDS, 36-426) и каолин ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ,  $d = 7,19; 3,59; 1,47 \text{ \AA}$ , JCPDS, 6-201). Возможно наличие небольших количеств клинохлора ( $(\text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ , JCPDS, 16-351) и гриналита ( $\text{Fe}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ , JCPDS, 39-337) (рис. 2). При уплотнении во влажном состоянии нефелиновый шлам текущего производства и щебеноочно-песчаная смесь обладают способностью преобразовываться в монолитный водостойкий материал с дальнейшим набором прочности во времени.

Таблица 4. Фазовый состав гипсоодержащих отходов ОАО «РУСАЛ Ачинск»

Компонент	Содержание, %
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,6
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	5,4
$\text{CaSO}_4$	54,0
$\text{CaF}_2$	2,4
$(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	0,6
Прочие соединения	1,0

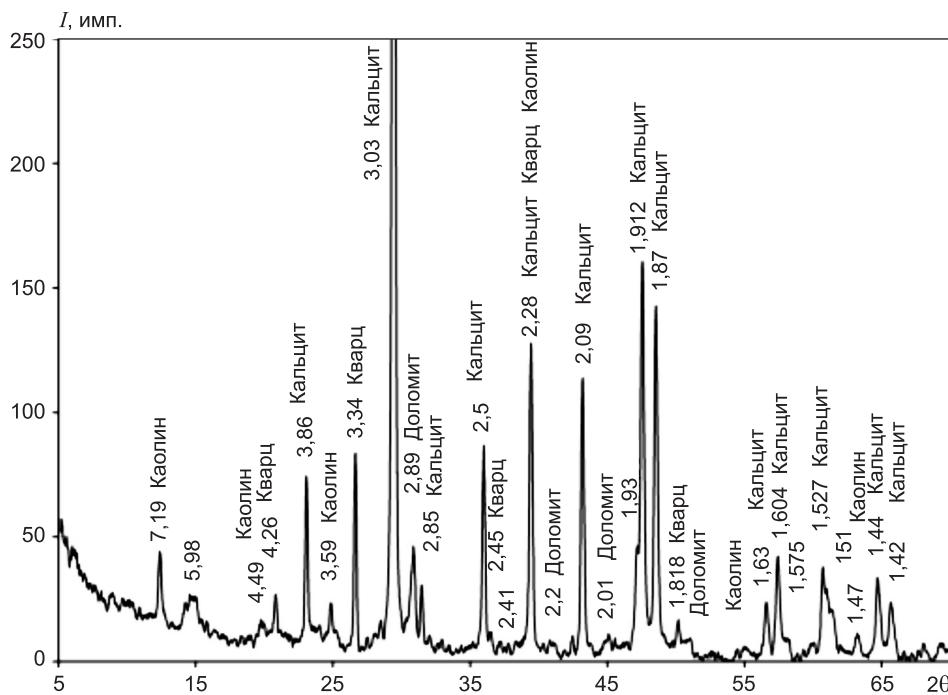


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы пробы измельченного известняка с указанием фазовой принадлежности основных пиков

Исследование прочностных свойств образцов, приготовленных из данных смесей, показали, что при использовании в качестве активатора нефелинового шлама измельченного гипсоангирида в диапазоне от 5 до 30 мас. % прочность образцов по сравнению с применением одного нефелинового шлама возрастает в 1,8–2,2 раза. Следует отметить, что даже при минимальных 3–5 % дозировках гипсоангирида в смесь с нефелиновым шламом обеспечивается высокая прочность образцов по срокам твердения: соответственно для 7 сут — 6,1 МПа; 14 сут — 9,8; 28 сут твердения — 10,7 МПа (рис. 3).

При введении добавки гипсоангирида в исследуемые образцы из гипсо-нефелино-известняковой смеси отмечено, что прочность образцов при сжатии возрастает существенное, чем прочность образцов на растяжение при изгибе. При добавке 5 % гипсоангирида при 28-суточной

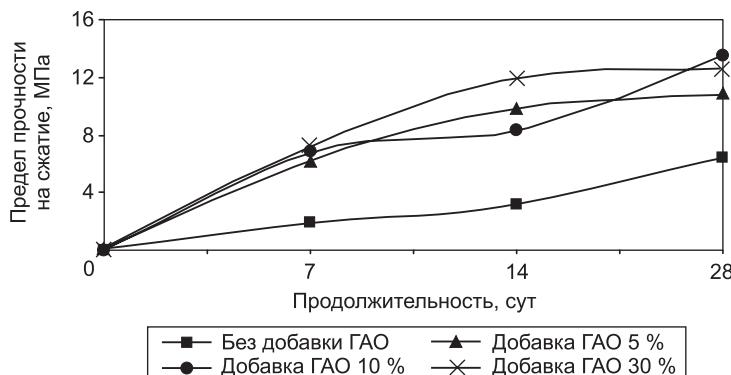


Рис. 3. Изменение предела прочности образцов нефелиново-известняковой смеси в процессе твердения в зависимости от добавок гипсоангиридовых отходов

выдержке образцов предел прочности при изгибе составил 6,2 МПа, а при добавке 30 % гипсоангирида соответственно 9,1 МПа, в то время как контрольные образцы нефелиново-щебеночной смеси без добавок гипсоангирида имели прочность при изгибе 4,1 МПа.

Одним из важных показателей является водопроницаемость образцов. Исследования показали, что при увеличении дозировки гипсоангирида показатель водопроницаемости образцов (коэффициент фильтрации) уменьшается с  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м / сут при 5 мас. % до  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м / сут при 30 мас. % вводимой добавки. Водопроницаемость образцов при использовании в качестве вяжущего одного нефелинового шлама находилась на уровне  $(4,3-4,8) \cdot 10^{-3}$  м / сут.

Добавка в состав нефелинового вяжущего гипсоангиритовых отходов ОАО «РУСАЛ Ачинск» обеспечивает более высокие показатели морозостойкости образцов дорожных смесей. При использовании состава вяжущего на основе одного нефелинового шлама морозостойкость образцов имела 62 цикла. Применение состава нефелинового вяжущего с добавками 5–10 мас. % гипсоангиритовых отходов увеличивало морозостойкость до 70–75 циклов. Добавка гипсоангиритовых отходов более 30 мас. % в нефелиновое вяжущее снижала морозостойкость испытуемых образцов до 65 циклов и приводила к некоторому снижению прочности образцов.

Электронно-микроскопические исследования показали, что нефелиновый шлам представлен в основном пористыми частицами ларнита (300–500 мкм) (рис. 4, а). В порах отмечено присутствие остатков соды.

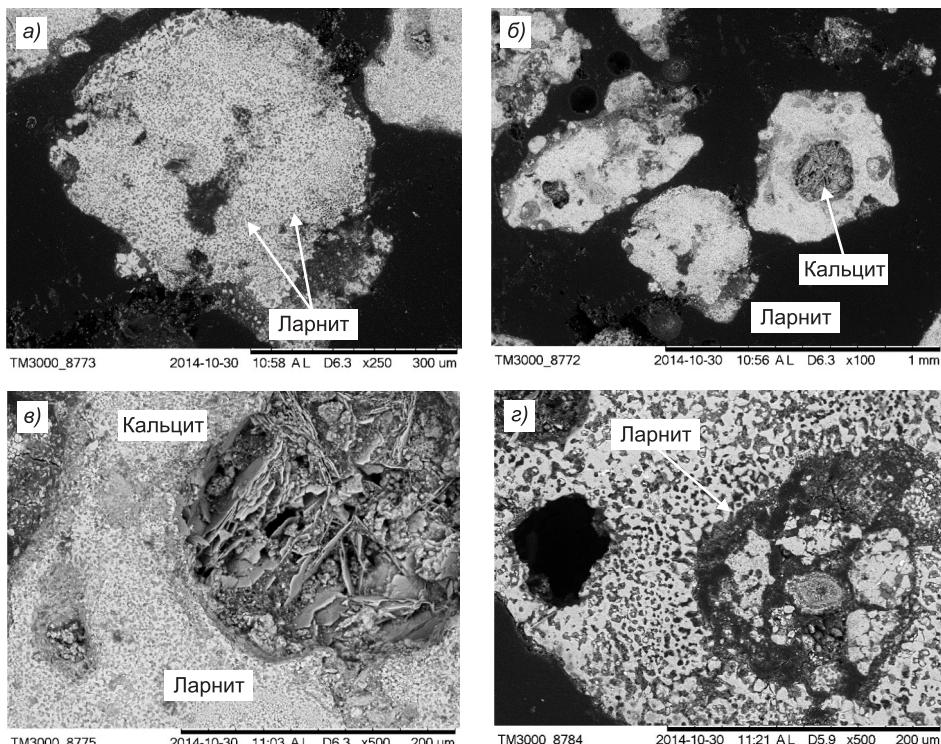


Рис. 4. Микроструктура изображения частиц нефелинового шлама (аншлиф, эпоксидная смола)

а — нефелиновый шлам; б, в — нефелиновый шлам с измельченным известняком; г — смесь нефелинового шлама с добавками измельченных известняка и гипсоангирида

Увеличение: а —  $\times 250$ ; б —  $\times 100$ ; в, г —  $\times 500$

На микрофотографиях нефелинового шлама с измельченным известняком видно, что внутри частиц шлама имеются крупные полости (до 50–100 мкм) пустые или проросшие пластинчатыми кристаллами кальциита (рис. 4, б, в). Микроструктура смеси нефелинового шлама с добавками измельченных известняка и гипсоангидрита приведена на рис. 4, г, на которой присутствуют частицы ларнита, кальциита и бассанита, при этом видны также поры микронной крупности, что обусловлено формированием мостиковых гипсовых связей.

На основании исследований нами был разработан технологический регламент устройства нижнего слоя основания из щебеночной смеси фракции 0–40, обработанной 30 мас. % нефелиновым шламом с добавлением 5 мас. % гипсоангидритового компонента. Промышленные испытания по разработанной технологии проводились в летне-осенний период 2012 г. на выбранных опытных участках реконструируемой автодороги Красноярск–Железногорск. Приготовленную дорожную смесь транспортировали на опытные участки автодороги и производили укладку основания механизированным способом. По данным лабораторных исследований образцов дорожных смесей комплексное гипсоангидритово-нефелиновое вяжущее технологически более эффективно с использованием измельченного гипсоангидрита, так как обеспечивается активация его поверхности. Активность нефелинового шлама увеличивается при введении в его состав не менее 5 мас. % измельченной гипсодержащей добавки, которая выполняет роль активатора твердения и увеличивает прочностные свойства дорожных смесей на основе нефелинового шлама. Изменение предела прочности образцов на сжатие в процессе твердения нефелиново-щебеночной смеси с добавками гипсоангидритовых отходов приведено на рис. 3. Скорость набора прочности в ранние сроки обусловлена взаимодействием сульфата кальция с гидратирующими двухкальциевым силикатом и кальций-магниевым силикатом.

Таким образом, с точки зрения улучшения технико-технологических показателей при использовании комплексного вяжущего на основе нефелинового шлама и гипсоангидритовых отходов в дорожном строительстве может быть достигнуто увеличение срока службы дорожного покрытия за счет повышения прочности слоя основания и сокращение затрат на межремонтные сроки в процессе эксплуатации дороги. Введение в состав вяжущего гипсоангидритовых отходов ускоряет процесс набора прочности вяжущего и обеспечивает более высокие темпы строительства дорог.

Применение отходов металлургических (гипсоангидрит, золошлаковые отходы, отходы газоочистных сооружений) может быть также перспективно в дорожно-строительных технологиях и позволит снизить негативную нагрузку на окружающую среду.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обзорная информация о передовых отечественных и зарубежных технологиях и дорожно-строительных материалах [Текст] / М-во трансп. Российской Федерации, Федер. дор. агентство (Росавтодор). — М., 2005. — 95 с.
2. Головных, Н.В. Физико-химическое обоснование экологически безопасных технологий производства глинозема при переработке алюминиевого сырья по способу спекания [Текст] / Н.В. Головных, В.А. Бычинский, И.И. Шепелев, А.А. Тупицын // Цветная металлургия. — 2005. — № 8. — С. 15–24.

3. Шепелев, И.И. Пути решения проблем вторичного использования отходов Ачинского глиноземного комбината [Текст] / И.И. Шепелев, Р.Я. Дашкевич, В.А. Матвиенко, В.А. Кожевников // Сб. науч. ст. V Междунар. конгр. «ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ-2013» / под ред. проф. П.В. Полякова. — Красноярск : Версо, 2013. — С. 395–402.
4. Пособие по охране окружающей среды при производстве дорожно-строительных материалов [Текст]. — М., 2002. — 122 с.

**ШЕПЕЛЕВ Игорь Иннокентьевич**, д-р техн. наук; E-mail: *Ekoing@mail.ru*  
АФ Красноярского государственного аграрного университета, г. Ачинск  
**БОЧКОВ Николай Николаевич**, исполн. директор; E-mail: *nbochkov@yandex.ru*  
Дорожно-переводимая механизированная колонна «ДПМК Ачинская»  
**ДАШКЕВИЧ Раиса Яковлевна**, канд. техн. наук; E-mail: *dashkevichraisa@mail.ru*  
АФ Сибирского федерального университета, г. Ачинск  
**САХАЧЕВ Алексей Юрьевич**, директор по технологии; E-mail: *Sakhachev\_Aleks@mail.ru*  
ОАО «РУСАЛ Ачинск»

Получено после доработки 03.10.14

**Shepelev Igor Innokentjevich**, doctor of technical sciences; E-mail: *Ekoing@mail.ru*, Achinsk branch of Krasnoyarsk State Agricultural University, Russia  
**Bochkov Nikolay Nikolaevich**, director; E-mail: *nbochkov@yandex.ru*, Society with limited liability «DPMK of Achinsk», Russia  
**Dashkevich Raisa Yakovlevna**, candidate of technical sciences; E-mail: *dashkevichraisa@mail.ru*, Achinsk branch of Siberian Federal University, Russia  
**Sakhachev Aleksey Yurievich**, director on technology; E-mail: *Sakhachev\_Aleks@mail.ru*, Open Society «RUSAL Achinsk», Russia

## **EXPERIENCE OF APPLICATION OF NONTOXICAL WASTE OF ALUMINOUS MANUFACTURE IN ROAD CONSTRUCTION**

The analysis of use nepheline slime as the basis road clothes knitting at strengthening is lead. Researches on selection of structures of complex aluminous manufacture knitting on the basis of waste are executed. A research on complex compositions of the bonding material based on the metallurgical production's wastes was done. Structural performance of bonding components was examined. The most effective compositions, which guarantee high compressive strength of the samples, were determined.

**Key words:** nepheline slime, gypsum-anhydrite, road clothes, complex knitting, industrial tests of technologies.

### **REFERENCES**

1. The survey information on the advanced domestic both foreign technologies and road-building materials [Text] / The ministry of transport of The Russian Federation, Federal road agency (Rosavtodor). — M., 2005. — 95 p.
2. Golovnich, N.V. Physical and chemical substantiation of ecologically safe «know-how» of alumina at processing aluminium raw material on a way of sintering [Text] / N.V. Golovnich, V.A. Bychinskiy, I.I. Shepelev, A.A. Tupitsyn // Nonferrous metallurgy. — 2005. — N 8. — P. 15–24.
3. Shepelev, I.I. Way of the decision of problems of secondary use of Achinsk aluminum combine [Text] / I.I. Shepelev, R.Ya. Dashkevich, V.A. Matvienco, V.A. Kozhevnikov // The collection Scientific articles V International. The congress «COLOR METALS-2013» / ed. professor P.V. Polyakova. — Krasnoyarsk : Verso, 2013. — P. 395–402.
4. Manual on environmental protection by produktion of road construction materials [Text]. — M., 2002. — 122 p.

## 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 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ

Продемонстрировано удовлетворительное согласование полученных в результате численного моделирования характеристик течения с аналитическими и экспериментальными данными. Установлены параметры первой вихревой области и предложена аналитическая зависимость для определения ее границ.

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

В статье продолжается нумерация формул и рисунков сообщения 1 [1].

**3. Установление достоверности разработанной математической модели.** Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициента неравномерности проиллюстрировано на рис. 3.

Кривая 1 построена при  $l/R = 2$  и коэффициент неравномерности по сечению раструба рассчитывался по формуле

$$\eta = v_c / v_p,$$

где  $v_p$  — средняя скорость на входе в раструб, определяемая по формуле (6).

Как видно из рисунка, в диапазоне углов  $\beta = 0\text{--}30^\circ$  расчетная величина  $\eta$  близка к постоянной величине и превышает экспериментальные значения, изображенные черными кружочками, на величину, не превосходящую 30 %. Далее это расхождение сокращается до  $\approx 10\%$  в диапазоне углов  $\beta = 40\text{--}50^\circ$ .

Кривые 2–4 построены при  $l/R = 2; 5; 10$  соответственно и коэффициент неравномерности по сечению раструба рассчитывался по формуле:

$$\eta = v_c / v_e,$$

где  $v_e$  — средняя эффективная скорость всасывания, определяемая по формуле (4).

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-41-08005р\_офи\_м) и Президента РФ (проект МК-103.2014.1).

Здесь лучшее совпадение с экспериментальными данными [2]: в диапазоне углов  $\beta = 0\text{--}30^\circ$  происходит их совпадение с точностью до 1 %; при  $\beta = 40\text{--}50^\circ$  погрешность расчета относительно эксперимента достигает 30 %.

Качественно наблюдается одинаково хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Заметим, что расчет такого быстрого возрастания коэффициента неравномерности начиная с  $30^\circ$  не дает, здесь кривая более плавная. При возрастании длины раstra отмечается более высокий темп роста этой кривой. И эксперимент, и расчет фиксируют наиболее равномерное всасывание при  $\beta \leq 30^\circ$ .

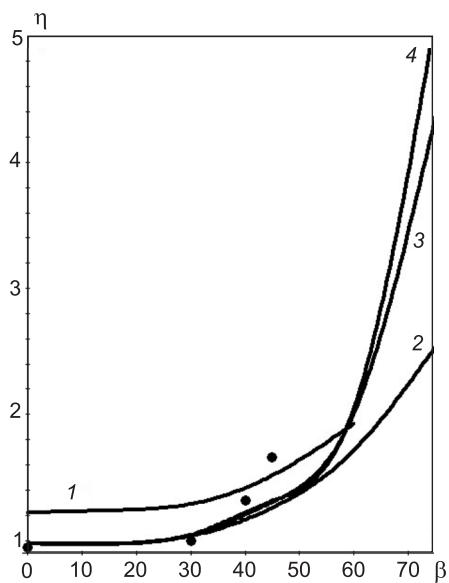


Рис. 3. Зависимость коэффициента неравномерности  $\eta$  от угла раскрытия раstra

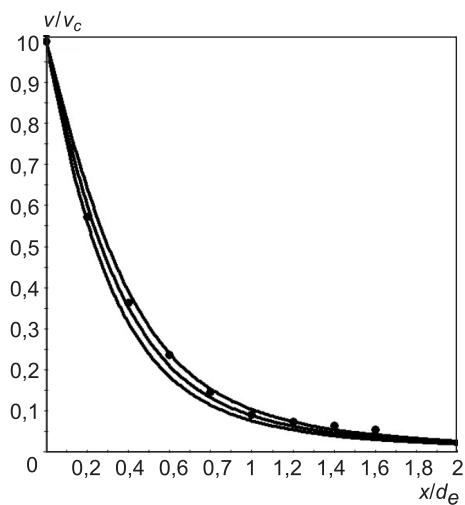


Рис. 4. Изменение безразмерной осевой скорости при удалении от отсоса-растра

В работе [2] приведены экспериментальные значения безразмерной осевой скорости воздуха  $v / v_c$  при удалении от входа в раstrub, изображенные на рис. 4 черными кружочками. Эти экспериментальные значения обобщают исследования вблизи квадратных и прямоугольных зонтов с соотношением сторон до 1 : 4 с углом раскрытия  $50^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . О длинах раstra информации приведено не было [2]. Верхняя кривая (рис. 4) построена расчетным путем при  $\alpha = 30^\circ$  и длине раstra  $l / R = 2$ ; средняя кривая —  $\alpha = 38^\circ$  и  $l / R = 2$ ; нижняя кривая —  $\alpha = 45^\circ$  и  $l / R = 2$ . По оси абсцисс у экспериментальной кривой откладывались величины эквивалентного диаметра  $d_e = 2ab / (a+b)$ , где  $a, b$  — длина и ширина зонта. Для исследуемого круглого раstra  $d_e = 2(R + dsin\beta)$ . Сравнение с экспериментальными величинами (черные кружочки) осевой скорости, отнесенными к скорости в центре раstra, показывает их удовлетворительное согласование.

Расчетные значения осевой скорости (сплошная кривая) у круглого всасывающего патрубка превышают экспериментальные значения [3]

(черные кружочки) и экспериментальную кривую В.Н. Посохина [4] (штрихпунктирная линия) не более чем на 13 % на входе в патрубок (рис. 5). При дальнейшем удалении от сечения патрубка это отличие снижается.

Расчетное значение радиуса эффективного всасывания  $R_e = 0,88R$  превышает расчетное значение В.Н. Посохина [4] на величину  $(0,88R - 0,81R) / 0,81R = 8,6 \%$ .

Коэффициент сжатия струи  $\delta_\infty / R \approx 0,7$ . Если применить формулу Борда для к.м.с. входа в круглый патрубок, то получим:

$$\zeta = \left(1 - \frac{1}{\delta_\infty^2}\right)^2 \approx 1,08,$$

что отличается от экспериментального значения И.Е. Идельчика [5] на 8 %.

Из приведенных сравнений расчетных и экспериментальных значений делаем вывод о достоверности предложенной математической модели.

**4. Закономерности изменения характерных размеров вихревой области на входе в отсос-раструб.** Как видно из рис. 6, длина вихревой области  $a$  уменьшается при  $d/R \leq 3$ , имеет экстремум при  $d/R \leq 3$  в зависимости от угла полураскрытия раструба и достигает наименьшего значения при  $\beta = 90^\circ$ . Кривые 1–5 соответствуют разным длинам раструба  $d/R = 1–5$ . Кривые 1 и 2 начинают строиться с угла  $\beta = 30^\circ$ , поскольку при меньших углах присутствует случай короткого раструба — вихревая область полностью содержит раструб и распространяется внутрь трубы. Заметим, что расчет этой величины представляет некоторую трудность, так как точку налипания свободной линии тока на раструб в рамках этой модели можно определить

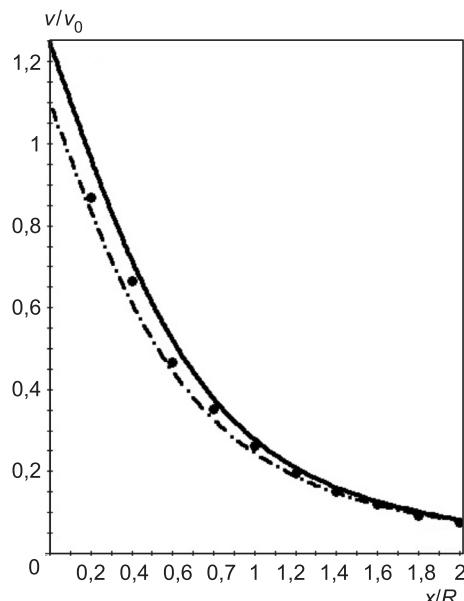


Рис. 5. Изменение безразмерной осевой скорости воздуха при удалении от всасывающего сечения круглого патрубка без раструба

полностью содержит раструб и распространяется внутрь трубы. Заметим, что расчет этой величины представляет некоторую трудность, так как точку налипания свободной линии тока на раструб в рамках этой модели можно определить

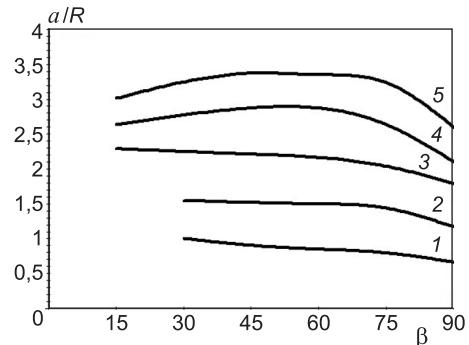


Рис. 6. Зависимость длины вихревой области  $a$  на входе в отсос-раструб

лить приближенно. В расчетах за эту точку принималась точка линии тока, приближающаяся к растробу на величину шага дискретности  $r_h$ .

Величина  $a_0$  выноса отрывной области за растроб изменяется плавно (рис. 7). Здесь кривая 1 ( $d/R = 1$ ) демонстрирует убывание этой величины, на кривых 2–3 ( $d/R = 2–3$ ) наблюдается малозаметный максимум в диапазоне углов  $\beta = 60–75^\circ$ , кривые 4–5 ( $d/R = 4–5$ ) возрастают. Заметим, что кривые значительно отличаются от построенных зависимостей в рамках нестационарной модели дискретных вихревых колец [6].

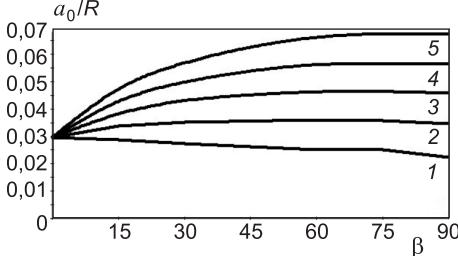


Рис. 7. Изменение величины  $a_0$  выноса отрывной области за растроб

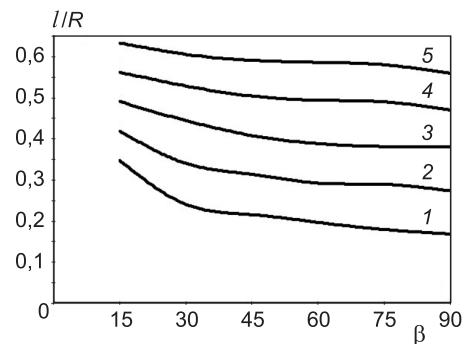


Рис. 8. Изменение параметра  $l$  от угла раскрытия растроба

Величина  $l$  монотонно убывает для всех расчетных значений  $d/R = 1–5$  (рис. 8), так же как и для расчетов, выполненных для нестационарной модели [6].

Характер изменения величины максимальной толщины  $b$  отрывной области существенно зависит от длины растроба (рис. 9). При  $d/R = 3$  эта величина практически постоянна. При  $d/R > 3$  величина  $b$  возрастает при увеличении угла раскрытия растроба, а при  $d/R < 3$  убывает. Для вычисления величины  $b$  предлагается следующая формула:

$$b = (0,2 - 0,08d)e^{-(1,25\alpha)^2} + 0,08d + 0,1.$$

Радиус эффективного всасывания достигает максимума (рис. 10) в диапазоне  $\beta = 65–68^\circ$ .

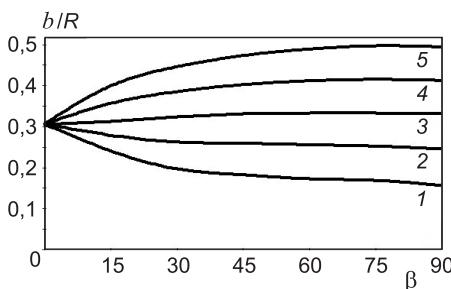


Рис. 9. Изменение максимальной толщины  $b$  отрывной области

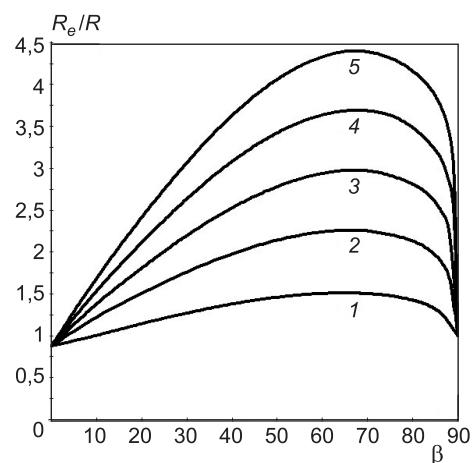


Рис. 10. Изменение радиуса эффективного всасывания  $R_e$

По найденным характерным размерам вихревой области можно построить границу этой области с использованием формулы, предложенной в работе [6]:

$$\begin{cases} \frac{(x+c)^2}{m^2} + \frac{(y-r)^2}{n^2} = 1, & -b \leq x \leq 0, \quad r \leq y \leq a, \\ x = -\frac{b}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi y}{r} \right), & 0 \leq y \leq r, \end{cases}$$

где  $r = -l - a_0 + a$ ,  $n = l + a_0$ ,  $m = b - c$ ,  $c = \frac{b}{1 + \frac{n}{\sqrt{n^2 - l^2}}}$ .

Очертание вихревой области на входе в раструб строится в системе координат с центром в точке слияния линии тока с раструбом и осью ординат, направленной вдоль раструба.

В результате обработки данных вычислительных экспериментов была предпринята попытка получить аналитическое выражение для определения границы вихревой области на входе в длинный отсос-раструб без использования графиков характерных размеров вихревой области. Были получены параметрические значения, позволяющие рассчитывать границу вихревой области на входе в круглый отсос-раструб:

$$\bar{x}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t-2\pi-\beta}{3,lt-3(\pi+\beta)}}}{R(t-\pi-\beta)^b} \cos t + \bar{d} \cos \beta;$$

$$\bar{y}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t-2\pi-\beta}{3,lt-3(\pi+\beta)}}}{R(t-\pi-\beta)^b} \sin t + 1 + \bar{d} \sin \beta,$$

где  $\pi + \beta < t \leq 2\pi + \beta$ ;  $\bar{x}(t) = x(t) / R$ ;  $\bar{y}(t) = y(t) / R$ ;

$$a = (0,03\bar{d} - 0,034) \frac{\beta}{\pi} + 0,01\bar{d} + 0,032; \bar{d} = d / R; b = 0,38 - 0,48 \frac{\beta}{\pi}.$$

Формула справедлива для длинных раструбов, т.е. когда вихревая область на входе в раструб замыкается на его стенках, а не проникает внутрь трубы. Это будет справедливо при  $15^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ ,  $l / B \geq 2$ ; при  $l / B = 1$  и  $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ .

Заметим, что считать надо начиная с  $x > 0$ , так как линия отрыва асимптотически стремится к прямой, проходящей через раструб, при  $t \rightarrow \pi + \beta$ .

Формулу для расчета границы вихревой области на входе в отсос-рас-труб можно записать в более компактной форме, используя полярную систему координат с центром в точке  $(0, 0)$  и полярной осью  $OX$  (см. рис. 2). В этом случае справедливо следующее выражение:

$$\bar{r}(\varphi) = a \frac{1 - e^{\frac{\varphi-2\pi-\beta}{3,\varphi-3(\pi+\beta)}}}{R(\varphi - \pi - \beta)^b}, \quad \pi + \beta < \varphi \leq 2\pi + \beta,$$

где  $\bar{r}(t) = r(t) / R$ , а все остальные обозначения такие же, как в предыдущей формуле.

Рассмотрим примеры расчета по полученным формулам.

Пусть  $d / R = 5$ ;  $R = 0,1$  м;  $\beta = \pi / 2$ .

Тогда

$$a = (0,03 \cdot 5 - 0,034) \frac{\pi}{2\pi} + 0,01 \cdot 5 + 0,032 = 0,14;$$

$$b = 0,38 - 0,48 \frac{\pi}{2\pi} = 0,14$$

и будут справедливы следующие зависимости:

$$\bar{x}(t) = 0,14 \frac{1 - e^{\frac{t-5\pi/2}{3,1t-9\pi/2}}}{R(t-3\pi/2)^{0,14}} \cos t,$$

$$\bar{y}(t) = 0,14 \frac{1 - e^{\frac{t-5\pi/2}{3,1t-9\pi/2}}}{0,1(t-3\pi/2)^{0,14}} \cos t + 6,$$

$$3\pi/2 < t \leq 5\pi/2.$$

Пусть  $d / R = 3$ ;  $R = 0,1$  м;  $\beta = \pi / 4$ .

Тогда

$$a = (0,03 \cdot 3 - 0,034) \frac{\pi}{4\pi} + 0,01 \cdot 3 + 0,032 = 0,076;$$

$$b = 0,38 - 0,48 \frac{\pi}{4\pi} = 0,26$$

и уравнения для границ отрывной области описываются уравнениями:

$$\bar{x}(t) = 0,076 \frac{1 - e^{\frac{t-9\pi/4}{3,1t-15\pi/4}}}{R(t-5\pi/4)^{0,26}} \cos t + 3 \cos(\pi/4),$$

$$\bar{y}(t) = 0,076 \frac{1 - e^{\frac{t-9\pi/4}{3,1t-15\pi/4}}}{0,1(t-5\pi/4)^{0,26}} \cos t + 1 + 3 \sin(\pi/4),$$

$$5\pi/4 < t \leq 9\pi/4.$$

При  $d / R = 1$ ;  $R = 0,1$  м;  $\beta = \pi / 3$  имеем

$$a = (0,03 \cdot 1 - 0,034) \frac{\pi}{3\pi} + 0,01 \cdot 1 + 0,032 \approx 0,0407;$$

$$b = 0,38 - 0,48 \frac{\pi}{3\pi} = 0,22.$$

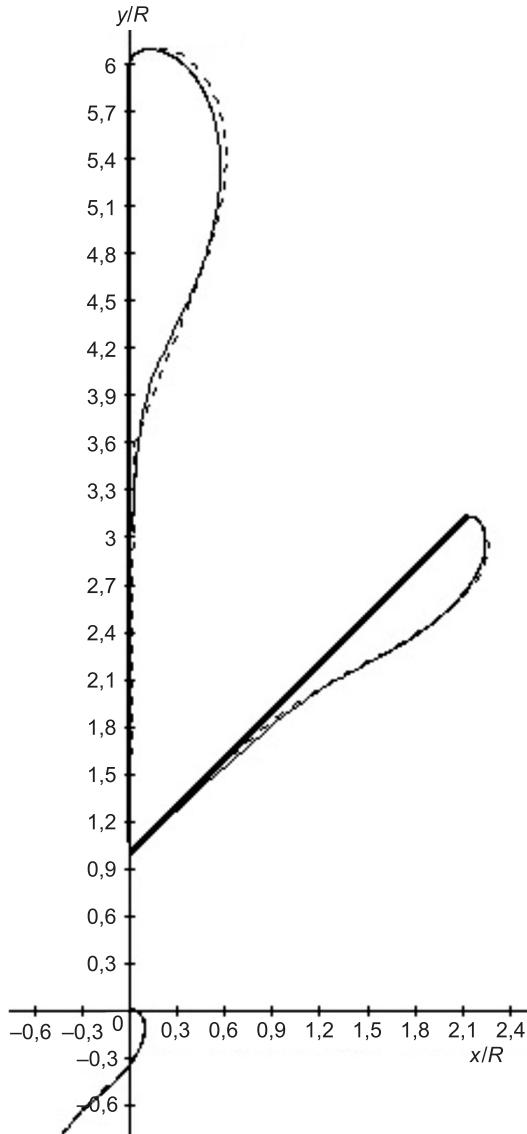


Рис. 11. К примеру расчета отрывной области

на входе в отсос с углом раскрытия  $\alpha = 60^\circ$  ( $\beta = 30^\circ$ ); кривая 3 — то же, но при  $\alpha = 134^\circ$  ( $\beta = 67^\circ$ ). Длина раструбов — пять калибров (стенки раструбов показаны на рис. 12).

При  $\alpha = 60^\circ$  ( $\beta = 30^\circ$ ) коэффициент неравномерности  $v_c / v_e \approx 1,04$ , и всасывание происходит равномерно по всему эффективному радиусу  $R_e \approx 0,614$ . При  $\alpha = 120^\circ$  ( $\beta = 60^\circ$ ) коэффициент неравномерности  $v_c / v_e \approx 1,97$ , и всасывание не столь равномерно, но в случае  $\alpha = 134^\circ$  ( $\beta = 67^\circ$ ) благодаря большему  $R_e \approx 0,879$  и большей скорости всасывания (кривая 4) относительно случая  $\alpha = 60^\circ$  ( $\beta = 30^\circ$ ) (кривая 1) почти на всем сечении можно заключить, что более эффективен раструб при  $\alpha = 134^\circ$  ( $\beta = 67^\circ$ ). При сравнении кривых 2 и 3 картина не столь очевидная. Здесь

Если в качестве полюса выбрать центр координат, а полярную ось направить вдоль оси  $OX$ , то получим следующую формулу:

$$\bar{r}(t) = 0,0407 \frac{1 - e^{\frac{\phi - 7\pi/3}{3,1\phi - 4\pi}}}{0,1(\phi - 4\pi/3)^{0,22}},$$

$$4\pi/3 < \phi \leq 7\pi/3.$$

Полученные линии изображены на рис. 11, где сплошные линии изображают расчеты по формулам, а пунктирные — по разработанной компьютерной программе.

В заключение параграфа приведем результаты сравнения безразмерных профилей скорости на входе в отсосы-раструбы с разным углом раскрытия (рис. 12). Здесь кривая 1 — отношение скорости на входе в отсос-раструб к средней эффективной скорости всасывания  $v / v_e$  на входе в отсос с углом раскрытия  $\alpha = 60^\circ$  ( $\beta = 30^\circ$ ); кривая 4 — то же, но при  $\alpha = 134^\circ$  ( $\beta = 67^\circ$ ); кривая 2 — отношение скорости на входе отсоса-раструба к средней скорости всасывания  $v / v_p$  воздуха

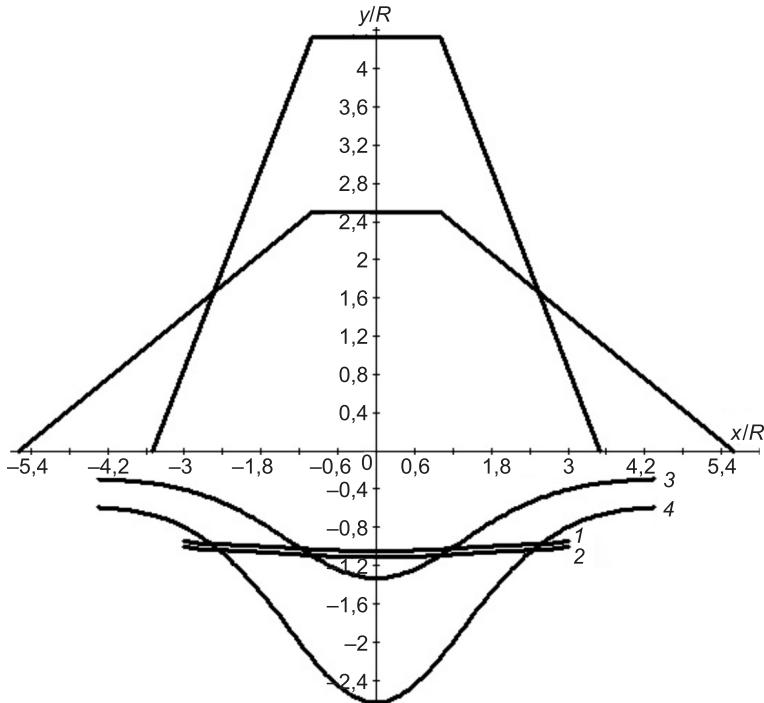


Рис. 12. Профили безразмерной вертикальной составляющей скорости

скорость всасывания на линии раstra при  $\alpha = 134^\circ$  ( $\beta = 67^\circ$ ) выше скорости всасывания при  $\alpha = 60^\circ$  ( $\beta = 30^\circ$ ) в узком диапазоне вблизи центра раstra.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Логачев, К.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия местного вентиляционного отсоса-растра. Собрание 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.
- Каменев, П.Н. Отопление и вентиляция. Ч. 2. Вентиляция [Текст] / П.Н. Каменев. — М. : Госстройиздат, 1959. — 424 с.
- Alden, J.L. Design of industrial exhaust systems [Текст] / J.L. Alden, J.M. Kane. — N. Y. : Industrial Press, 1959.
- Посохин, В.Н. Аэродинамика вентиляции [Текст] / В.Н. Посохин. — М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. — 209 с.
- Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. — М. : Машиностроение, 1977. — 559 с.
- 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

**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 2. RESEARCH OF THE SEPARATION REGIONS PARAMETERS**

There is demonstrated the satisfactory concurrence of flow characteristics, obtained as a result of numerical simulation, with analytical and experimental data. The parameters of the first eddy region were determined and the analytical dependence to identify its borders was suggested.

**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. Kamenev, P.N. Heating and ventilation. Part 2. Ventilation [Text] / P.N. Kamenev. — M. : State publishing house of building, architecture and building materials literature, 1959. — 424 p.
3. Alden, J.L. Design of industrial ventilation systems [Text] / J.L. Alden, J.M. Kane. — N. Y. : Industrial Press, 1982.
4. Posokhin, V.N. Ventilation aerodynamics [Text] / V.N. Posokhin. — M. : AVOK-PRESS, 2008. — 209 p.
5. Idelchik, I.E. Hydraulic resistance guide book [Text] / I.E. Idelchik. — M. : Mashinostroen'ye, 1977. — 559 p.
6. Logachev, I.N. Aerodynamic basis of suctions [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev. — SPb. : Khimizdat, 2005. — 659 p.

УДК 628.51:622.794

М.И. ШИЛЯЕВ, А.И. ГОРБУНКОВ, А.Р. БОГОМОЛОВ, Е.М. ХРОМОВА

## ОБЕЗВОЖИВАНИЕ УГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ В ВАКУУМ-ФИЛЬТРАХ И ФИЛЬТР-ПРЕССАХ\*

На основе равенства кинетической энергии, прилагаемой со стороны фильтрационного потока в зернистом слое к пленке жидкости на его гранулах, работе по преодолению сил поверхностного натяжения, удерживающих пленку на поверхностях гранул, установлена аналитическая зависимость для расчета остаточной концентрации жидкости в слое при пневматическом его обезвоживании. Проведены оценочные расчеты, показана реалистичность результатов, получаемых с помощью найденной формулы, а также их хорошая согласованность с опытными и паспортными данными промышленных вакуум-фильтров и фильтр-прессов.

**Ключевые слова:** обезвоживание, угольная суспензия, коэффициент поверхностного натяжения, коэффициент динамической вязкости, порозность, диаметр угольных частиц, вакуум-фильтры, фильтр-пресссы, влажность.

**1. Пневматическое обезвоживание. Постановка задачи и ее решение.** Обезвоживание угольной суспензии в вакуум-фильтрах и в фильтр-прессах связано прежде всего с уносом воздухом большей части жидкости, заполняющей поровое пространство, что не определяет основные затраты энергии на этот процесс. Предельное содержание влаги в слое складывается из объемов жидкости, остающейся на поверхностях гранул в виде пленки.

При постановке задачи будем исходить из того, что для отрыва жидкостной пленки с поверхности гранул необходимо затратить энергию, которая превосходила бы энергию (работу) по преодолению сил поверхностного натяжения жидкости на всех гранулах в объеме  $V$ . Это условие можно написать в виде

$$k \varepsilon_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} V \frac{u^2}{2} \geq \frac{\sigma}{d_a^2} STl, \quad (1)$$

где  $u$  — средняя скорость движения жидкости на поверхностях гранул, которая создается фильтрационным потоком воздуха в порах за счет напряжения трения о поверхность пленки;

$S$  — площадь поверхностей гранул в объеме  $V$ ;

$T$  — коэффициент извилистости пор;

$k$  — эмпирический коэффициент;

$Tl/2$  — путь, на котором совершается работа силами поверхностного натяжения, препятствующими отрыву пленки, в слое толщиной  $l$  (рис. 1);

$\varepsilon_{\text{ж}}$  — объемная концентрация жидкости;

$\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости;

\* Статья выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0004 ФЦП.

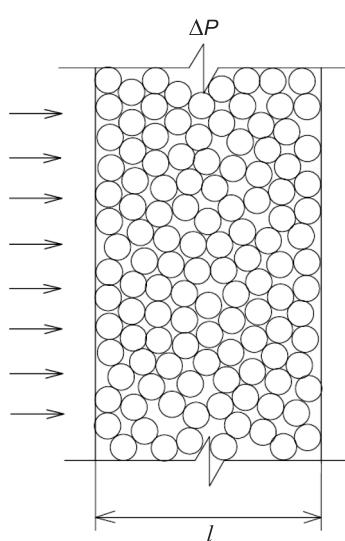


Рис. 1. Схема продуваемого слоя гранулята

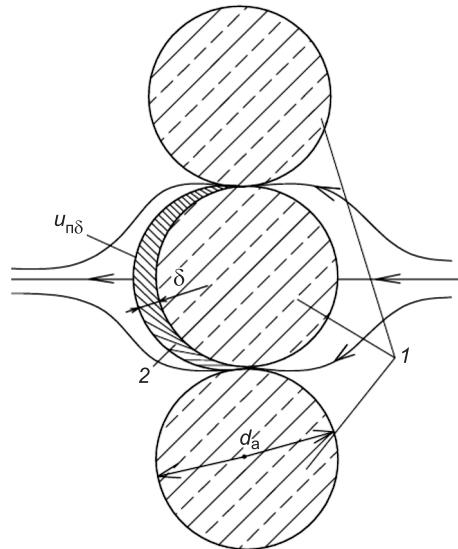


Рис. 2. Расчетная схема продувки гранулята  
1 — гранулы; 2 — пленка жидкости

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

$d_a$  — диаметр гранул.

В формуле (1) предполагается, что работа сил поверхностного натяжения осуществляется с тыльных поверхностей гранул площадью ( $S/2$ ) и на пути ( $Tl/2$ ) (рис. 2). Запишем

$$\frac{S}{V} = \frac{S}{V_{ш}} \frac{V_{ш}}{V} = a(1 - \varepsilon_{ш}) = \frac{3}{r_a}(1 - \varepsilon_{ш}), \quad (2)$$

где  $\frac{S}{V_{ш}} = a = \frac{3}{r_a}$  — удельная поверхность шара;

$V_{ш}$  — объем шаров диаметром  $d_a = 2r_a$  в объеме  $V$ ;

$\varepsilon_{ш}$  — порозность слоя;

$\frac{V_{ш}}{V} = (1 - \varepsilon_{ш})$  — по определению.

Среднюю скорость жидкости  $u$  на поверхностях гранул можно представить как

$$u = \frac{u_{n\delta}}{2}, \quad (3)$$

где  $u_{n\delta}$  — скорость жидкости на поверхности пленки толщиной  $\delta$ ,  $u = 0$  на поверхностях гранул (см. рис. 2). Так что соотношение (1) можно переписать в виде

$$k\varepsilon_{ж}\rho_{ж} \frac{u_{n\delta}^2}{8} \geq \frac{6\sigma}{d_a^2}(1 - \varepsilon_{ш})Tl. \quad (4)$$

Для того чтобы сорвать пленку жидкости с поверхности гранул, необходимо создать достаточно интенсивное фильтрационное движение воздуха в порах со скоростью  $u_\phi$ , которое должно соответствовать квад-

ратичному закону фильтрации. При этом скорость  $u_{\text{н}\delta}$  в свою очередь должна соответствовать равенству напряжения трения на поверхности пленки со стороны внешнего фильтрационного потока  $\tau_{\phi}$  напряжению трения со стороны пленки жидкости  $\tau_{\pi}$ :

$$\tau_{\phi} = \tau_{\pi}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\pi} = \mu_{\infty} \frac{u_{\text{n}\delta}}{\delta}$ ,  $\mu_{\infty}$  — динамический коэффициент вязкости жидкости, при этом среднюю толщину пленки жидкости определим как

$$\delta = \varepsilon_{\infty} \frac{V}{(S/2)} = \frac{2\varepsilon_{\infty}}{a(1-\varepsilon_{\text{ш}})} = \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{\infty}}{1-\varepsilon_{\text{ш}}} d_a. \quad (6)$$

Так что

$$\tau_{\pi} = 3\mu_{\infty} \frac{u_{\text{n}\delta}}{\varepsilon_{\infty}} \frac{1-\varepsilon_{\text{ш}}}{d_a}. \quad (7)$$

Рассматривая поровый канал как трубу с эффективным диаметром  $d_{\text{n}}$ , можно записать известное равенство

$$\Delta P \frac{\pi d_{\text{n}}^2}{4} = \tau_{\pi} \pi d_{\text{n}} \frac{lT}{2} + \tau_{\phi} \pi d_{\text{n}} \frac{lT}{2} \approx \tau_{\pi} \pi d_{\text{n}} lT, \quad (8)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления, расходуемый на преодоление фильтрационным потоком напряжения трения на поверхностях пленки с тыльной стороны гранул и сухих поверхностях гранул с лобовой стороны на длине порового канала  $lT$ ;  $\tau_{\phi}$  — напряжение трения фильтрационного потока на сухих частях поверхностей гранул (по данным [1],  $T = 1,5$  для  $\varepsilon_{\text{ш}} = 0,4$  и  $T = 1,1$  для  $\varepsilon_{\text{ш}} = 0,8$ ). В (8) принято  $\tau_{\phi} \approx \tau_{\pi}$ . Таким образом, в соответствии с равенством (5) будем иметь

$$\Delta P = 4\tau_{\phi} \frac{lT}{d_{\text{n}}} = 4 \left( 3\mu_{\infty} \frac{u_{\text{n}\delta}}{\varepsilon_{\infty}} \frac{1-\varepsilon_{\text{ш}}}{d_a} \right) \frac{lT}{d_{\text{n}}}. \quad (9)$$

Поскольку, согласно [1, 2],

$$d_{\text{n}} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_{\text{ш}}}{(1-\varepsilon_{\text{ш}})} d_a, \quad (10)$$

из (9) получим

$$\Delta P = 18\mu_{\infty} \frac{u_{\text{n}\delta} (1-\varepsilon_{\text{ш}})^2}{d_a^2 \varepsilon_{\infty} \varepsilon_{\text{ш}}} lT, \quad (11)$$

откуда

$$u_{\text{n}\delta} = \frac{\varepsilon_{\infty} d_a^2 \varepsilon_{\text{ш}} \Delta P}{18\mu_{\infty} (1-\varepsilon_{\text{ш}})^2 lT}. \quad (12)$$

Подставив (12) в (4), будем иметь

$$\Delta P \geq \left( \frac{6 \cdot 8(18)^2}{k\rho_{\infty}} \right)^{1/2} \frac{(1-\varepsilon_{\text{ш}})^{5/2}}{\varepsilon_{\text{ш}}} \frac{\sigma^{1/2} (Tl)^{3/2} \mu_{\infty}}{\varepsilon_{\infty}^{3/2} d_a^3}, \quad (13)$$

откуда

$$\varepsilon_{\text{ж}} \geq \left( \frac{48(18)^2}{k\rho_{\text{ж}}} \right)^{1/3} \frac{(1-\varepsilon_{\text{ш}})^{5/3}}{\varepsilon_{\text{ш}}^{2/3}} \frac{(\sigma\mu_{\text{ж}}^2)^{1/3}}{d_a^2} T l (\Delta P)^{-2/3}. \quad (14)$$

Для плотной упаковки шаров ( $\varepsilon_{\text{ш}} = 0,4$ ,  $T = 1,5$ ) получим

$$\varepsilon_{\text{ж}} \geq 29,44 \left( \frac{\sigma\mu_{\text{ж}}^2}{k\rho_{\text{ж}} \Delta P^2} \right)^{1/3} \frac{l}{d_a^2}. \quad (15)$$

Для плотной упаковки из (15) следует

$$\Delta P \geq 160 \left( \frac{\sigma\mu_{\text{ж}}^2 l^3}{k\rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}}^3} \right)^{1/2} \frac{1}{d_a^3}. \quad (16)$$

Общие потери давления в слое толщиной  $l$  будут равны

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{l} = \frac{\Delta P}{l} + \frac{1}{l} \varepsilon_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \frac{u_{\text{н}\delta}^2}{8}, \quad (17)$$

где  $\Delta P$  может быть вычислена по формуле Эргана [1] по относительной скорости ( $u_{\phi} - u_{\text{н}\delta}$ ), где  $u_{\phi}$  — скорость фильтрации воздуха в слое. В формуле (17) второе слагаемое есть затраты энергии на приведение в движение пленки жидкости на единицу толщины слоя. По формуле Эргана для квадратичного закона фильтрации [1]

$$\frac{\Delta P}{l} = 1,75 \frac{1-\varepsilon_{\text{ш}}}{\varepsilon_{\text{ш}}^3} \rho_{\text{в}} \frac{(u_{\phi} - u_{\text{н}\delta})^2}{d_a}. \quad (18)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (17), как покажем ниже, намного меньше первого и им можно пренебречь. При этом в формуле (18) можно также принять  $u_{\phi} \gg u_{\text{н}\delta}$ , откуда следует, что  $\Delta P_{\Sigma} \approx \Delta P$ , а значение скорости фильтрации  $u_{\phi}$  можно приближенно рассчитывать по формуле (18) в пренебрежении  $u_{\text{н}\delta}$  в сравнении с  $u_{\phi}$ , подставляя  $\Delta P$  из формулы (16) в формулу (18).

**2. Общая оценка.** Пусть для воды  $\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$ ,  $\mu_{\text{ж}} = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $l = 0,05 \text{ м}$ ,  $d_a = 3 \text{ мм} = 0,003 \text{ м}$ ,  $\varepsilon_{\text{ж}} = 0,2$ ,  $\sqrt{k} \approx 1$ . Тогда по формуле (16) получим  $\Delta P = 6275 \text{ Па} \approx 0,063 \text{ атм}$ , по формуле (12) —  $u_{\text{н}\delta} = 0,0262 \text{ м/с}$ , по формуле (18) при  $u_{\phi} \gg u_{\text{н}\delta}$  —  $u_{\phi} = 7,35 \text{ м/с}$ . Из расчетов следует, что полученные значения  $\Delta P$ ,  $u_{\text{н}\delta}$ ,  $u_{\phi}$  весьма реалистичны, при этом  $u_{\text{н}\delta} / u_{\phi} = 0,00356$ , что полностью оправдывает принятое приближение  $u_{\phi} \gg u_{\text{н}\delta}$ . Эффективный диаметр пор  $d_{\text{n}} = 0,00133 \text{ м} = 1,33 \text{ мм}$ .

Эффективное число  $Re_s = \frac{u_{\phi} d_{\text{n}}}{v} = \frac{7,35 \cdot 0,00133}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 652 > 100$ , что отвечает

квадратичному закону фильтрации [1] ( $v$  — кинематический коэффициент вязкости воздуха). Средняя толщина пленки в соответствии с формулой (6)  $\delta = 333 \text{ мкм}$ .

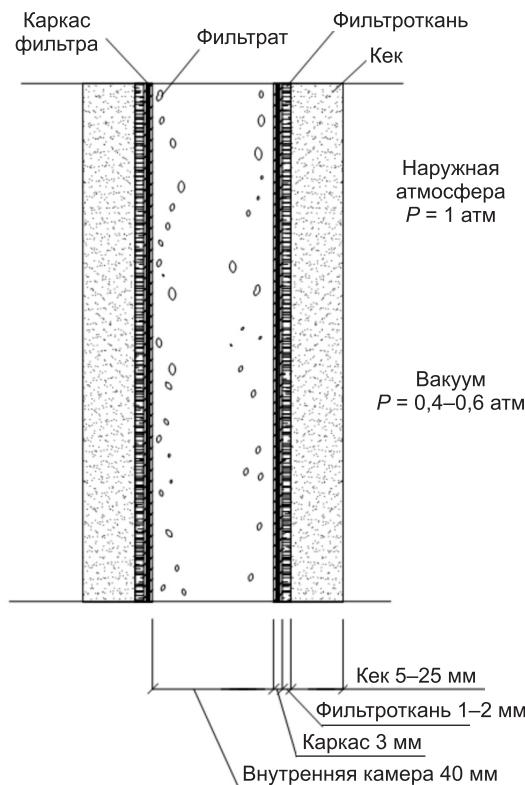


Рис. 3. Схема фильтровального элемента вакуум-фильтра

Время обезвоживания: время фильтрования 1–2 мин; время просушки 1–2 мин; время отдувки 1–10 с; итого цикл 2–4 мин

ратичным, полагая, что процесс обезвоживания связан с поверхностными силами, пропорциональными удельной площади поверхностей частиц:

$$d_a = (40^2 \cdot 0,251 + (125)^2 0,236 + (315)^2 0,399 + (0,5)^2 0,114)^{1/2} = 270 \text{ мкм.}$$

Учитывая две стороны фильтровального элемента, определим толщину отфильтрованного слоя угольных частиц (кека) на фильтровальной ткани по балансу массы

$$l S_{\phi} \rho_{cm} = \frac{1}{2} q S_{\phi} \Delta t, \quad (19)$$

где  $S_{\phi}$  — общая площадь фильтрации,  $\text{м}^2$ ;

$\rho_{cm}$  — плотность кека,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$q$  — общая удельная производительность вакуум-фильтра по готовому продукту,  $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ;

$\Delta t$  — продолжительность цикла одного сектора, мин.

Из (19) получим

$$l = \frac{q \frac{\Delta t}{120} 10^3}{\varepsilon_{jk} \rho_{jk} + (1 - \varepsilon_{jk}) \rho_m}, \text{ мм.} \quad (20)$$

Таблица 1. Фактический ситовой состав концентрата флотации кл. 0–0,5 мм (подается на вакуум-фильтры)  
ОФ «Анжерская», октябрь 2014 г.

Продукт	Выход, %	Зольность, %
+0,315	11,4	5,3
-0,315 + 0,125	39,9	5,6
-0,125 + 0,040	23,6	7,3
-0,040	25,1	8,8
Всего	100	6,8

Сопоставление формулы (15) с опытными и паспортными данными для вакуум-фильтров. Схема фильтровального элемента вакуум-фильтра показана на рис. 3. В табл. 1 представлен гранулометрический состав угольной суспензии, подаваемой в вакуум-фильтр. В табл. 2 и 3 приведены данные из паспорта и режимной карты для вакуум-фильтра ДУ 250-3,75 «Сибирь».

Средний диаметр угольных частиц суспензии примем в соответствии с табл. 1 среднеквад-

Таблица 2. Выписка из паспорта вакуум-фильтра  
ДУ 250-3,75 «Сибирь» (установлен на ЦОФ «Сибирь»)

Показатель	Значение
Производительность удельная, т / ч · м <sup>2</sup>	0,0–0,32
Полная поверхность фильтровальная, м <sup>2</sup>	250
Поверхность фильтровальная сектора, м <sup>2</sup>	1,12
Число дисков, шт.	14
Диаметр дисков, м	3,75
Число секторов на диске	18
Объем ванны, м <sup>3</sup>	14
Продолжительность цикла одного сектора, мин	0,8–3,2
Зона фильтрования, град.	93
Зона просушки, град.	173
Зона отдувки, град.	39
Высота, мм	9400
Ширина, мм	4400
Длина, мм	4500
Масса, т	33,4

Таблица 3. Выписка из режимной карты к вакуум-фильтру  
ДУ 250-3,75 «Сибирь», установленного на ЦОФ «Сибирь»

Показатель	Значение
Давление воздуха в ресивере, МПа	0,06–0,07
Вакуум в распределительной головке, МПа	0,06–0,08
Коэффициент отдувки	250
Частота вращения дисков, мин <sup>-1</sup>	1,12
Влажность кека, %	30
Содержание в питании класса менее 0,05 мм, %	Не более 40
Содержание твердого в питании, кг / м <sup>3</sup>	150–250
Содержание твердого в фильтрате, кг / м <sup>3</sup>	20–80
Оптимальный анионактивный флокулянт	Технофлок-356
Удельный расход флокулянта, г сухого / т	5–15
Рабочая концентрация подаваемого флокулянта	0,02–0,05
Количество вакуум-фильтров	8

Подставляя в формулу (15)  $l$  по формуле (20), получим квадратное уравнение для вычисления  $\varepsilon_{\infty}$  с одним физическим корнем со знаком минус:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\rho_m}{2(\rho_m - \rho_{\infty})} - \sqrt{\frac{\rho_m^2}{4(\rho_m - \rho_{\infty})^2} - c}, \quad (21)$$

где

$$c = \frac{0,245}{(\rho_m - \rho_{\infty})} \left( \frac{\sigma \mu_{\infty}^2}{k \rho_{\infty} \Delta P^2} \right)^{1/3} \frac{q \Delta t}{d_a^2}. \quad (22)$$

Проведем расчет по формуле (21), принимая  $\rho_{ж} = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_m = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $k = 1$ ,  $\Delta P = 0,08 \text{ МПа}$  (см. табл. 3),  $q = 320 \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$  (см. табл. 2), среднее значение  $\Delta t = 1,5 \text{ мин}$  (табл. 2, рис. 3),  $\sigma = 0,072 \text{ Н}/\text{м}$ ,  $\mu_{ж} = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Получим  $\varepsilon_{ж} = 0,265$  ( $\varepsilon'_{ж} = 0,23$ ), что составляет близкую величину к паспортному значению  $\varepsilon'_{ж} = 0,3$ . Здесь  $\varepsilon'_{ж} = \left(1 + \frac{1 - \varepsilon_{ш}}{\varepsilon_{ж}} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{ж}}\right)^{-1}$ , кг/кг [3]. При  $\Delta P = 0,06 \text{ МПа}$   $\varepsilon_{ж} = 0,35$  ( $\varepsilon'_{ж} = 0,28$ ), что ближе отвечает паспортным данным (табл. 3).

*Сопоставление формулы (15) с опытными и паспортными данными для фильтр-прессов.* Схема фильтровального элемента камерного фильтр-пресса и время операций обезвоживания приведены на рис. 4. Гранулометрический состав угольных частиц суспензии дан в табл. 4.

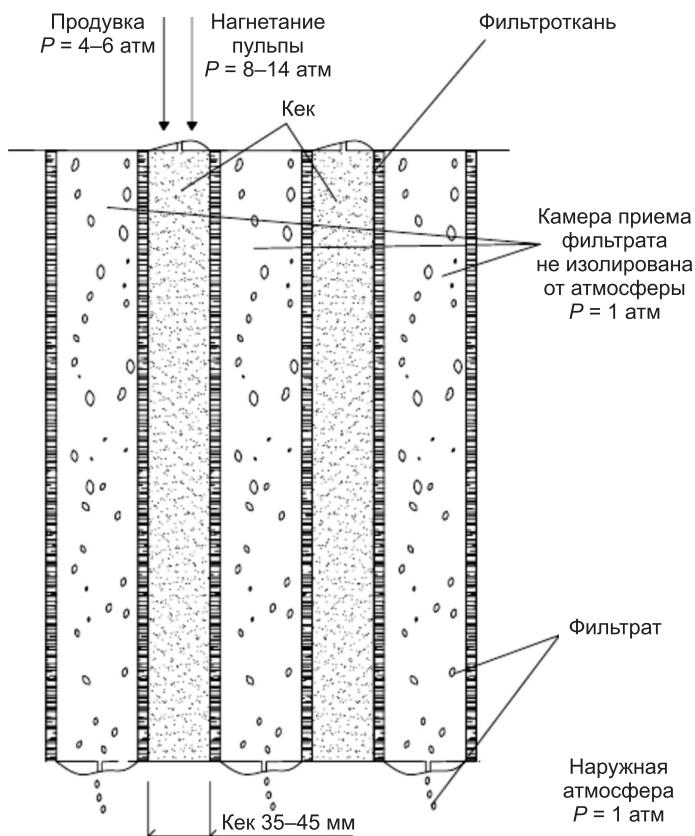


Рис. 4. Схема фильтровального элемента камера фильтр-пресса  
Время обезвоживания: время нагнетания пульпы 8–10 мин; время продувки 1–2 мин; технологические операции 8–15 мин; итого цикл 35 мин

Проведем оценку утончения толщины кека  $l$  в сравнении с шириной фильтровального зазора за счет уменьшения его порозности в процессе продувки на основе массового баланса пульпы:

$$M_q + \varepsilon_{ш0} \rho_{ж} V_0 = M_q + \varepsilon_{ш} \rho_{ж} V + \rho_{ж} (V_0 - V), \quad (23)$$

где  $M_q$  — масса частиц в пульпе, кг;

Таблица 4. Фактический ситовый состав сгущенного продукта радиального сгустителя кл. 0–0,3 мм (подается на камерный фильтр-пресс)  
ЦОФ «Щедрухинская», сентябрь 2014 г.

Продукт	Выход, %	Зольность, %
+0,2	1,8	9,5
0,1–0,2	5,7	5,7
0,063–0,1	14,6	5,3
0,04–0,063	10,3	7,7
0–0,04	67,6	22,1
Всего	100	17,0

Таблица 5. Результаты опыта 6 ноября 2014 г.  
на ЦОФ «Щедрухинская»

№ п/п	Время	Подача реагента, л/цикл	Влажность кека, %
В среднем в течение октября 2014 г.			30,0
2	11:00	0	28,9
3	12:00	0	31,5
В среднем			30,1
4	13:00	30	28,2
5	14:00	30	28,9
6	15:00	30	31,4
7	16:00	30	29,5
8	17:00	30	29,8
В среднем			29,6

$\varepsilon_{ш0}$  и  $\varepsilon_ш$  — порозность начальная и конечная слоя от пульпы до кека,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $V_0$ ,  $V$  — начальный объем пульпы и конечный объем кека,  $\text{м}^3$ .

Последнее слагаемое в (23) — масса фильтрата, кг.

Из (23) с учетом  $V_0 = l_0 S_0$ ,  $V = l S_0$  следует

$$\frac{l}{l_0} = \frac{1 - \varepsilon_{ш0}}{1 - \varepsilon_ш}, \quad (24)$$

где  $l_0$  и  $l$  — толщина зазора, занятого пульпой, и остаточная суммарная толщина кека по обе стороны зазора, м;

$S_0$  — площадь поверхности кека.

Величину порозности между частицами пульпы можно вычислить по массовой концентрации частиц в пульпе  $c$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\varepsilon_{ш0} = 1 - \frac{c}{\rho_m}. \quad (25)$$

Эксплуатационная величина  $c_0 = (150–200)$  г/л, так что при значении  $c_0 = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$  получим  $\varepsilon_{ш0} = 0,9$ . Если принять порозность кека как зернистый слой с плотной упаковкой угольных частиц, то уменьшение толщины слоя должно произойти в 6 раз:

$$\frac{l_0}{l} = \frac{1 - 0,4}{1 - 0,9} = 6. \quad (26)$$

Таким образом, при начальной толщине слоя пульпы 35 мм (см. рис. 4) конечная толщина кека на одной стороне фильтра будет равна

$$l = \frac{35}{2 \cdot 6} = 2,9 \text{ мм}. \quad (27)$$

В соответствии с табл. 4, учитывая, что значительная часть наиболее мелких частиц (менее 40 мкм) уходит в фильтрат, определим среднеквадратичный размер угольных частиц в кеке по крайним их размерам

$$d_a = \sqrt{40 \cdot 300} \approx 110 \text{ мкм}.$$

Тогда, полагая  $\Delta P = 0,6$  МПа, по формуле (15) найдем

$$\varepsilon_{\text{ж}} = 29,44 \left( \frac{0,072 \cdot 10^{-6}}{10^3 (0,6)^2 10^{12}} \right)^{1/3} \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{(1,1)^2 10^{-8}} = 0,41.$$

Полученная величина  $\varepsilon_{\text{ж}} = 0,41$  ( $\varepsilon'_{\text{ж}} = 0,31$ ) соответствует опытной (табл. 5).

**Выводы.** Полученная в работе формула (16) для пневматического обезвоживания суспензии позволяет оценить перепад давления на продуваемом слое кека при заданных значениях  $\sigma$ ,  $\mu_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  для жидкости, толщины слоя  $l$  со средним размером угольных частиц  $d_a$  и требуемой остаточной концентрацией жидкости в слое  $\varepsilon_{\text{ж}}$ . Формула (15) дает хорошее физическое согласование с подобной формулой, полученной авторами в [3] для центробежного обезвоживания суспензии, в которой остаточное значение  $\varepsilon_{\text{ж}}$  также обратно пропорционально квадрату размера гранул  $d_a$  и линейно зависит суммарно от вязкостных характеристик жидкости, только для центробежного центрифугирования  $\varepsilon_{\text{ж}} \sim \sigma$ , для пневматического обезвоживания  $\varepsilon_{\text{ж}} \sim (\sigma \mu_{\text{ж}}^2)^{1/3}$ . Последнее показывает, что введение добавок, снижающих коэффициент поверхностного натяжения при центрифугировании, дает возможность прямо пропорционально снизить остаточную влагу в слое, а при пневматическом обезвоживании одновременно этот же эффект достигается за счет снижения коэффициента поверхностного натяжения и снижения динамической вязкости жидкости, поскольку  $\sigma \sim \mu_{\text{ж}}$ .

Из вышеприведенных оценок следует, что при всех допущениях, сделанных при постановке задачи, полученные формулы (15) и (16) верно отражают физику пневматического обезвоживания суспензии как в вакуум-фильтрах, так и в фильтр-прессах и могут служить основой для инженерного расчета и оптимизации их режимных и геометрических параметров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэропов, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем [Текст] / М.Э. Аэропов, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. — Л. : Химия, 1979. — 176 с.
2. Шиляев, М.И. Интенсификация тепломассообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, А.Р. Богомолов. — Томск : Изд-во ТГАСУ, 2010. — 272 с.
3. Шиляев, М.И. Расчет предельной влажности угольного концентрата при его обезвоживании в центрифугах [Текст] / М.И. Шиляев, А.И. Горбунков, А.Р. Богомолов, Е.М. Хромова // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9-10. — С. 71–76.

**ШИЛЯЕВ Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

**ГОРБУНКОВ Алексей Игоревич, инженер-технолог**

*ООО «НПО Завод химреагентов», г. Кемерово*

**БОГОМОЛОВ Александр Романович, д-р техн. наук, проф.**

*Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово*

**ХРОМОВА Елена Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доц.**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

**Shilyaev Mikhail Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Gorbunkov Alexey Igorevich**, process-engineer, «NPO plant chemicals», Kemerovo, Russia

**Bogomolov Alexandr Romanovich**, doctor of technical sciences, professor, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

**Khromova Elena Mikhailovna**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **DEHYDRATION OF COAL SLURRY IN VACUUM-FILTERS AND FILTER-PRESSES**

On the basis of kinetic energy equality supplied by the flow in a granular layer to the film of liquid on its granules and work to overcome the surface tension forces holding the film on the surfaces of the granules, an analytical dependence for calculating the residual concentration in the liquid layer during pneumatic dewatering is found. Conducted estimations show satisfactory results obtained using the established formula, as well as their good agreement with the experimental and published data of industrial vacuum-filters and filter-presses.

**Key words:** dehydration, coal slurry, the surface tension coefficient, the dynamic viscosity coefficient, porosity, the diameter of coal particles, vacuum-filters, filter-presses, humidity.

### **REFERENCES**

1. Aerov, M.E. Devices with a stationary granular bed [Text] / M.E. Aerov, O.M. Todes, D.A. Narinskiy. — L. : Chemistry, 1979. — 176 p.
2. Shilyaev, M.I. Intensification heat- and mass transfer in disperse environments at condensation and evaporation [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.R. Bogomolov. — Tomsk : TSUACE, 2010. — 272 p.
3. Shilyaev, M.I. Calculation of moisture limit of coal concentrates when dewatering in centrifuges [Text] / M.I. Shilyaev, A.I. Gorbunkov, A.R. Bogomolov, E.M. Khromova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 9–10. — P. 71–76.

**УДК 697.34:697.4**

**М.С. КОНОНОВА**

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ  
РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ  
В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ГОРЯЧЕГО  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ**

Приводятся результаты определения капитальных, эксплуатационных и приведенных затрат для двух вариантов размещения теплообменников горячего водоснабжения жилой застройки различной этажности. Сформулированы рекомендации по целесообразности применения рассматриваемых вариантов.

**Ключевые слова:** централизованное горячее водоснабжение, теплообменник, тепловой пункт.

Структура систем централизованного теплоснабжения жилой застройки характеризуется тем, что к тепловым сетям присоединяются две теплопотребляющие системы — отопление и горячее водоснабжение (ГВ) зданий. При этом в систему ГВ подается вода, нагретая в теплообменниках за счет теплоносителя из тепловой сети. Теплообменники и сопутствующее им оборудование располагаются в тепловых пунктах. В большинстве современных городов в эксплуатации находится система теплоснабжения с центральными тепловыми пунктами (ЦТП), обслуживающими группу зданий. При этом от ЦТП до зданий-потребителей проложена четырехтрубная тепловая сеть (одна пара труб обслуживает систему отопления, другая — систему горячего водоснабжения). Такая система характеризуется повышенными эксплуатационными затратами и тепловыми потерями при транспортировке теплоносителя.

В последнее время с появлением компактных теплообменников и малошумных насосов стала возможна установка теплообменников непосредственно в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) каждого здания. При такой схеме до зданий-потребителей прокладывается двухтрубная тепловая сеть, более дешевая как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам. Однако при таком варианте увеличиваются затраты на теплообменное оборудование, устанавливаемое в ИТП зданий.

Задача выбора варианта расположения теплообменников горячего водоснабжения является актуальной и затрагивается многими исследованиями, работающими в этой области, однако четких обобщающих рекомендаций пока нет.

В настоящей работе сравниваются технико-экономические показатели двух вышеописанных вариантов расположения теплообменников. При этом рассматривается жилая застройка различной распространенной этажности: трех-, пяти- и девятиэтажная.

Расчеты проводились в соответствии с алгоритмом оптимизации систем централизованного теплоснабжения, приведенным в работе [1].

В качестве исходных данных приняты:

- планы жилых групп со зданиями различной этажности (среднее количество зданий в жилых группах — 15);
- климатические условия для г. Воронежа.

Для каждой жилой группы проведен гидравлический расчет, разработаны вариант трассировки тепловой сети и монтажные схемы (схема четырехтрубной тепловой сети — для варианта расположения теплообменников в ЦТП и двухтрубной — для варианта с ИТП).

На первом этапе была рассчитана стоимость материалов тепловой сети для каждого из рассматриваемых вариантов, а также затраты на строительство теплопроводов. Конструкция тепловой сети принята бесканальная с монолитной изоляцией из пенополиуретана (с учетом рекомендаций, изложенных в работе [2]). На рис. 1 приведены результаты расчетов, анализ которых показывает, что суммарные затраты на строительство четырехтрубной тепловой сети почти на 40 % больше, чем двухтрубной. Эта разница между затратами практически не зависит от этажности теплоснабжаемой застройки.

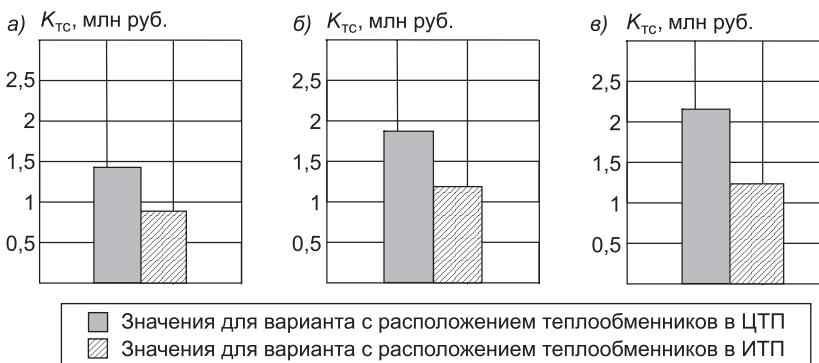


Рис. 1. Суммарные затраты на строительство тепловой сети для застройки:  
а — трехэтажной; б — пятиэтажной; в — девятиэтажной

Было проведено сравнение потерь теплоты тепловыми сетями  $Q_{\text{пп}}$ , Вт, рассчитанных по формуле

$$Q_{\text{пп}} = \sum q_{\text{уди}} l_i,$$

где  $q_{\text{уди}}$  — удельные тепловые потери трубопроводами тепловой сети на  $i$ -м участке, Вт / м, принятые по данным расчетов для стальных трубопроводов в монолитной пенополиуретановой изоляции [3, 4];

$l_i$  — длина  $i$ -го участка сети.

Анализ результатов показал (рис. 2), что разница между потерями теплоты четырех- и двухтрубной тепловой сетью составляет 30–37 %.

Немаловажным аспектом при выборе варианта расположения теплообменников являются затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя в циркуляционном контуре горячего водоснабжения. Сравнивались затраты на циркуляцию в рамках рассматриваемых жилых групп (принято, что расход на циркуляцию от источника теплоснабжения до этих групп в сравниваемых вариантах одинаков).

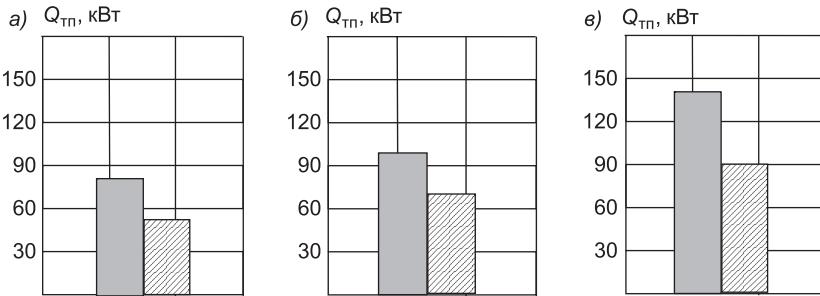


Рис. 2. Потери теплоты трубопроводами тепловой сети для застройки:

а — трехэтажной; б — пятиэтажной; в — девятиэтажной

Усл. обозн. см. на рис. 1

В варианте с установкой теплообменников в ЦТП были рассчитаны затраты на циркуляцию в четырехтрубной тепловой сети: в трубопроводах отопления — в течение отопительного сезона, в трубопроводах горячего водоснабжения — круглый год. В варианте с установкой теплообменников в ИТП определены затраты на циркуляцию в том же фрагменте внутридворовой сети, что и в предыдущем варианте, в течение отопительного сезона учитывался суммарный расход на отопление и горячее водоснабжение, а в летний период — только расход теплоносителя на нагрев горячей воды.

Расчеты показали (рис. 3), что в варианте теплоснабжения с ЦТП затраты в разы выше, чем при установке теплообменников в ИТП. Это объясняется тем, что циркуляционный контур во втором случае имеет меньшую протяженность, так как отсутствует прокачка воды по подземным теплопроводам от ЦТП до зданий.

Эксплуатационные затраты на обслуживание тепловой сети при сравнении вариантов приблизительно одинаковы, в соответствии с расчетами по методике, изложенной в [2].

Три приведенных на рис. 1–3 критерия говорят в пользу варианта размещения теплообменников в ИТП зданий. Однако немаловажным фактором, влияющим на выбор варианта размещения теплообменника, являются затраты на оборудование тепловых пунктов. Для всех сравниваемых вариантов было подобрано необходимое оборудование, включая приборы автоматического регулирования, составлены спецификации и посчитана сметная стоимость монтажных работ. Для варианта с ЦТП

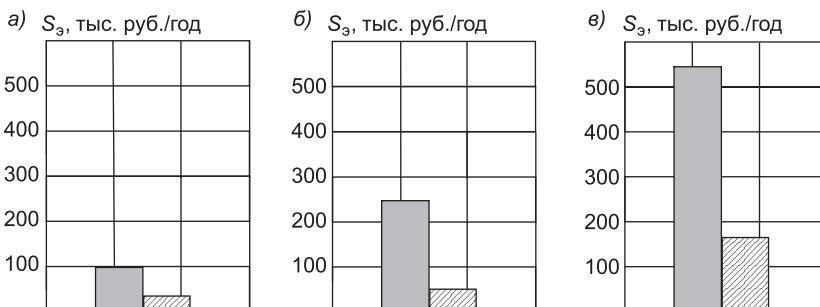


Рис. 3. Стоимость электроэнергии на циркуляцию теплоносителя для застройки:

а — трехэтажной; б — пятиэтажной; в — девятиэтажной

Усл. обозн. см. на рис. 1

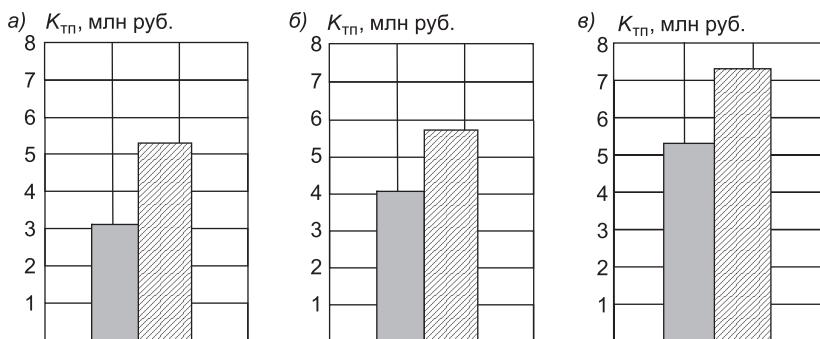


Рис. 4. Стоимость тепловых пунктов в сравниваемых вариантах для застройки:

а — трехэтажной; б — пятиэтажной; в — девятиэтажной

Усл. обозн. см. на рис. 1

учтены также затраты на сооружение здания теплового пункта. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

Анализ затрат на сооружение и оборудование тепловых пунктов показал, что в случае установки теплообменников горячего водоснабжения в ИТП их стоимость выше, чем в варианте с ЦТП. Разница в затратах составляет 30–40%.

Расходы на обслуживание ИТП исключены из сравнения, так как их можно считать одинаковыми в сравниваемых вариантах. Основная статья эксплуатационных расходов — зарплата обслуживающего персонала — зависит от количества ИТП, а оно в сравниваемых вариантах одинаковое, разница заключается в схемном решении тепловых пунктов. Так как не все критерии говорят в пользу какого-либо одного варианта, то были посчитаны приведенные затраты  $\Pi$ , руб./год, по формуле

$$\Pi = (E_h + p_h)K + S_{\text{экспл}},$$

где  $E_h$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, принят равным 0,12;

$p_h$  — годовые амортизационные отчисления от стоимости материалов и оборудования, приняты равными 0,08;

$K$  — капитальные затраты, руб.;

$S_{\text{экспл}}$  — эксплуатационные годовые затраты, руб.

Капитальные затраты в сравниваемых вариантах включают в себя стоимость материалов, оборудования и проведение строительных и монтажных работ.

При расчете эксплуатационных затрат учитывались следующие статьи расходов:

- стоимость электроэнергии, затрачиваемой на циркуляцию теплоносителя;

- стоимость потерь теплоты внутриквартальными тепловыми сетями;

- стоимость обслуживания оборудования ЦТП (только для варианта с расположением теплообменников в ЦТП).

Из сравнения исключены эксплуатационные затраты на обслуживание тепловых сетей и индивидуальных тепловых пунктов зданий, так как эти затраты можно считать равными в сравниваемых вариантах расположения теплообменников.

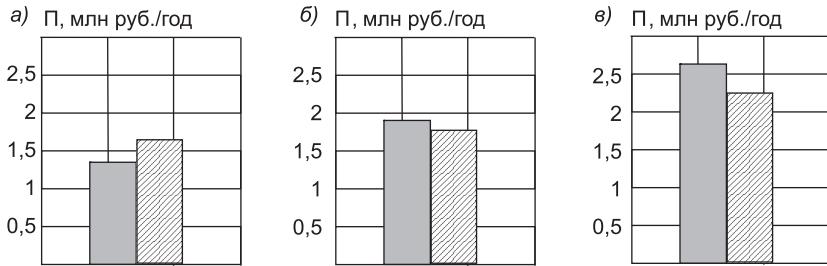


Рис. 5. Приведенные затраты, рассчитанные для сравниваемых вариантов для застройки:

а — трехэтажной; б — пятиэтажной; в — девятиэтажной

Усл. обозн. см. на рис. 1

Результаты расчета приведенных затрат показаны на рис. 5. При их анализе выявлено, что приведенные затраты в случае малоэтажной застройки (до трех этажей) оказываются меньше в варианте расположения теплообменников в ЦТП. При этажности зданий пять этажей и выше экономически выгодной будет схема теплоснабжения с установкой теплообменников в ИТП зданий.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе схемы горячего водоснабжения проектируемых жилых застроек в климатических условиях, схожих с условиями г. Воронежа. При этом следует учитывать, что результаты могут отличаться от приведенных в настоящей работе в зависимости от выбора фирм-производителей материалов и оборудования, применяемых при разработке проектов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кононова, М.С. К вопросу разработки алгоритма оптимизации систем централизованного теплоснабжения [Текст] / М.С. Кононова, Д.В. Кривоносова, В.В. Исаева // Материалы XIII Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». — Воронеж, 2013. — С. 183–185.
- Кононова, М.С. Сравнительный анализ технико-экономических показателей некоторых конструкций бесканальной прокладки тепловых сетей. [Текст] / М.С. Кононова // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 6. — С. 84–90.
- Кононова, М.С. О влиянии температуры теплоносителя на технико-экономические показатели проектируемых тепловых сетей [Текст] / М.С. Кононова // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 67–73.
- Кононова, М.С. Исследование влияния некоторых геометрических параметров зданий на их теплоэнергетические показатели [Текст] / М.С. Кононова // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 9. — С. 60–64.

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

Получено после доработки 16.10.14

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

## **THE COMPARATIVE ANALYSIS OF VERSIONS OF AN ARRANGEMENT OF HEAT EXCHANGERS IN SYSTEMS OF THE CENTRALIZED HOT WATER FACILITIES OF HABITATION BUILDING**

The results of definition of government capital expenditures, operation and reduced expenditures for different versions of arranging of heat exchangers of hot water facilities for habitation building of different levels are given. The guidelines on expediency of application of viewed versions are formulated.

**Key words:** the centralized hot water facilities, heat exchanger, thermal point.

### **REFERENCES**

1. Kononova, M.S. To a problem of development of algorithm of optimization of systems of the centralized supply by a heat [Text] / M.S. Kononova, D.V. Kriwonosova, V.V. Isaeva // Materials XIII of International scientific-methodical conference «Computer science: problems, methodology, technique». — Voronezh, 2013. — P. 183–185.
2. Kononova, M.S. The comparative analysis technological indexes of some constructions unchannel laying of thermal webs [Text] / M.S. Kononova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 6. — P. 84–90.
3. Kononova, M.S. About temperature effect of the heat transfer medium on technological indexes of designed thermal webs [Text] / M.S. Kononova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 67–73.
4. Kononova, M.S. Examination of influence of some geometrical parameters of buildings on their heat power indexes [Text] / M.S. Kononova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 9. — P. 60–64.

**УДК 697.329(571.4.5)**

**Е.Г. САВЕЛЬЕВ, Т.Л. РОХЛЕЦОВА**

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ГРУНТОВОГО АККУМУЛЯТОРА В УСЛОВИЯХ ЮГА СИБИРИ**

Рассмотрен опыт использования и эксплуатации «солнечного дома» с дублирующим источником тепловой энергии — грунтовым аккумулятором в условиях сурового климата.

**Ключевые слова:** солнечное теплоснабжение, тепловые насосы, возобновляемая энергия.

В южных районах России и за рубежом накоплен значительный опыт использования солнечной энергии в системах отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования зданий, разработано и построено большое количество «солнечных домов», оборудованных гелиосистемами. Ведущими странами в этой области являются Япония, Германия, Франция, Великобритания, США.

Использование солнечной энергии в условиях Сибири для систем горячего водоснабжения и отопления традиционно не рассматривалось, так как этот район считался не перспективным. В данной статье рассмотрен опыт использования и эксплуатации «солнечного дома» с дублирующим источником тепловой энергии — грунтовым аккумулятором в Новосибирске (рис. 1), климат которого характерен для южной Сибири.

Согласно [1], в Новосибирске (рис. 2) не менее 153 дней в году (май — сентябрь) температура наружного воздуха более  $+10^{\circ}\text{C}$ , не менее 214 дней в году (апрель — октябрь) — более  $+0^{\circ}\text{C}$ . Температура



*Pис. 1. «Солнечный дом» в г. Новосибирске*

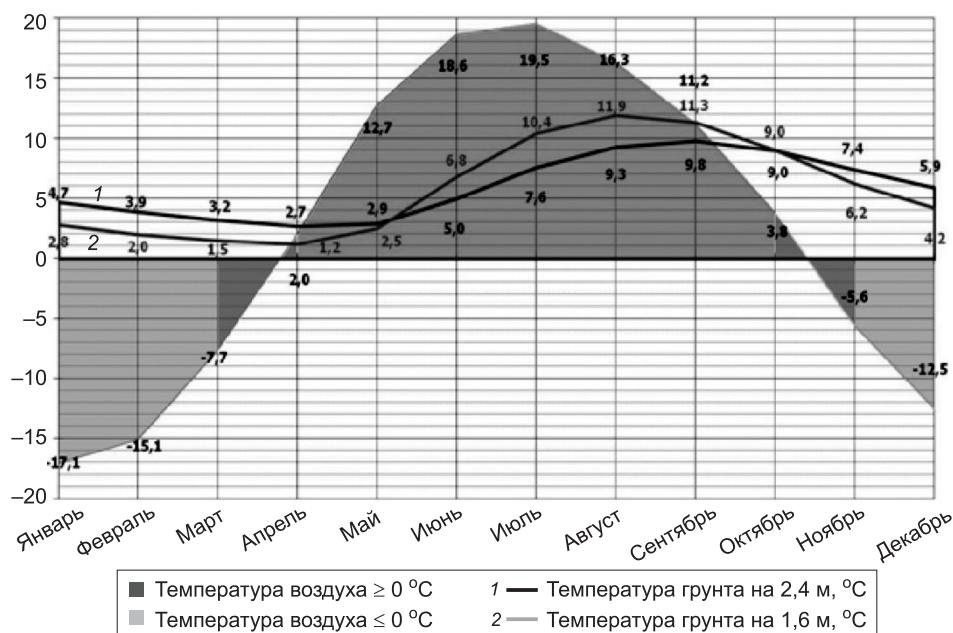


Рис. 2. Средние температуры грунта и наружного воздуха по месяцам

грунта на глубине 1,6 м не опускается ниже  $+1,2^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 2,4 м — ниже  $+2,7^{\circ}\text{C}$ .

В 2013 г. было проведено натурное обследование двухэтажного коттеджа площадью 150 м<sup>2</sup> для семьи из пяти человек, оборудованного сол-

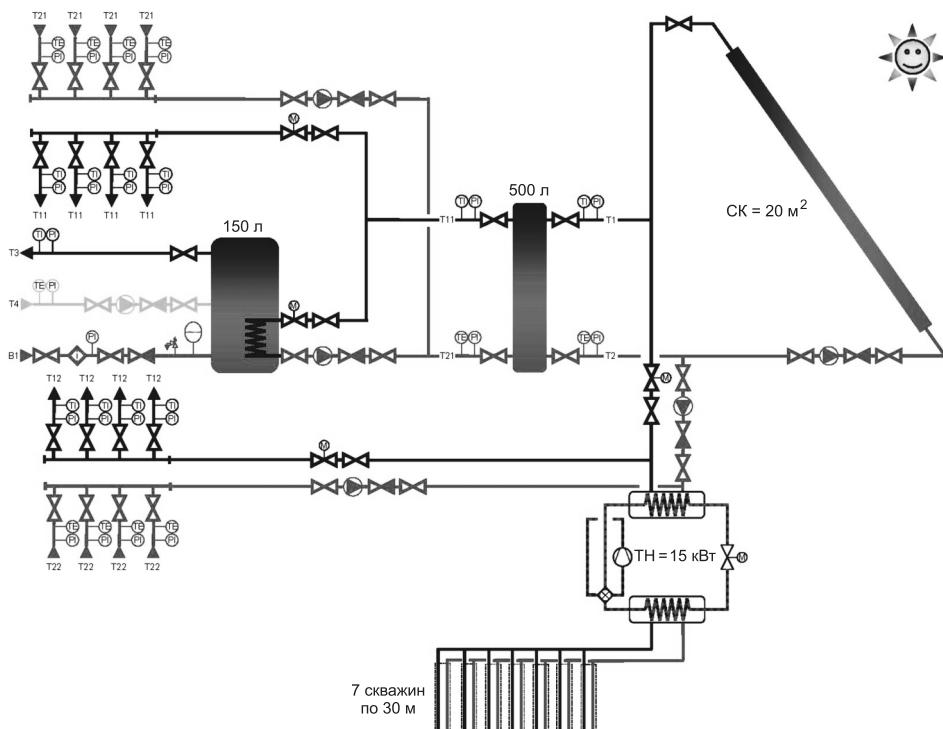


Рис. 3. Принципиальная схема установки коттеджа

нечными коллекторами общей площадью 20 м<sup>2</sup>, тепловым насосом с грунтовым аккумулятором из семи 30-метровых вертикальных скважин. Принципиальная схема оборудования коттеджа приведена на рис. 3, данные наблюдений за работой системы представлены на рис. 4.

Согласно данным рис. 4, температура теплоносителя на входе в тепловой насос в течение года меняется незначительно в пределах от -0,5 °C до +2,7 °C. Температура грунта на глубине нижней отметки заложения скважин 30 м также практически одинакова в течение года от +6,9 до +7,6 °C, изменяется всего на 0,7 °C. Наоборот, температура грунта на уровне верхней отметки заложения скважин колеблется в течение года в большом диапазоне: в зимние месяцы (октябрь–июнь) температура грунта находится в пределах от -4,5 °C до -0,1 °C, а летом (июль–сентябрь) — от +9,6 °C до +14,8 °C. При этом можно видеть, что колебания температур грунта в верхней части скважин практически не влияют на колебание температур теплоносителя на входе в тепловой насос.

Число пасмурных дней в году в 2013 г. составило 41 % от общей продолжительности года (149 дней), число часов работы солнечного коллектора — 34 % (3011 ч). Наименьшее число часов работы солнечного коллектора приходится на самые «глухие месяцы» — ноябрь, декабрь, январь, февраль. В этот период работы одного солнечного коллектора недостаточно для покрытия тепловой нагрузки отопления и горячего во-

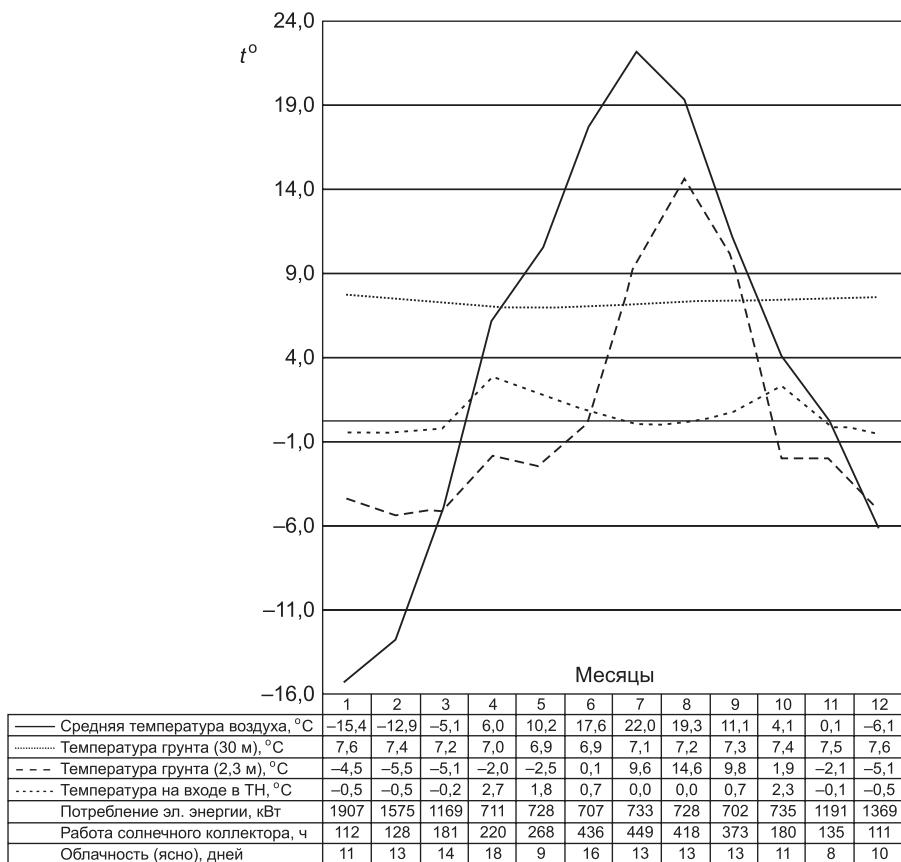


Рис. 4. Графики температур воздуха, грунта и теплоносителя по месяцам 2013 г.

доснабжения, необходимо использование грунтового аккумулятора (что соответствует приведенным данным в [2, рис. 4]). В теплый период грунтовый аккумулятор используется как аккумулятор тепла от системы охлаждения внутреннего воздуха фэнкойлами.

Для проектирования «солнечных домов» и грунтовых аккумуляторов требуется большой объем подготовленной климатологической информации. Для Западной Сибири такие данные специально не собирались. Данные по солнечной радиации, приведенные в [1], соответствуют полученным данным при натурном обследовании. Сведений по температурам грунтов в [1] не приводится. Сравнение проводилось по наблюдениям метеостанции пос. Огурцово Новосибирской области (рис. 5). Расхождение по температурам грунта на глубине 2,4 м составляет до 11 °C (−5,1 °C и +5,9 °C в декабре) и до 5,3 °C (+14,6 °C и +9,3 °C в августе). Это расхождение объясняется разрядкой грунтового аккумулятора зимой (факт −5,1 °C, по сведениям метеостанции +5,9 °C) и зарядкой летом (факт +14,9 °C, по данным метеостанции +9,3 °C). Заметно более медленное прогревание грунта весной и более быстрое остывание грунта осенью в зоне его промерзания. На глубине 30 м колебаний температур практически нет.

За 2013 г. общее потребление электроэнергии коттеджа составило 12255 кВт: освещение, работа бытовых приборов и оборудования систем тепло- и холодоснабжения (перечень оборудования приведен в таблице).

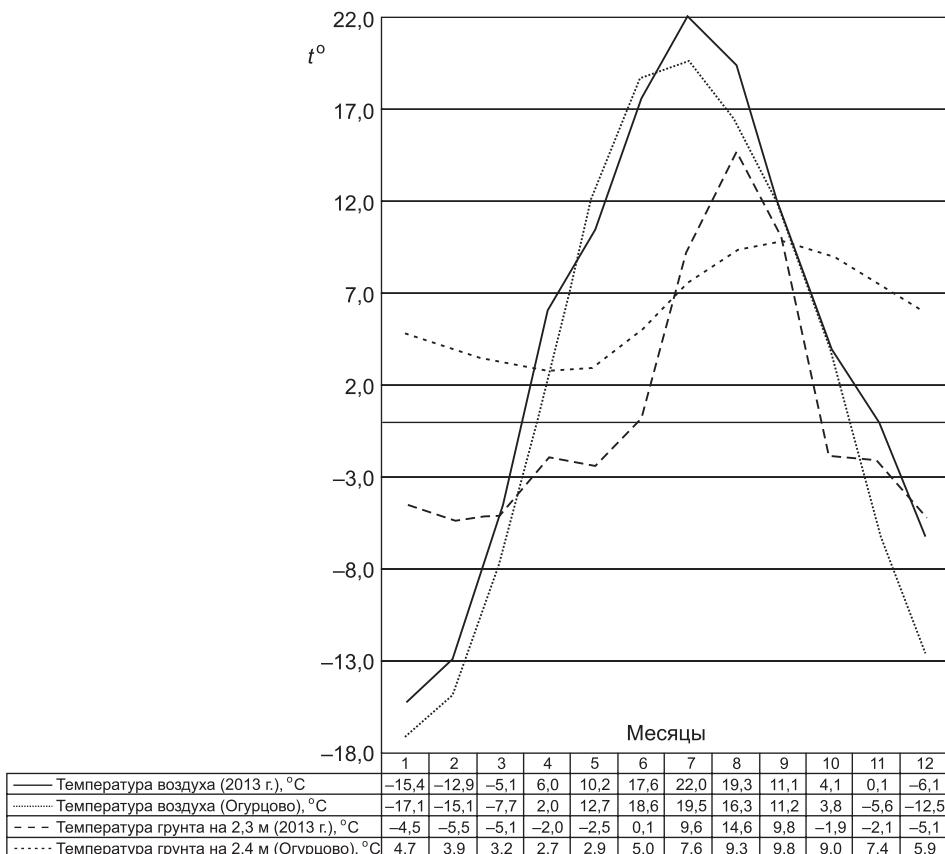


Рис. 5. Данные метеостанции пос. Огурцово Новосибирской области по месяцам 2013 г.

**Перечень установленного оборудования**

№ п/п	Оборудование	Характеристика
1	Тепловой насос TH-15	Теплопроизводительность 15,3 кВт Коэффициент преобразования 2,89 Потребляемая эл. мощность 5,3 кВт
2	Циркуляционный насос ГВС ALPHA2 32-60	Расход 2,36 м <sup>3</sup> /ч Напор 2,0 м вод. ст. Потребляемая эл. мощность 0,028 кВт
3	Насос на коллекторе TH MAGNA3 25-40	Расход 4,25 м <sup>3</sup> /ч Напор 2,0 м вод. ст. Потребляемая эл. мощность 0,043 кВт
4	Насос на отопление ALPHA2 25-60	Расход 1,88 м <sup>3</sup> /ч Напор 2,0 м вод. ст. Потребляемая эл. мощность 0,021 кВт
5	Насос на холодоснабжение MAGNA3 25-40	Расход 1,89 м <sup>3</sup> /ч Напор 2,0 м вод. ст. Потребляемая эл. мощность 0,024 кВт
6	Фэнкойлы № 308 (4 шт.)	Холодопроизводительность 2,62 кВт Теплопроизводительность 1,47 кВт Потребляемая эл. мощность 0,028 кВт

Общее среднесуточное потребление электрической мощности составляет 33,7 кВт, среднемесечное — 1021,3 кВт. Анализ потребления электроэнергии показывает, что даже в самые холодные месяцы (ноябрь–февраль) грунтовый аккумулятор использовался лишь часть времени — не более полумесяца. В общем электропотреблении в коттедже не учитывалось отдельно электропотребление на бытовые нужды и для работы инженерного оборудования, так как установлен общий электросчетчик на коттедж.

**Выводы.** 1. Южная Сибирь обладает достаточным количеством солнечной энергии для использования ее в системах тепло- и холодоснабжения.

2. Для наиболее холодных месяцев (ноябрь–февраль) требуется дополнительный источник теплоты.

3. В качестве дополнительного источника теплоты возможно использование грунтового аккумулятора и теплового насоса.

4. Глубина заложения скважин требует дополнительного исследования, по паспортным данным минимальная температура теплоносителя (рассола) 0 °C. Необходимо определить минимальную глубину скважины из условия снижения первоначальных затрат на устройство грунтового коллектора.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СНиП 23-01-99. Строительная климатология [Текст]. — М. : Госстрой России, 2000.
2. Савельев, Е.Г. Использование солнечной энергии в суровых климатических условиях [Текст] / Е.Г. Савельев, Т.Л. Рохлецова // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 5. — С. 68–73.

**САВЕЛЬЕВ Евгений Геннадьевич, ст. препод.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

**РОХЛЕЦОВА Татьяна Лаврентьевна, канд. техн. наук, доц.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 24.10.14

**Savel'yev Evgeniy Gennadievich**, senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Rokhletsova Tat'yana Lavrentievna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **EXPERIENCE WITH THE USE OF SOLAR ENERGY AND GROUNDWATER IN SOUTH SIBERIA**

Experience of use of and operation of «the solar house» with the duplicating source of thermal energy — the soil accumulator in the conditions of severe climate is considered.

Key words: solar heating, heat pumps, renewable energy.

### **REFERENCES**

1. CN&R 23-01-99. Construction climatology. — M. : Gosstroy of Russia, 2000.
  2. S a v e l ' y e v , E.G. Use of solar energy in hars environments [Text] / E.G. Savel'yev, T.L. Rokhletsova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 5. — P. 68–73.
-