

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
АССОЦИАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ СНГ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 8 (596)  
Август 2008 г.

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

Главный редактор В. Г. Себешев

Редакционная коллегия: А. А. Афанасьев,  
В. Л. Баладинский, Т. И. Баранова, В. А. Воробьев,  
П. А. Дмитриев, В. А. Игнатьев, В. И. Костин (зам.  
гл. редактора), Г. Б. Лебедев (зам. гл. редактора),  
Е. М. Лобанов, Л. С. Ляхович, В. И. Морозов,  
Ю. П. Панибратов, Ю. А. Попов, Ю. П. Правдивец,  
В. Г. Себешев, И. Б. Соколов, Ю. А. Феофанов,  
Е. М. Чернышов, Г. Н. Шоршнев

Ответственный секретарь Н. В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,  
Тел./факс 266-28-59.

<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 28.07.08. Формат 70×108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 10,85+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3284.

ЗАО «Новосибирский полиграфкомбинат», 630007,  
г. Новосибирск, Красный проспект, 22.

Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

**Мигунов В. Н.** Коррозия  
арматуры в трещинах же-  
лезобетонных конструкций  
в газовой воздушной атмосфе-  
ре производственных зда-  
ний ..... 4

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕР- НЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Крысько В. А., Савелье-  
ва Н. Е., Шагивале-  
ев К. Ф.** Устойчивость  
замкнутых цилиндрических  
оболочек при действии ло-  
кальных поперечных нагру-  
зок ..... 9

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА- ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

**Морева И. В., Медя-  
ник В. В., Соколова Ю. А.**  
К вопросу о комплексной  
активации компонентов  
при получении гипсовых  
вяжущих ..... 17

**Гурьева В. А.** Примене-  
ние силикатсодержащих  
попутных продуктов горно-  
обогатительных комбина-  
тов в производстве кера-  
мики ..... 20

**Логанина В. И., Петухо-  
ва Н. А.** Модификация ре-  
цептуры полистирольного  
красочного состава дис-  
персными частицами орга-  
ноглины ..... 25

**Егорова А. Д., Наро-  
дов В. В., Местников А. Е.**  
Растворные смеси на осно-  
ве расширяющихся цемен-  
тов, твердеющих в услови-  
ях вечной мерзлоты ..... 28

## ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Молодин В. В., Андриевский С. Н., Пинаева Ю. А.</b> Зимнее синхронное бетонирование смежных колонн и диафрагмы с последующим бетонированием плит перекрытий монолитных каркасов жилых и гражданских зданий .....	31
<b>Немчикова Л. А.</b> Оптимизация срока службы рабочих колес грунтонасосов при гидромеханизированной разработке обводненных месторождений песка .....	39
<b>Щербаков А. В., Кузнецов С. М., Чулкова И. Л.</b> Формирование комплексов машин для добычи строительных материалов способом гидромеханизации .....	48

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

<b>Гришин Б. М., Андреев С. Ю., Бикунцова М. В., Ишев С. В.</b> Совершенствование конструкций электрогидродинамических устройств, используемых для обработки возвратного активного ила азротенков .....	50
<b>Халтурина Т. И., Руденко Т. М., Чурбакова О. В.</b> Исследования технологии электрохимической обработки сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты .....	56

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

<b>Веригин Ю. А., Кульсеитов Ж. О., Абдеев Б. М., Брим Т. Ф.</b> Несущая способность радиальных эластомерных уплотнительных колец эллиптического сечения в условиях предварительного натяга .....	61
<b>Кириллов Ф. Ф., Кухаренко А. Д.</b> Выбор ширины резца бесковшового траншеекопателя .....	67

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

<b>Кузина В. В., Кошев А. Н., Сухов И. Ф.</b> Математическое моделирование и построение информационной системы для мониторинга распространения возможных техногенных загрязнений водной среды региона .....	70
<b>Шейна С. Г., Гиря Л. В.</b> Организационно-технологические основы управления экологическим риском при реконструкции городской застройки .....	75
<b>Клевакин А. Н.</b> Обновление пространственной среды сибирских городов .....	79

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<b>Жаданов В. И., Тисевич Е. В., Гребенюк Г. И.</b> Совершенствование алгоритмов расчета нелинейно-деформируемых ребристых сжато-изгибаемых панелей на основе древесины. Сообщение 1 .....	87
<b>Зубачев П. В.</b> Смещения и внутренние усилия в шпунтовом ограждении, поддерживающем усиленный грунтовый откос .....	93
<b>Назирова Р. А., Соловьева О. В., Михеев Д. А., Пересыпкин Е. В.</b> Использование высокотеплопроводных материалов для улучшения температурно-влажностных характеристик наружных углов стен, угловых и рядовых стыков строительных конструкций .....	98
<b>Хархардин А. Н.</b> Фрактальная размерность дискретных систем .....	102
<b>Сапожников А. И., Яксубаев К. Д.</b> Понижение порядка системы уравнений использованием кронекеровского произведения матриц в задаче исследования пространственной работы сил в многоэтажных зданиях регулярной конструкции ....	108

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

<b>Бокарев С. А., Просеков С. А., Потапов А. С.</b> Экспериментальные лабораторные исследования комбинированных труб на моделях .....	115
---	-----

## CONTENTS

### BUILDING STRUCTURES

<b>Migunov V. N.</b> Corrosion of Reinforcement in Cracks of Concrete Elements in Air Gaseous Atmosphere of Industrial Buildings .....	4
--	---

### THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

<b>Krysko V. A., Savelyeva N. E., Shagivaleyev K. F.</b> Stability of Closed Cylindrical Shells under the Action of Local Transverse Loads .....	9
--	---

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

<b>Moreva I. V., Medyanik V. V., Sokolova Yu. A.</b> To the Question on Complex Activation of Components in the Production of Gypsum Binding Material .....	17
---	----

<b>Guryeva V. A.</b> Application of Silicate-Containing Coproducts of Mining-and-Concentration Complexes in the Ceramics Production .....	20
<b>Loganina V. I., Petukhova N. A.</b> Modification of Polystyrene Paint Formula Using Dispersed Particles of Organic Clay .....	25
<b>Egorova A. D., Narodov V. V., Mestnikov A. E.</b> Mortars Based on Expanded Cements that Harden under Permafrost Conditions .....	28
<b>ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION</b>	
<b>AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY</b>	
<b>Molodin V. V., Andriyevsky S. N., Pinayeva Yu. A.</b> Winter Simultaneous Concreting of Adjoining Columns and Diaphragm with Further Concreting Panels of Ceilings of Monolithic Frameworks in Residential and Civic Buildings .....	31
<b>Nemchikova L. A.</b> Optimization of Service Life of the Soil-Pump Driving Wheel during Hydromechanized Development of Inundated Sand Deposits .....	39
<b>Shcherbakov A. V., Kuznetsov S. M., Chulkova I. L.</b> Forming of Sets of Machines for the Extraction of Building Materials by the Hydromechanization Method .....	48
<b>SANITARY ENGINEERING</b>	
<b>Grishin B. M., Andreyev S. Yu., Bikunova M. V., Ishev S. V.</b> Improvement of Constructions of Electrohydrodynamic Devices Used for the Treatment of Return Sludge in Aeration Tanks .....	50
<b>Khalturina T. I., Rudenko T. M., Churbakova O. V.</b> Investigation into the Technology of Electrochemical Treatment of Waste Waters with Emulsified Oil Products .....	56
<b>BUILDING AND ROAD MACHINES</b>	
<b>Verigin Yu. A., Kulseitov Zh. O., Abdeyev B. M., Brim T. F.</b> Carrying Capacity of Radial Elastomeric Elliptical Sealing Rings under Preload .....	61
<b>Kirillov F. F., Kukhareenko A. D.</b> Selection of Width of Cutter for the Nonbucket-Type Trencher .....	67
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Kuzina V. V., Koshev A. N., Sukhov I. F.</b> Mathematical Modeling and Construction of Information System to Monitor the Distribution of Possible Technogenic Pollution of Water Medium in the Region .....	70
<b>Sheina S. G., Girya L. V.</b> Organizational and Technological Basis for the Management of Ecological Risk in the Reconstruction of the Urban Building System ....	75
<b>Klevakin A. N.</b> Environmental Renewal of Siberian Cities .....	79
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Zhadanov V. I., Tisevich E. V., Grebenyuk G. I.</b> Improvement of Algorithms to Calculate Nonlinearly-Strained and Compressed-Bend Wood-Based Ribbed Panels. Information 1 .....	87
<b>Zubachev P. V.</b> Displacements and Internal Forces in a Sheet Pile Screen Supporting a Reinforced Earth Slope .....	93
<b>Nazirov R.A., Solovyiova O.V., Mikheyev D.A., Peresypkin E.V.</b> Using of Highly Heat-Conductive Materials to Improve Temperature-Humidity Characteristics of External Corners of Walls, Angular and Ordinary Joints of Building Structures .....	98
<b>Kharkhardin A. N.</b> Fractal Dimension of Discrete Systems .....	102
<b>Sapozhnikov A. I., Yaksubayev K. D.</b> Depression of Order of System of Equations by Kronecker Multiplication of Matrices in the Problem of Study of Spatial Work of Forces in Multistorey Buildings of Regular Structure .....	108
<b>IN HIGHER SCHOOL LABS</b>	
<b>Bokarev S. A., Prosekov S. A., Potapov A. S.</b> Experimental Laboratory Exploration of Composite Culverts on Models .....	115

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.45:620.169.1:620.193

**В. Н. МИГУНОВ**, канд. техн. наук, доц. (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

## КОРРОЗИЯ АРМАТУРЫ В ТРЕЩИНАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ГАЗОВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Представлены результаты натурных и экспериментальных исследований железобетонных конструкций в газовой агрессивной среде, содержащей кислые газы. Проведен теоретический расчет, определяющий период заполнения полости трещины углекислым газом.

Длительная работа железобетонных конструкций в условиях агрессивных воздействий природных и техногенных сред обеспечивается совокупной коррозионной устойчивостью как бетона, так и стальной арматуры. Коррозионная стойкость бетона определяется особенностями воздействующей на него среды, химической реакционной способностью его составляющих (вяжущего и заполнителя) и степенью проницаемости.

В общем случае возможность коррозии стали в тяжелом плотном бетоне на щелочных вяжущих, не содержащих хлорид-ионов, определяется величиной pH поровой влаги в бетоне, электрохимическим потенциалом поверхности стали и температурой. Величина pH зависит от вида и количества цемента и химических добавок. Длительная коррозионная защита стальной арматуры обеспечена при условии, если величина  $\text{pH} > 12,5$ . При понижении значения pH до 9 и менее защитное действие щелочей бетона для стальной арматуры снижается [1].

Электрохимический потенциал является свойством контактной зоны сталь — бетон. Он зависит как от вида стальной арматуры и состава бетона, так и от абсолютной влажности бетона и относительной влажности газообразного воздуха на поверхности стали [1].

В агрессивной воздушной среде производственных предприятий преобладает углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ). Его концентрация в 100–1000 раз превышает концентрацию других кислых газов, таких как сернистый ангидрид ( $\text{SO}_2$ ), серный ангидрид ( $\text{SO}_3$ ), сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и сероуглерод ( $\text{CS}_2$ ) [2]. Согласно научным данным [1–3], агрессивное влияние газообразной среды, содержащей двуокись углерода, на железобетонные конструкции значительно усиливается в присутствии этих газов.

Трещины в бетоне облегчают доступ внешней среды к поверхности арматуры и способствуют возникновению и развитию ее коррозии. Проницаемость трещин для кислых газов намного выше, чем у бетона без трещин. Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в трещине бетона шириной  $a_{\text{т}} = 0,20$  мм равен коэффициенту диффузии его в воздухе  $D_{\text{CO}_2} = 0,14 \text{ см}^2/\text{с}$ . Это на три порядка выше, чем в бетонах средней плотности [2].

В газовой влажной среде, не загрязненной существенно аэрозолями, наблюдается нейтрализация бетона не только у стенок трещины, но и в зоне нарушения его контакта с арматурой вдоль ее поверхности. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований, полученных при обследовании несущих железобетонных конструкций и

длительными испытаниями серии железобетонных образцов на свиноводческом комплексе «Тамалинский» в Пензенской области [4].

Газовоздушная атмосфера здания характеризуется повышенной относительной влажностью воздуха до 95%, содержанием аммиака до 0,020 мг/л, сероводорода до 0,015 мг/л, концентрацией углекислого газа 0,3% по объему. Несущими конструкциями являются железобетонные полурамы, изготовленные из бетона нормальной проницаемости.

Результаты обследования железобетонных полурам показывают определяющее влияние на долговечность конструкции состояния арматуры из-за ее коррозионной сохранности. За 13 лет эксплуатации зданий среднее значение глубины карбонизации защитного слоя бетона толщиной 30 мм составило 15–17 мм. Из обследованных 86 полурам на одиннадцати в защитном слое бетона вдоль арматурных стержней зафиксированы продольные трещины с раскрытием 50 мкм и длиной более 1 м, что свидетельствует о протекании коррозионного процесса на арматуре.

В газовоздушной среде этого здания проведены длительные испытания шести железобетонных конструкций на предмет исследования их несущей способности и коррозионной стойкости. В качестве опытных образцов использованы балки из тяжелого бетона класса В30 пониженной проницаемости с размерами 1500×200×70 мм. В качестве вяжущего использован среднеалюминатный портландцемент с эффективным коэффициентом диффузии углекислого газа в бетоне  $D = 0,17 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ . Применялась рабочая арматура класса А-111, с маркой стали 35ГС и диаметром стержня 12 мм. Толщина защитного слоя бетона  $\delta = 30 \text{ мм}$ .

Опытные образцы испытывают воздействие периодически изменяющейся нагрузки с минимальным и максимальным уровнями загрузки соответственно 0,4–0,7  $M_{\text{разр}}$  и режимом приложения нагрузки 14 сут. Нагрузка моделирует воздействие снега на конструкции в реальных условиях эксплуатации. Испытания опытных образцов проведены на силовых установках. Установка рассчитана на одновременное нагружение двух балок на изгиб в условиях длительного воздействия ступенчато-повторной нагрузки и агрессивной среды [5].

Для стимуляции коррозии арматуры в трещинах бетона ее поверхность в течение первого года испытаний один раз в сутки увлажнялась раствором. Химический состав раствора аналогичен составу жидкой среды, получаемой в процессе жизнедеятельности животных. Жидкая среда содержит 95,7% воды и 4,3% сухих веществ (мочевины — 2%, мочевой кислоты — 0,05, натрий-ион — 0,35, калий-ион — 0,15, магний-ион — 0,04, кальций-ион — 0,06, хлорид-ион — 0,6, фосфат-ион — 0,27, сульфат-ион — 0,78%).

После восемнадцати лет испытания двух образцов получены следующие экспериментальные результаты. Ширина максимально раскрытых трещин  $a_{\text{крс}} = 0,160 \text{ мм}$  при верхнем уровне загрузки увеличилась в 1,80 раза, при нижнем — в 2,27 раза. Жесткость балок при верхнем и нижнем уровне загрузки уменьшилась в 1,82 раза. Данные изменения жесткости и ширины раскрытия трещин при верхнем и нижнем уровне загрузки показывают влияние продуктов коррозии арматуры на закрытие трещин.

Четыре балки сняты с испытаний и подвергнуты разрушению с определением их несущей способности, в том числе по два образца соответственно после четырех и двенадцати лет экспериментальных испытаний.

После двенадцати (четырех) лет испытания получены следующие результаты. Ширина максимально раскрытых трещин  $a_{\text{крс}} = 0,160 \text{ мм}$  при верхнем уровне загрузки увеличилась в 1,70 (1,60) раза, при нижнем — в 2,14 (2,0) раза. Величина жесткости балок при верхнем и нижнем уровне загрузки уменьшилась в 1,78 (1,70) раза. Несущая способ-

ность конструкции оказалась выше на 12% (10%) контрольной. Причиной является увеличение прочности бетона вследствие воздействия на него газовой среды с высокой относительной влажностью и раствора. Прочность бетона при сжатии изменилась к концу испытаний с 31 до 37 (35) МПа.

При испытании стержней арматуры, извлеченных из железобетонных элементов, их разрушение происходило по участкам коррозионного поражения глубиной 100–150 мкм. Однако при этом прочность арматуры практически соответствовала прочности в состоянии поставки. Глубина карбонизации бетона в среднем составила 10 (5) мм.

Коррозионное поражение арматуры в зоне трещин бетона локализуется на участке, длина которого с увеличением ширины раскрытия трещин до 0,27 (0,25) мм достигает 60 (50) мм с площадью коррозии 14 (12) см<sup>2</sup>. Средняя и максимальная глубина коррозионных язв на арматуре в зоне трещин соответственно равна 120 и 240 (70 и 150) мкм.

На восемнадцатом году испытания на поверхности бетона защитного слоя в зоне чистого изгиба вдоль арматурного стержня отмечено появление отдельных волосяных продольных трещин с шириной раскрытия 20–30 мкм, что является следствием давления продуктов коррозии стали на защитный слой бетона. Распространение продуктов коррозионного поражения стали на поверхности арматуры вдоль стержня между трещинами может оказать решающее влияние на долговечность железобетонных конструкций из-за нарушения сцепления арматуры с бетоном.

Результаты исследований показывают необходимость применения в газовой среде с аналогичными параметрами микроклимата железобетонных конструкций с бетоном пониженной проницаемости и добавок — ингибиторов коррозии арматуры [6].

Длительность защитного действия бетона в атмосфере кислых газов CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S рассчитывается по уравнениям диффузии в газовой фазе бетона [2]. Железобетонные конструкции в присутствии этих газов повреждаются вследствие коррозии стальной арматуры после нейтрализации защитного слоя бетона.

Согласно [2], для расчета глубины карбонизации бетона используется уравнение первого закона Фика. В результате получена следующая зависимость:

$$x = \sqrt{2D_6 C_x T / m_0}, \quad (1)$$

где  $x$  — глубина карбонизации бетона, см, за время  $T$ , с;

$C_x$  — концентрация углекислого газа (относительные единицы);

$D_6$  — эффективный коэффициент диффузии углекислого газа, см<sup>2</sup>/с, характеризует проницаемость карбонизированного слоя бетона;

$m_0$  — реакционная способность бетона (объем газа, поглощаемый единицей объема бетона, зависит от минерального состава, расхода и степени гидратации цемента, а также от структуры пор цементного камня).

Определим расчетным путем количество углекислого газа (CO<sub>2</sub>), которое поступает к поверхности арматуры с учетом его поглощения стенками бетона трещины.

Предполагается, что скорость поступления CO<sub>2</sub> в зону трещин является соизмеримой со скоростью поглощения его бетоном стенками трещины. Вследствие этого концентрация углекислого газа в полости трещины может быть в течение длительного времени низкой.

Используем закон диффузионного переноса газа в воздухе для определения времени достижения соответствующей относительной концентрации газа в полости трещин с параллельными бетонными стенками.



Исходные геометрические параметры трещины: ширина раскрытия —  $a_t$ , толщина защитного слоя бетона —  $\delta$ , длина трещины —  $L$ .

Количество углекислого газа, поступающего в полость трещин бетона:

$$Q_1 = D_b(C_0 - C_x) \cdot a_t \cdot L \cdot T / \delta, \quad (2)$$

где  $D_b$  — коэффициент диффузии  $\text{CO}_2$  в воздухе,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;

$C_0$  — содержание углекислого газа в воздухе (относительные единицы);

$C_x$  — содержание углекислого газа в полости трещины на границе карбонизации (относительные единицы);

$\delta$  — толщина защитного слоя бетона, см;

$a_t$  — ширина раскрытия трещины, см;

$L$  — длина трещины, см;

$T$  — время поступления газа в полость трещины, с.

Количество углекислого газа ( $Q_2$ ), поглощаемого бетоном стенками трещины:

$$Q_2 = 2m_0 \cdot x \cdot L$$

где  $m_0$ ,  $x$ ,  $L$ , — то же, что и в формулах (1), (2).

Предполагается, что все количество  $\text{CO}_2$ , поступающего в полость трещины, поглощается стенками бетона при  $Q_1 = Q_2$ . Получаем уравнение

$$D_b(C_0 - C_x) \cdot a_t \cdot L \cdot T / \delta = 2m_0 \cdot x \cdot L. \quad (4)$$

Результаты решения уравнения (4):

$$x = \frac{D_b(C_0 - C_x)a_t T}{2m_0 \delta^2}, \quad (5)$$

$$(C_0 - C_x)^2 = \left[ \frac{8D_b m_0 \delta^4}{D_b^2 a_t^2 T} \right] \cdot C_x. \quad (6)$$

Примем  $\left[ \frac{8D_b m_0 \delta^4}{D_b^2 a_t^2 T} \right] = K$ . Тогда уравнение (6) имеет вид

$$(C_0 - C_x)^2 = K C_x. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) при заданных значениях  $K$  позволяет получить следующие функциональные зависимости.

При  $K_1 = 0 \rightarrow C_{1x} = C_0$ ; при  $K_2 = 0,2 \rightarrow C_{2x} = 0,786 C_0$ ;

при  $K_3 = 0,4 \rightarrow C_{3x} = 0,540 C_0$ ; при  $K_4 = 0,6 \rightarrow C_{4x} = 0,470 C_0$ ;

при  $K_5 = 0,8 \rightarrow C_{5x} = 0,420 C_0$ ; при  $K_6 = 1 \rightarrow C_{6x} = 0,380 C_0$ ;

при  $K_7 = 2,0 \rightarrow C_{7x} = 0,270 C_0$ ; при  $K_8 = 4,0 \rightarrow C_x = 0,170 C_0$ .

По формуле (4) находим время (с), за которое в полости трещины получается соответствующее  $K$  соотношение  $C_x/C_0$ :

$$T = \frac{8D_b m_0 \delta^4}{D_b^2 a_t^2 K}. \quad (8)$$

Результаты расчетов, выполненных по формуле (8), с учетом принятых значений  $m = 50$ ,  $D_b = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $D_b = 0,14 \text{ см}^2/\text{с}$  [1, 2] показывают, что повышение концентрации углекислого газа в полости трещины происходит постепенно и тем быстрее, чем больше плотность бетона. В то же время небольшие значения времени, по сравнению с нормативным сроком эксплуатации, достижения соответствующей относительной концентрации газа позволяют сделать вывод о их не решающей роли в эксплуатационных условиях. Это необходимо учитывать при ускоренных

экспериментальных исследованиях, когда концентрация  $C_0$  в испытательных камерах поддерживается непродолжительное время.

Наиболее типичным представителем из кислых газов, кроме углекислого, является часто встречающийся в промышленности, сельском хозяйстве и природных условиях сернистый ангидрид ( $SO_2$ ). Сернистый газ, взаимодействуя со щелочными компонентами цементного камня в бетоне, образует сульфит-сульфат кальция, который мало растворим в жидкой фазе.

По механизму воздействия на коррозионный процесс стали сернистый ангидрид относится к эффективному деполяризатору катодного процесса. Поэтому уже при незначительном содержании  $SO_2$  в воздухе  $C_0 = 0,015\%$  его концентрация в электролитах становится соизмеримой с концентрацией кислорода. Вместе с тем наличие  $SO_2$  мало изменяет скорость протекания анодного процесса на арматуре.

Для экспериментальных испытаний в условиях длительного воздействия сернистого ангидрида на железобетонные конструкции с поперечными трещинами в защитном слое бетона были изготовлены 20 (в том числе 10 контрольных) железобетонных балок с размерами  $2000 \times 200 \times 70$  мм. Использован бетон повышенной плотности. В качестве рабочей арматуры применялся одиночный стержень диаметром 12 мм класса А-111. Балки испытывали воздействие длительно действующей постоянной изгибающей нагрузки, моделирующей эксплуатационную.

Для проведения испытания в агрессивной газовой среде разработаны и изготовлены нагружающие установки [7] и пять газовых камер [8]. В одной камере одновременно располагаются четыре образца. Балки испытываются в газовой атмосфере с концентрацией газа  $100 \text{ мг/м}^3$ . По степени агрессивного воздействия газообразной среды на железобетонные конструкции она оценивается как среднеагрессивная [9].

Выполненный расчет с учетом величины этой концентрации и толщины защитного слоя бетона  $= 25$  мм показывает, что период до начала коррозионного процесса на арматуре для трещин с шириной раскрытия  $0,1-0,2-0,3$  мм соответственно составляет  $T = 50-10-5$  сут.

Результаты экспериментальных исследований в течение одного года подтверждают данные теоретического расчета. За период испытания глубина нейтрализации бетона в среднем составила 8 мм. Коррозионное поражение на арматуре зафиксировано только в зоне поперечных трещин бетона. Оно локализуется на ограниченном участке, длина которого с увеличением ширины раскрытия трещин до  $0,30$  мм составляет 27 мм. Средняя и максимальная глубина коррозионных язв на арматуре в зоне максимально раскрытых трещин соответственно составляет 50 и 70 мкм. Сравнительно низкая скорость коррозионного поражения арматуры объясняется наличием инкубационного периода, нормальной относительной влажностью газовой среды и присутствием в полости трещин продуктов коррозии цементного камня с сернистым ангидридом.

**Выводы.** 1. По степени агрессивного воздействия газовой среда свиноводческих зданий по отношению к эксплуатирующимся железобетонным конструкциям с поперечными трещинами в защитном слое бетона является сильноагрессивной из-за условий распространения коррозионного процесса вдоль арматурного стержня в зоне влияния трещин.

2. Определен расчетный период времени получения соответствующей относительной концентрации углекислого газа в бетонной полости трещин в зависимости от геометрических и технических параметров.

3. Коррозионное разрушение стали в бетоне с поперечной трещиной в защитном слое бетона имеет инкубационный период, который определяется временем взаимодействия бетона с агрессивной газовой средой в полости трещин.



4. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций в условиях длительного воздействия сернистого ангидрида и постоянной нагрузки не выявили определяющего влияния сернистого газа на снижение долговечности образцов вследствие коррозионного поражения арматуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах/С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры и др.— М.: Стройиздат, 1990.— 217 с.
2. Москвин В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты/В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев и др.— М.: Стройиздат, 1980.— 536 с.
3. Москвин В. М. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры/В. М. Москвин, С. Н. Алексеев, Г. П. Вербецкий и др.— М.: Стройиздат, 1971.— 144 с.
4. Мигунов В. Н. Исследование долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в свиноводческих зданиях/В. Н. Мигунов//Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах: Тез. докл. и сообщ. республик. науч.-техн. семинара.— Уфа: НИИЖБ. НИИпромстрой, 1987.— С. 71–73.
5. Мигунов В. Н. Установка для режимных испытаний железобетонных балок при действии медленно меняющихся нагрузок в присутствии агрессивной среды (статья)/В. Н. Мигунов//Реферативный журнал строительства и архитектуры, ВНИИИС, сер. 17, вып. 7.— М., 1983.— 1 пс.
6. Новгородский В. И. Метод определения эффективности ингибиторов коррозии стали в трещинах бетона/В. И. Новгородский, А. Б. Островский, В. Н. Мигунов//Методические рекомендации по исследованию ингибиторов коррозии арматуры в бетоне.— М.: НИИЖБ, 1980.— С. 18–24.
7. Мигунов В. Н. Нагружающие установки для исследования деформативных и прочностных свойств изгибаемых железобетонных элементов: ИЛ № 194-86, ЦНТИ/В. Н. Мигунов.— Пенза, 1986 — 4 с.
8. Мигунов В. Н. Газовая камера для длительных коррозионных испытаний строительных конструкций: ИЛОНТД, № 88-2, ЦНТИ/В. Н. Мигунов.— Пенза, 1988.— 4 с.
9. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.— М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.— 48 с.

© Мигунов В. Н., 2008

Получено 06.03.08

## ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.04:539.3

**В. А. КРЫСЬКО**, д-р техн. наук, проф., **Н. Е. САВЕЛЬЕВА**, канд. физ.-мат. наук, **К. Ф. ШАГИВАЛЕЕВ**, канд. техн. наук, доц. (Саратовский государственный технический университет)

### УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ НАГРУЗОК\*

В рамках нелинейной классической теории пологих оболочек рассмотрена замкнутая цилиндрическая оболочка конечной длины при действии статической локальной нагрузки. Задача решена методом установления на основе метода Бубнова — Галеркина в высших приближениях. Проведено сравнение результатов, полученных методом Бубнова — Галеркина, с аналитическими решениями для оболочки в линейной постановке, для нелинейных оболочек — сходимость метода Бубнова — Галеркина. Выполнены исследования докритических и закритических состояний оболочки в зависимости от приближения метода Бубнова — Галеркина.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-604-01-434-08-606).

Большое количество обзоров посвящено нелинейным задачам теории оболочек и методам их решения [1–3]. Среди работ, относящихся к исследованию устойчивости замкнутой цилиндрической оболочки в нелинейной постановке при неосесимметричной деформации, можно отметить работу Н. И. Ободан [4]. Настоящая работа ставит своей целью продолжить начатые исследования [5–8] и распространить их на решение задач при действии статических нагрузок.

В рамках нелинейной классической теории пологих оболочек рассмотрим замкнутую цилиндрическую оболочку кругового сечения конечной длины с постоянной жесткостью и плотностью при действии внешнего давления.

Цилиндрическая оболочка как трехмерная область  $\Omega$  определяется (рис. 1)

$$\Omega = \{x, y, z | (x, y) \in [0; l] \times [0; 2\pi], -h \leq z \leq h\}.$$

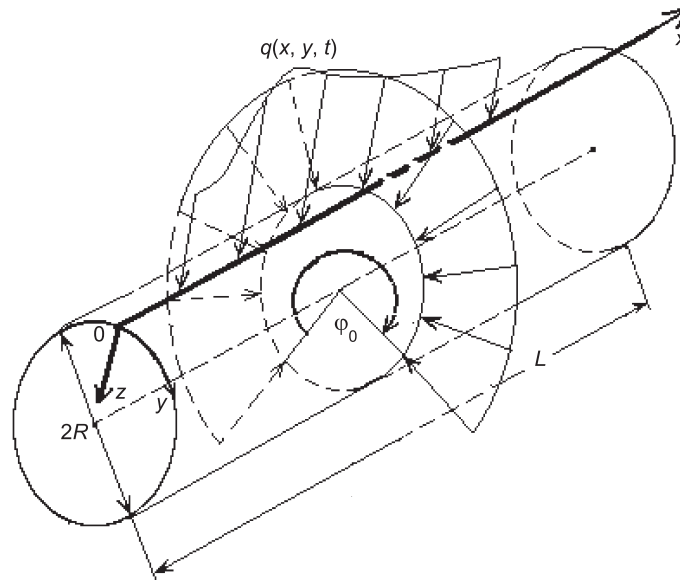


Рис. 1

Исходными являются уравнения теории пологих оболочек [9], которые приведены к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial x^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial y^2} + 2(1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial x \partial y} + \right. \\ & \left. + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial x^2} \right) \right] - \nabla_k^2 F - L(w, F) + k_y^2 q(t) - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} \right) = 0, \\ & \left[ \left( \lambda^2 \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} - \mu \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right) \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial y^2} + \left( \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial x^2} + 2(1+\mu) \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial x \partial y} \right] + \\ & + \nabla_k^2 w + \frac{1}{2} L(w, w) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Система (1) приведена к безразмерному виду с использованием известных безразмерных параметров:  $w = h\bar{w}$ ,  $F = Eh^2\bar{F}$ ,  $t = t_0\bar{t}$ ,  $\varepsilon = \bar{\varepsilon}/\tau$ ,  $x = L\bar{x}$ ,  $y = R\bar{y}$ ,  $k_y = \bar{k}_y \frac{h}{R^2}$  ( $k_x = 0$ ),  $q = \bar{q} \frac{Eh^4}{L^2 R^2}$ ,  $\tau = \frac{LR}{h} \sqrt{\frac{\rho}{Eg}}$ ,  $\lambda = \frac{L}{R}$ ,

где  $E$  — модуль упругости;  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона;  
 $L$  и  $R=R_y$  — длина и радиус оболочки;  
 $t$  — время;  
 $\epsilon$  — коэффициент сопротивления среды, в которой происходит движение оболочки;  
 $\mu=0,3$ ,  $q(x, y, t)$  — поперечная нагрузка;  
 $L(w, F)$  — известный нелинейный оператор.

В уравнении (1) и ниже черта над безразмерными величинами для простоты опущена.

Граничные условия [10]:

$$w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0; 1. \quad (2)$$

Следуя [10], перепишем (2) в виде

$$w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0; \quad \epsilon_y = 0 \quad \text{При} \quad x = 0; 1. \quad (3)$$

Такие граничные условия являются идеализацией того довольно часто встречающегося на практике случая, когда края оболочки соединены с высокими, но достаточно тонкими ребрами, изгибной жесткостью которых в касательной плоскости можно пренебречь. Как показывают вычисления, такое пренебрежение допустимо, если толщина стенки ребра превосходит толщину оболочки не более чем в 7 раз [10].

Начальные условия:

$$w(x, y)|_{t=0} = 0, \quad \dot{w}|_{t=0} = 0. \quad (4)$$

Для решения уравнения (1) функции  $w$  и  $F$  представляются в виде произведения функций, зависящих от времени и от координат:

$$w = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} A_{ij}(t) \varphi_{ij}(x, y), \quad F = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} B_{ij}(t) \psi_{ij}(x, y). \quad (5)$$

Желая найти приближенное значение элементов  $w$  и  $F$ , выбираем координатные системы функций  $\{\varphi_{ij}(x, y), \psi_{ij}(x, y)\}$  ( $i, j=0, 1, 2, \dots$ ) в (5), удовлетворяющие следующим пяти требованиям.

1.  $\varphi_{ij}(x, y) \in H_A$ ,  $\psi_{ij}(x, y) \in H_A$ , где  $H_A$  — гильбертово пространство, которое будем называть энергетическим пространством.

2.  $\forall i, j$  функции  $\varphi_{ij}(x, y), \psi_{ij}(x, y)$  — линейно независимы, непрерывны вместе со своими частными производными до четвертого порядка включительно в области  $\Omega$ .

3.  $\varphi_{ij}(x, y), \psi_{ij}(x, y)$  удовлетворяют главным краевым условиям (и начальным условиям, если такие имеются) в точности.

4.  $\varphi_{ij}(x, y), \psi_{ij}(x, y)$  обладают свойством полноты в  $H_A$ .

5.  $\varphi_{ij}(x, y), \psi_{ij}(x, y)$  должны представлять собой  $N$  первых элементов полной системы функций.

Коэффициенты  $A_{ij}(t), B_{ij}(t)$  являются искомыми функциями времени.

Применяя процедуру Бубнова — Галеркина в форме В. З. Власова, с учетом (5) уравнения (1) записываются:

$$\begin{aligned} \sum_{rs} \left[ \sum_{ij} A_{ij} \sum_{kl} H_{ijklrs} + \sum_{ij} B_{ij} C_{1,ijrs} + k_y^2 q Q_{rs} + \sum_{ij} A_{ij} \sum_{kl} B_{kl} D_{1,ijklrs} + \right. \\ \left. + \sum_{ij} \left[ \frac{d^2 A_{ij}}{dt^2} + \epsilon \frac{d A_{ij}}{dt} \right] G_{ijrs} \right] = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sum_{rs} \left[ \sum_{ij} A_{ij} C_{2,ijrs} + \sum_{ij} B_{ij} \sum_{kl} P_{ijklrs} + \sum_{ij} A_{ij} \sum_{kl} A_{rs} D_{2,ijklrs} \right] = 0.$$

Здесь знак  $\sum_{rs}^*$  перед каждым уравнением системы (6) указывает, что под данным уравнением понимается система  $rs$  такого вида уравнений, а интегралы процедуры Бубнова — Галеркина имеют вид:

$$\begin{aligned} H_{ijklrs} &= \int_0^1 \int_0^\xi \frac{1}{12(1-\mu^2)} \left[ \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_{kl}}{\partial x^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \varphi_{kl}}{\partial y^2} + \right. \\ &\quad \left. + 2 \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \varphi_{kl}}{\partial x \partial y} \right] \varphi_{rs} dx dy, \\ C_{1,ijrs} &= \int_0^1 \int_0^\xi \left[ -k_y \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial x^2} - k_x \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial y^2} \right] \varphi_{rs} dx dy, \\ C_{2,ijrs} &= \int_0^1 \int_0^\xi \left[ k_y \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial x^2} + k_x \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial y^2} \right] \psi_{rs} dx dy, \\ D_{1,ijklrs} &= \int_0^1 \int_0^\xi [-L(\varphi_{ij}, \psi_{kl})] \varphi_{rs} dx dy, \quad D_{2,ijklrs} = \int_0^1 \int_0^\xi \frac{1}{2} L(\varphi_{ij}, \varphi_{kl}) \psi_{rs} dx dy, \\ P_{ijklrs} &= \int_0^1 \int_0^\xi \left[ \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi_{kl}}{\partial x^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi_{kl}}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi_{kl}}{\partial x \partial y} \right] \psi_{rs} dx dy, \\ G_{ijrs} &= \int_0^1 \int_0^\xi [-\varphi_{ij} \varphi_{rs}] dx dy, \quad Q_{rs} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} k_y^2 q(x, y, t) \varphi_{rs} dx dy. \end{aligned} \quad (7)$$

После применения процедуры Бубнова — Галеркина в форме В. З. Власова получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений и систему алгебраических уравнений относительно функций  $A_{ij}(t)$  и  $B_{ij}(t)$ , записанных в матричной форме:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\ddot{\mathbf{A}} + \varepsilon \dot{\mathbf{A}}) + \mathbf{H}\mathbf{A} + \mathbf{C}_1 \mathbf{B} + \mathbf{D}_1 \mathbf{A} \mathbf{B} &= \mathbf{Q}q(t), \\ \mathbf{C}_2 \mathbf{A} + \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{D}_2 \mathbf{A} \mathbf{A} &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\mathbf{H} = \|H_{ijrs}\|$ ,  $\mathbf{G} = \|G_{ijrs}\|$ ,  $\mathbf{C}_1 = \|C_{1,ijrs}\|$ ,  $\mathbf{C}_2 = \|C_{2,ijrs}\|$ ,  $\mathbf{D}_1 = \|D_{1,ijklrs}\|$ ,  $\mathbf{D}_2 = \|D_{2,ijklrs}\|$ ,  $\mathbf{P} = \|P_{ijrs}\|$  — квадратные матрицы размерностью  $2 \cdot N_1 \cdot N_2 \times 2 \cdot N_1 \cdot N_2$ ;  $\mathbf{A} = \|A_{ij}\|$ ,  $\mathbf{B} = \|B_{ij}\|$ ,  $\mathbf{Q} = \|Q_{ij}\|$  — матрицы размерностью  $2 \cdot N_1 \cdot N_2 \times 1$ .

Далее второе уравнение системы (8) разрешается относительно  $\mathbf{B}$  и решается методом обратной матрицы на каждом шаге по времени:

$$\mathbf{B} = [-\mathbf{P}^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{A} - \mathbf{P}^{-1} \mathbf{C}_2] \mathbf{A}. \quad (9)$$

Умножая на  $\mathbf{G}^{-1}$  первое уравнение системы (8) и обозначая  $\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{R}$ , приходим к задаче Коши для нелинейной системы уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{A}} = \mathbf{R}, \\ \dot{\mathbf{R}} = -\bar{\varepsilon} \mathbf{R} - [\mathbf{G}^{-1} \mathbf{C}_1 + \mathbf{G}^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{A}] \cdot \mathbf{B} - \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{A} + \mathbf{G}^{-1} \mathbf{Q}q(\bar{t}). \end{cases} \quad (10)$$

Проведенное преобразование возможно, так как обратные матрицы  $\mathbf{G}^{-1}$  и  $\mathbf{P}^{-1}$  существуют, если координатные функции линейно независимы.

К уравнениям (10) присоединяем краевые условия (3) и начальные условия (4), тогда полученную задачу Коши решаем методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности. Шаг по времени выбирается по правилу Рунге.

Исследуем колебания шарнирно опертой по криволинейному кругу замкнутой цилиндрической оболочки с однородными граничными условиями (3) и нулевыми начальными условиями (4). Распишем эту процедуру более подробно. Для этого представим  $\varphi_{ij}$ ,  $\psi_{ij}$  из (5) в виде произведения двух функций, удовлетворяющих краевым условиям (3) по  $x$ , каждая из этих функций зависит только от одного аргумента:

$$w = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} A_{ij}(t) \sin(i\pi x) \cos(jy), \quad F = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} B_{ij}(t) \sin(i\pi x) \cos(jy). \quad (11)$$

Тогда с учетом выписанных интегралов система (10) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{rs} \left\{ \sum_{ij} \sum_{kl} \left[ J_{1,ijkl}^{rs} A_{ij} + I_{AB}^{rs} B_{rs} + I_Q^{rs} q(t) + A_{ij} B_{kl} I_{ijklrs} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{d^2 A_{ij}}{dt^2} + \varepsilon \frac{dA_{ij}}{dt} \right) I_{rs}^t \right] \right\} = 0, \\ \sum_{rs} \left\{ \sum_{ij} \sum_{kl} \left[ J_{2,ijkl}^{rs} B_{ij} + I_{AB}^{rs} A_{rs} + \frac{1}{2} A_{ij} A_{kl} I_{ijklrs} \right] \right\} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Изложенный выше алгоритм Бубнова–Галеркина позволяет решать широкий класс задач как статических, так и динамических. Решение статических задач возможно с помощью метода установления, впервые примененного для оболочек В. И. Феодосьевым [11]. Для решения статических задач теории пластин и оболочек традиционно применялись и применяются различные приближенные методы, позволяющие сводить систему уравнений в частных производных к системе нелинейных алгебраических уравнений, которая в дальнейшем каким-либо образом линеаризуется. В методе установления решение системы уравнений в частных производных сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений.

Кратко остановимся на преимуществах подобного подхода. С математической точки зрения, метод установления можно рассматривать как итерационный метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений, где каждый шаг по времени является новым приближением к точному решению задачи. И как любой итерационный метод, метод установления обладает высокой степенью точности. В то же время он лишен главного недостатка итерационных методов — большой чувствительности к выбору начального приближения. Еще одним преимуществом метода установления является простота получения неединственных решений статических задач. Действительно, задав разные начальные условия, можно получить различные значения искомых функций. Кроме того, при решении однородных систем традиционными методами, для получения нетривиального решения, в систему уравнений необходимо ввести какую-нибудь начальную неправомерность: либо малую поперечную нагрузку, либо малую кривизну, либо малый начальный прогиб [5, 7]. Внесение этих начальных несовершенств так или иначе сказывается на получающемся решении. При решении статических задач методом установления роль начальных несовершенств играют неоднородные начальные условия, а малые изменения начальных условий не влияют на получающееся статическое решение.

Данное замечание относится к решению задач статической устойчивости оболочечных систем при действии продольных нагрузок.

Решая задачу Коши при  $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$  для ряда значений параметра поперечной постоянной во времени нагрузки, получим для  $\{q_i\} \rightarrow \{w_i\}$ , что позволит построить зависимости  $q(w)$  и исследовать напряженно-деформированное состояние конструкции на всем интервале предполагаемых поперечных нагрузок.

Воспользуемся этим подходом для замкнутых цилиндрических оболочек. Рассмотрим случай приложения поперечного внешнего давления  $q(t) = q_0 = \text{const}$ , распределенного в пределах полосы с центральным углом  $\varphi_0 = \frac{3}{4}\pi$ ,  $0,1 \leq x \leq 0,5$ .

Исследуем поведение цилиндрической оболочки в зависимости от ширины полосы давления, т. е. от раствора полосы нагружения  $\varphi_0$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ) для линейных задач. Численные результаты сопоставим с аналитическими, полученными по методике [12]. Для этого в уравнениях (12) положим нелинейные члены, равными 0, т. е.  $I_{ijklrs} = 0$ . Используя такую упрощенную математическую модель, получаем, что для различных углов нагружения зависимости  $w_{\max}(q_0)$  носят линейный характер, т. е.  $y = kx$ , где  $y = \bar{w}$ ,  $x = \bar{q}_0$ . Таким образом, получаем  $y = \bar{w} / \bar{q}_0 x$ .

Аналитическое решение  $\frac{w}{qR/E}(\varphi)$  приводится к численному  $\bar{w} / \bar{q}(\varphi)$  с

использованием безразмерных параметров следующим образом:  $\bar{w} = \frac{w}{2h}$ ;

$$\bar{q} = \frac{L^2 R^2}{E(2h)^4 \bar{k}_y^2} q, \text{ тогда } \frac{\bar{w}}{\bar{q}} = \frac{w}{qR/E} \left( \frac{2h}{R} \right) \frac{1}{\lambda^2}.$$

На рис. 2 приведены зависимости  $\frac{w}{qR/E}(\varphi)$  (аналитическое решение) и  $\bar{w} / \bar{q}(\varphi_0)$  (численное решение), где  $\bar{w}$  и  $\bar{q}$  — безразмерные прогиб и нагрузка в центральной точке цилиндрической оболочки (0,5; 0,0). В табл. 1 сопоставлены численное и аналитическое решения для некоторых контрольных углов загрузки, а также приведены относительные погрешности результатов. Исходя из данных, приведенных на рис. 2, можно заключить, что результаты численного эксперимента для линейных задач практически совпадают с аналитическим решением, что позволяет судить о достоверности полученных данных. Относительная погрешность складывается из погрешности численных методов (метод обратной матрицы, метод Рунге — Кутты, метод установления) и погрешности вычислений. Таким образом, можно судить о полной достоверности результатов, полученных с использованием метода Бубнова — Галеркина в высших приближениях при решении систем дифференциальных уравнений для статических линейных задач.

Таблица 1

$\varphi_0$	Аналитическое решение $\frac{w}{qR/E}$	Численное решение $\bar{w} / \bar{q} \times \times (R/2h) \cdot \lambda^2$	Соотношение $\bar{w} / \bar{q}$	Погрешность, %
$2\pi$	50	52,8417	0,058713	5
$3\pi/2$	6,97	7,4808	0,008312	7
$\pi$	101,07	108,9054	0,121006	7
$2\pi/3$	-524,2	-744,2469	-0,826941	28
$\pi/2$	-479,47	-436,212	-0,48468	8
$\pi/4$	3886,27	3948,354	4,38706	1,5

Большое преимущество метода установления по сравнению с рядом других методов, в том числе и с методом Ньютона — Канторовича, отмечено в работах [5, 7].

Очень важным для нелинейных задач является вопрос о критиче-



ских нагрузках. Анализ существующих критериев потери устойчивости оболочек приведен в [13]. В настоящей работе под критической нагрузкой будем понимать предельные нагрузки или точку перегиба в зависимости  $w_{\max}(q)$  [9]. Проведем исследования критических нагрузок для замкнутой гибкой цилиндрической оболочки при действии локальных поперечных нагрузок (рис. 3) с  $\lambda = L/R = 3$ . По-

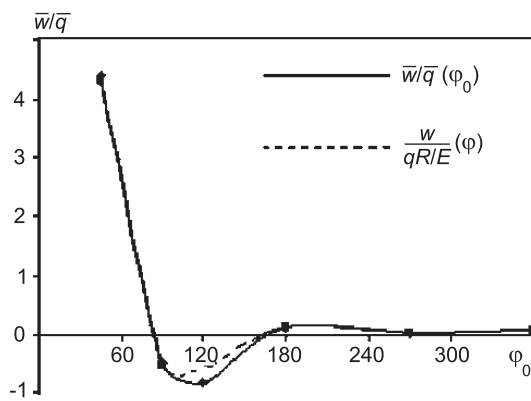


Рис. 2.

перечное внешнее давление  $q(t) = q_0 = \text{const}$  распределено в пределах полосы с центральным углом  $\phi_0 = \frac{3}{4}\pi$ ,  $0,1 \leq x \leq 0,5$  (см. рис. 3). В раз-

ложении (11) положим  $N_1 = N_2 = N$ . Рассмотрим зависимость максимального прогиба от амплитуды приложенной нагрузки в зависимости от приближения метода Бубнова — Галеркина (рис. 4). Здесь наблюдается практическая сходимость метода, с увеличением приближения погрешность вычисления уменьшается. Дальнейшее увеличение  $N$  ( $N > 11$ ) приводит к результатам, близким к результату при  $N = 11$ .

Проанализируем формы изгибания поверхности оболочки в различных приближениях в докритическом и закритическом состояниях (табл. 2).

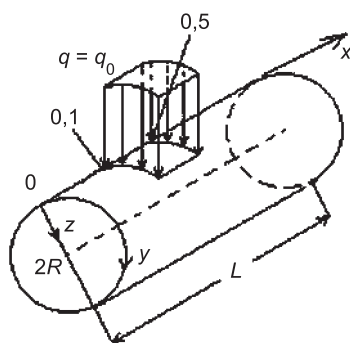


Рис. 3.

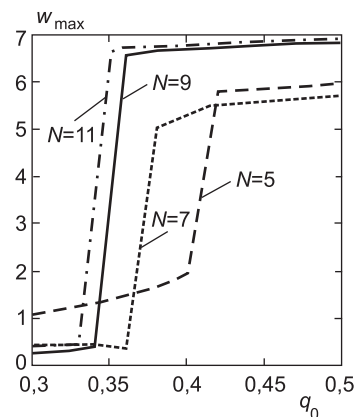


Рис. 4.

Таблица 2

	$N = 5$	$N = 7$	$N = 9$	$N = 11$
Докритическое состояние				
Закритическое состояние				

Анализ полученных форм показывает, что сходимость по формам изгиба в режиме установления сигнала достигается уже при  $N \geq 5$ , причем как в докритическом, так и в закритическом состоянии.

**Выводы.** 1. Сравнение результатов, полученных методом Бубнова — Галеркина в высших приближениях, с аналитическими решениями для оболочки в линейной постановке показывает хорошее совпадение, что дает возможность распространить метод Бубнова — Галеркина на решение более сложных нелинейных задач.

2. Анализ докритических и закритических состояний оболочки в нелинейной постановке при действии локальной нагрузки показывает, что сходимость состояний форм потери устойчивости достигается уже при  $N = 5$  как в докритических, так и в закритических состояниях оболочки.

3. При увеличении размеров площадки нагружения совпадение решений в разных приближениях достигается при меньших значениях  $N$  в (11).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоренко Я. М. Решение задач теории оболочек методами численного анализа/Я. М. Григоренко//Прикладная механика.— 1984.— Т. 20.— № 10.— С. 3–22.
2. Григоренко Я. М. Нелинейные задачи теории оболочек и методы их решения (обзор)/Я. М. Григоренко, В. И. Гуляев//Прикладная механика.— 1991.— Т. 27.— № 10.— С. 3–23.
3. Кубенко В. Д. Нелинейные задачи колебаний тонких оболочек (обзор)/В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук//Прикладная механика.— 1998.— Т. 34.— № 8.— С. 3–31.
4. Андреев Л. В. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации/Л. В. Андреев, Н. И. Ободан, А. Г. Лебедев.— М.: Наука, 1988.— 208 с.
5. Awrejcewicz J. Nonclassical Thermoelastic Problems in Nonlinear Dynamics of Shells / J. Awrejcewicz, V. A. Krysko.— Springer, 2003.— 403 p.
6. Awrejcewicz J. Nonlinear Dynamics of Continuous Elastic Systems/J. Awrejcewicz, V. A. Krysko, A. F. Vakakis.— Springer, 2004.— 341 p.
7. Awrejcewicz J. Thermo-Dynamics of Plates and Shells/J. Awrejcewicz, V. A. Krysko, A. V. Krysko.— Springer, 2007.— 777 p.
8. Крысько В. А. Статика и динамика замкнутых цилиндрических оболочек при неравномерном поперечном нагружении/В. А. Крысько, Н. Е. Савельева, К. Ф. Шагивалеев//Изв. вузов. Машиностроение.— 2005.— № 1.— С. 3–14.
9. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем/А. С. Вольмир.— М.: Наука, 1967.— 984 с.
10. Корнишин М. С. Гибкие пластины и панели/М. С. Корнишин, Ф. С. Исанбаева.— М.: Наука, 1968.— 260 с.
11. Феодосьев В. И. Об одном способе решения задач устойчивости деформируемых систем/В. И. Феодосьев//ПММ.— 1963.— Т. 27.— № 2.— С. 265–275.
12. Шагивалеев К. Ф. Расчет замкнутой цилиндрической оболочки по приближенной теории/К. Ф. Шагивалеев.— Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001.— 164 с.
13. Крысько В. А. Проблема бифуркаций и жесткой потери устойчивости нелинейной теории пластин/В. А. Крысько, А. В. Крысько//Механика оболочек и пластин в XXI в.: межвуз. науч. сб.— Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999.— С. 50–67.

© Крысько В. А., Савельева Н. Е., Шагивалеев К. Ф., 2008

Получено 17.04.08

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.55

**И. В. МОРЕВА**, канд. техн. наук, **В. В. МЕДЯНИК**, канд. техн. наук, доц. (Казанский государственный архитектурно-строительный университет);  
**Ю. А. СОКОЛОВА**, д-р техн. наук, проф., акад. РААСН (Государственная академия профессиональной переподготовки и повышения квалификации руководящих работников и специалистов инвестиционной сферы, г. Москва)

## К ВОПРОСУ О КОМПЛЕКСНОЙ АКТИВАЦИИ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Рассмотрены различные способы получения гипсового вяжущего в зависимости от технологии подготовки и введения модификаторов. Показано, что наиболее целесообразно добавлять в гипсовое сырье перед его обжигом предварительно измельченную рационально подобранную смесь минерального и химического модификатора. Это позволит повысить прочность и плотность гипсового камня, что обусловлено термической и механохимической активацией компонентов вяжущего.

Различного рода воздействия на частицы вяжущего способствуют повышению его реакционной способности и интенсификации последующих технологических процессов [1].

Как показывает анализ отечественного и зарубежного опыта, наиболее распространенным, доступным, экономически и технически целесообразным способом модификации структуры и свойств гипсовых материалов является механохимическая активация. При этом существенное влияние на свойства конечного продукта будет оказывать порядок введения химических и минеральных добавок [2]. Это предопределило цель выполненной работы — исследовать влияние способа совмещения наполнителя и суперпластификатора на структуру и свойства гипсовых композиций.

В качестве сырья для исследования использовались гипсовый камень фракции 0–5 мм (отходы и отсеvy дробления сырья) Камско-Устьинского месторождения Республики Татарстан (РТ), болотная железная руда (БЖР) Березовского месторождения РТ и карбонатсодержащая добавка (КСД) из шлама водоумягчения Казанской ТЭЦ-1. В качестве пластифицирующей добавки применялся суперпластификатор С-3 (ТУ 6-36-0204229-625) производства ОАО «Полипласт» (г. Ново-московск Тульской области).

Было рассмотрено четыре технологические схемы (способа) получения композиционного гипсового вяжущего, отличающиеся последовательностью совмещения компонентов (рис. 1).

Способ 1 предусматривал тепловую обработку (ТО) сырьевой смеси (гипсовый камень и минеральная добавка) до получения полугидрата сульфата кальция, его охлаждение до комнатной температуры и последующий помол до средней тонкости в присутствии суперпластификатора С-3.

По способу 2 гипсовый камень подвергали ТО до получения полугидрата сульфата кальция, затем охлаждали до комнатной температуры, размалывали до средней тонкости помола и перемешивали с предварительно измельченной до нулевого остатка на сите № 008 смесью минеральной добавки и суперпластификатора С-3.

Способ 3 предполагал перемешивание гипсового камня с предварительно размолотой до нулевого остатка смесью минеральной добавки и суперпластификатора С-3, ТО полученной сырьевой смеси до полугидрата сульфата кальция, его охлаждение до комнатной температуры и последующий помол до средней тонкости.

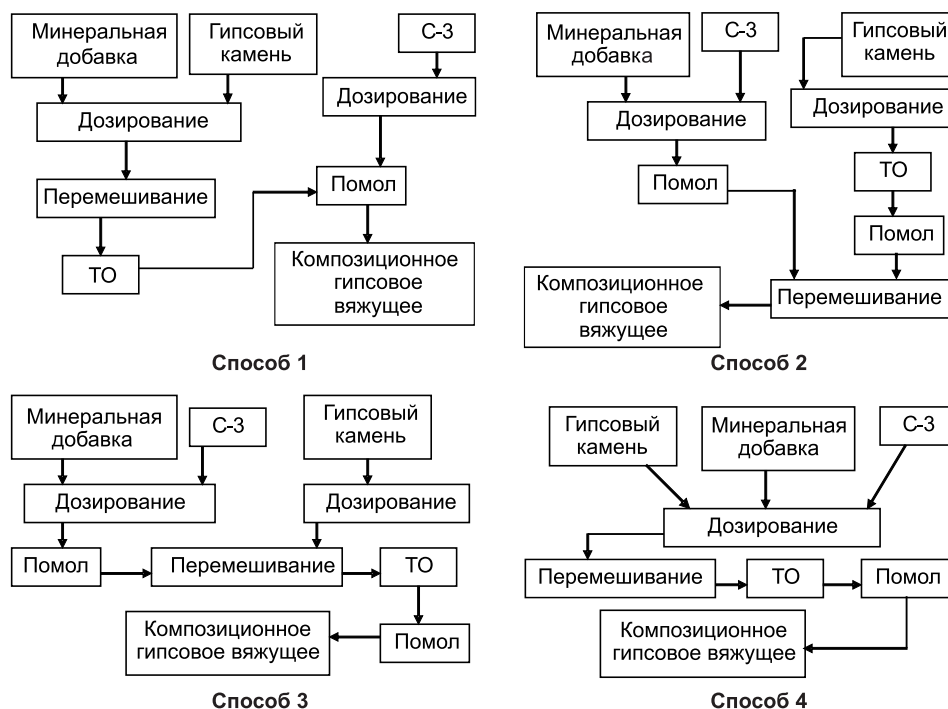


Рис. 1. Способы получения композиционного гипсового вяжущего в зависимости от порядка введения С-3

Способ 4 заключался в том, что сырьевая смесь, состоящая из гипсового камня, минеральной добавки и суперпластификатора С-3, подвергалась ТО до полугидрата сульфата кальция, охлаждалась до комнатной температуры с последующим помолом до средней тонкости.

В качестве контрольных были приняты свойства гипсового вяжущего, полученного тепловой обработкой гипсового камня (90%) и БЖР (10%), предварительно размолотой до нулевого остатка на сите № 008 (рис. 2).

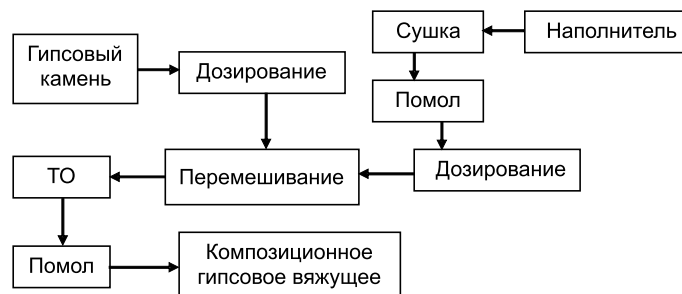


Рис. 2. Технологическая схема получения композиционного гипсового вяжущего, принятая в качестве контрольной

Физико-технические свойства полученных композиций в зависимости от способа их получения представлены на рис. 3. Их анализ показал, что суперпластификатор С-3 снижает водопотребность гипсового вяжущего на 7% и ускоряет его сроки схватывания, однако данные показатели свойств от способа введения химического модификатора не зависят. Существенное повышение прочности (на 40%) и плотности (на 16%) гипсового камня наблюдается при получении вяжущего по способу 3. Этому способствует комплексное воздействие на компоненты смеси термической и механохимической активации. Кроме того, рентгенографическое исследование образцов руды различной дисперсности, подвергавшихся ТО, показало, что степень ее окристаллизованности при более

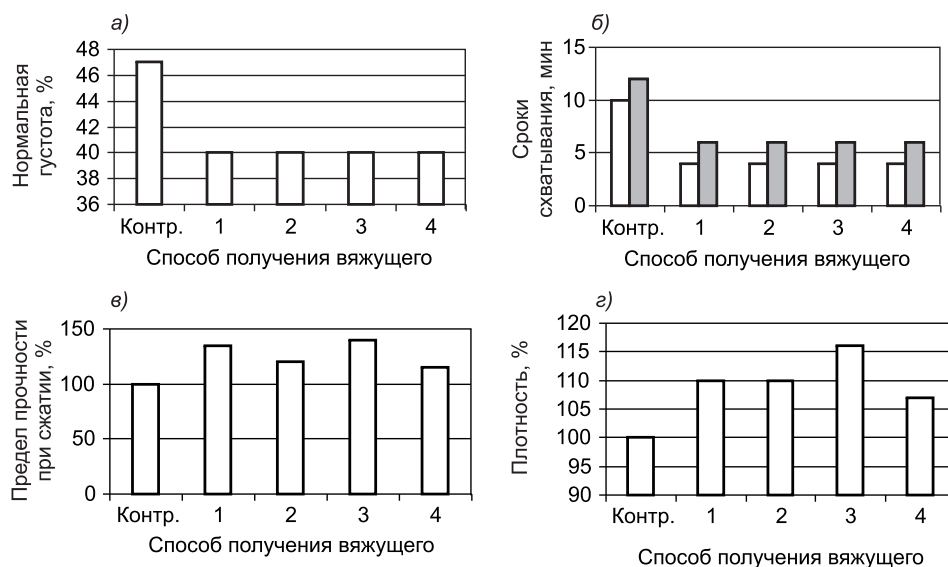


Рис. 3. Изменение водопотребности (а), сроков начала  $\square$  и конца  $\blacksquare$  схватывания (б), прочности (в) и плотности (г) гипсового камня в зависимости от способа получения вяжущего

тонком помоле выше, чем без предварительной механической активации (рис. 4).

Результаты исследований легли в основу способа получения гипсового вяжущего, позволившего замедлить сроки схватывания с одновременным повышением прочности [3]. Для его осуществления гипсовый камень

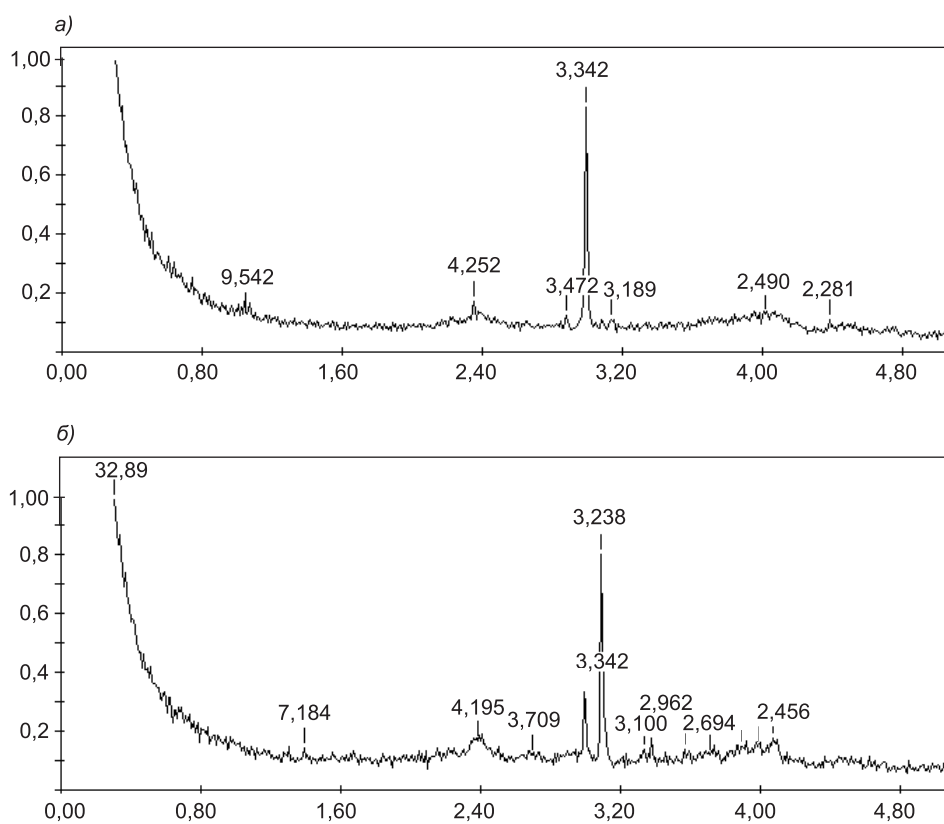


Рис. 4. Рентгенограмма болотной железной руды после ТО

а — без предварительного помола; б — при помоле до нулевого остатка на сите № 008

(85%) и добавка-модификатор (15%), представляющая собой механоактивированную в шаровой мельнице смесь карбонатсодержащей добавки (99–99,5%) и С-3 (0,5–1%), подвергались ТО до полугидрата сульфата кальция с последующим охлаждением и помолом до средней тонкости (ГОСТ 125-79). Разработанный способ позволил замедлить сроки схватывания гипсового вяжущего с 5 и 6 до 19 и 22 минут по началу и концу соответственно, повысить прочность гипсового камня на 38% по сравнению с вяжущим без добавки.

**Выводы.** Изучены различные способы получения гипсового вяжущего в зависимости от технологии подготовки и введения модификаторов. Установлено, что наиболее целесообразно добавлять в гипсовое сырье перед его обжигом предварительно измельченную рационально подобранную смесь минерального и химического модификатора.

Улучшение свойств гипсовых композиций обусловлено комплексным воздействием, включающим как термическую, так и механохимическую активацию их компонентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбьев И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ (искусственные строительные конгломераты): Учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1978. — 309 с.
2. Калашников В. И. Реологическая активация смешанного вяжущего добавками в зависимости от процедуры их введения / В. И. Калашников, В. С. Демьянова, Н. М. Дубошина // Изв. вузов. Строительство. — 1997. — № 12. — С. 52–54.
3. Пат. РФ. № 2290373 С 04 В11/024. Способ получения гипсового вяжущего / Ю. А. Соколова, И. В. Морева, В. В. Медяник и др. — Опубл. 27.12.06; Бюл. № 36.

© Морева И. В., Медяник В. В., Соколова Ю. А., 2008

Получено 11.01.08

**УДК 691.43–431:666.31**

**В. А. ГУРЬЕВА**, канд. техн. наук, доц. (Оренбургский государственный университет)

### **ПРИМЕНЕНИЕ СИЛИКАТСОДЕРЖАЩИХ ПОПУТНЫХ ПРОДУКТОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИКИ**

Исследована возможность применения пиррофиллитового техногенного сырья в производстве строительной керамики с учетом особенностей химико-минералогического состава. Установлено, что применение данного вида силикатного сырья в низкотемпературной керамике позволяет снизить компонентность плиточных масс, улучшает свойства изделий после обжига.

Перед промышленностью строительных материалов поставлены задачи по разработке, развитию и внедрению ресурсо- и энергосберегающих технологий. В связи с этим одной из важнейших задач развития промышленности строительной керамики является расширение ее сырьевой базы, в том числе за счет привлечения нетрадиционного силикатсодержащего техногенного сырья.

В производстве керамических изделий, в формировании их структуры особое значение имеют разнообразные по свойствам силикаты и гидросиликаты. К ним относятся такие горные породы, как тальк, пиррофиллит — водные силикаты, входящие в единый класс слоистых силикатов.



Они применяются в различных отраслях строительных материалов и как огнеупорное сырье в производстве высокотемпературной керамики.

На территории нашей страны наряду с месторождениями кондиционного пиррофиллита (Березовское месторождение, которое разрабатывается с целью использования его в производстве специальных огнеупоров, защитных покрытий для них и т.д., огнеупорность составляет 1580–1650°C, температура плавления 1680–1720°C [1]) открыты также месторождения пиррофиллита на Урале, Дальнем Востоке, на юге Сибири. Однако в них пиррофиллит залегает преимущественно в околорудных метасоматитах и добывается горно-обогатительными комбинатами как попутный продукт, складирываясь затем в отвалах и отрицательно влияя на экологическую ситуацию регионов. В описании данных месторождений используется термин «пиррофиллитовое сырье», указывая на полиминеральный состав техногенного сырья и его отличие в свойствах от кондиционного огнеупорного пиррофиллита.

В работе с целью расширения базы местного силикатного сырья для керамической промышленности, утилизации попутных продуктов горнодобывающих комбинатов исследовалось пиррофиллитсодержащее техногенное сырье Гайского горно-обогатительного комбината (южный Урал) с целью применения его в качестве полифункционального компонента керамической массы для конвейерной технологии плиток. Данное сырье на этапе формования выполняет функцию отошителя, на этапе обжига — плавня, способствующего спеканию при скоростных режимах сушки и обжига. Предварительно проведенный анализ составов пиррофиллитсодержащих отвалов Гайского ГОКа позволил разбить попутно добываемое сырье на несколько групп. Наибольший технологический интерес для производства изделий строительной керамики из них представляла пиррофиллит-серицит-кварцевая минеральная ассоциация.

На первом этапе исследований изучались особенности химического и минералогического составов отобранных под руководством геологов проб с отвалов комбината.

Как видно из таблицы, данная разновидность силикатсодержащего техногенного сырья характеризуется относительно низким в сравнении с кондиционным пиррофиллитом содержанием глинозема и средним уровнем содержания кварца. Это позволяет предположить относительно низкую огнеупорность техногенного продукта в отличие от высококачественного пиррофиллита, который применяется в производстве огнеупорной керамики.

**Химический состав пиррофиллитсодержащего техногенного сырья**

Название силикатной породы	Содержание оксидов, %						
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	MgO	ΣR <sub>2</sub> O	П.п.п.
Пиррофиллитсодержащие метасоматиты	73,91– 7,21	0,47– 0,56	12,07– 18,72	0,46– 3,56	0,03– 0,80	2,06– 3,63	2,84– 3,81

Снижению огнеупорности исследуемых алюмосиликатных попутных продуктов способствует также содержание оксидов железа, магния, натрия и калия, повышенное содержание титана, связанное с присутствием рутила.

По результатам петрографического анализа основной базис исследуемых попутных продуктов представлен чешуйчатыми агрегатами пиррофиллита, имеющими плотное сложение (содержание в породе 35–60%). На фоне чешуйчатых агрегатов пиррофиллита выделяются включения кварцитов линзовидной формы до 10%. Кварциты характеризуются наличием агрегатов слюды разной формы и редких секущих мелкочешуйчатых прожилок светло-серого пиррофиллита. Наличие слюды идентифицирова-

но по реакции окрашивания на калий под воздействием химических реагентов. Общее количество слюды в породе, которая представлена в виде разновидности мусковита, серицита, 10–23%. В разрезе массива преобладают пиррофиллиты темно-серого цвета с однородной сланцеватой структурой. Разница в цвете обусловлена наличием микропримесей. Более светлая окраска наблюдается на участках развития каолинита, количество которого не превышает 5%. Повсеместно в микроочаговом агрегате рассеяны одиночные зерна рутила до 2%. Минералогический состав основного базиса исследуемых попутных продуктов представлен, мас. %: пиррофиллит — 53; серицит — 30; кварц — 10; каолинит — 5; рутил — 2.

Методом ИК-спектроскопии в исследуемой пиррофиллит-серицит-кварцевой минеральной ассоциации установлены наиболее интенсивные полосы поглощения пиррофиллита — 1020, 970, 860  $\text{см}^{-1}$ , вызванные колебаниями связи  $\text{Si} = \text{O}$  в тетраэдре  $\text{SiO}_4$  и сильной широкой полосой в области деформационных колебаний  $\text{Si} = \text{O}$  500–300  $\text{см}^{-1}$ . Сравнение полученных результатов с мономинеральным огнеупорным пиррофиллитом Березовского месторождения

(рис. 1) указывает на то, что процессы деструкции техногенного сырья при термическом воздействии происходят на 70–100°C ниже. Это связано с изоморфным замещением части ионов  $\text{Si}^{4+}$  ионами  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$

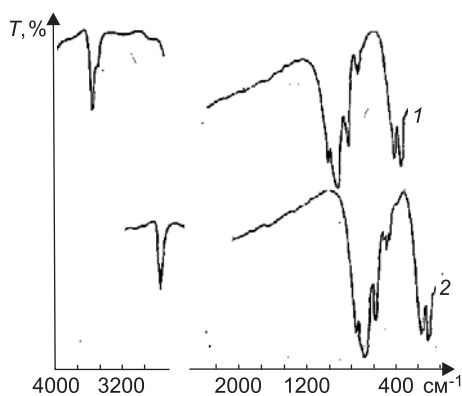


Рис. 1. ИК-спектр

1 — пиррофиллит для производства огнеупоров;  
2 — пиррофиллитовое техногенное сырье Гайского ГОКа

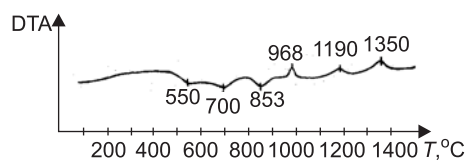


Рис. 2. ДТА пиррофиллитового техногенного сырья

на  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , присутствием в составе сырья дополнительно катионов  $\text{K}^{1+}$ ,  $\text{Na}^{1+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , а также молекул воды. Данные результаты подтверждаются химическим анализом (см. таблицу).

При термических исследованиях пиррофиллитового техногенного сырья (рис. 2) на кривой ДТА при нагревании в интервале температур 500–900°C регистрируются эндотермические эффекты с минимумами при 550, 700 и 853°C. Они свидетельствуют о процессах дегидратации в породе, связанных с разрывом гидроксильных групп в структуре каолинита, пиррофиллита и серицита, переходом  $-\text{SiO}_4$  в  $-\text{SiO}_4$ , и перестройке ее решетки. Регистрируемые эндоэффекты монофракций характерны для данных горных пород [2, 3], а небольшое смещение температурных интервалов связано с разной силой связи гидроксильных групп и со степенью совершенства структуры исследованного пиррофиллитового сырья. Экзотермический эффект с максимумом при 982°C обусловлен кристаллизацией фаз первичного муллита из каолинита, который характеризуется несовершенной структурой. Об этом свидетельствует слабый экзотермический эффект, что согласуется с [3–5]. При дальнейшем подъеме температуры появляются два экзотермических эффекта вследствие дальнейшей кристаллизации муллита при 1190°C и кристобалита при 1350°C из продуктов разложения пиррофиллита. Данные процессы минералообразо-

вания подтверждают и результаты рентгеноструктурного анализа пирофиллита. При подъеме температуры до 1100°C на дифрактограмме появляются линии, принадлежащие муллиту (5,4; 3,42; 2,96 Å и др.), и слабые линии низкотемпературной модификации  $\alpha$ -кristобалита (4,03; 3,88; 3,0 Å и др.). Интенсивность дифракционных пиков несколько усиливается при дальнейшем повышении температуры до 1200°C.

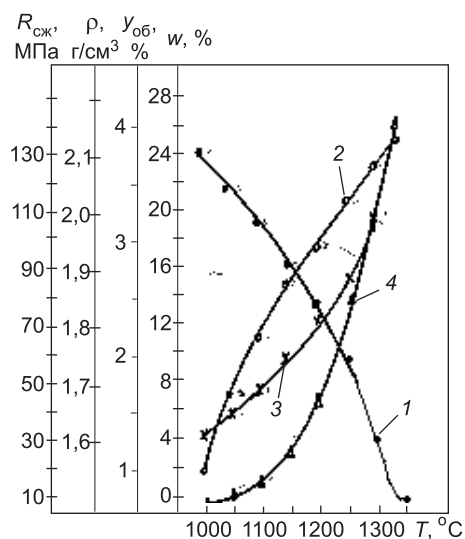
Изучение обжиговых свойств пирофиллитсодержащих пород показало, что открытая пористость структуры сохраняется вплоть до 1000–1050°C, о чем свидетельствует водопоглощение более 16% и средняя плотность порядка 1,7 г/см<sup>3</sup> (рис. 3). Однако при дальнейшем увеличении температуры отмечается начало интенсивного процесса спекания, что сопровождается снижением водопоглощения, ростом прочности и плотности. Общая усадка образцов фиксируется начиная с 1000°C и выше и составляет 0,9 до 3,8%. В интервале температур 700–1000°C наблюдается обратный процесс — увеличение линейных и объемных размеров образцов и постепенное уменьшение прироста с +3,0 до 0,0%. Предел прочности при сжатии при температуре обжига 1300°C соответствует аналогичному показателю полуфарфора (120 и более МПа). Огнеупорность пирофиллитового техногенного сырья — 1300–1350°C по показаниям стандартных пироскопов.

Таким образом, проведенные на первом этапе исследования петрографии, минералогии и обжиговых свойств пирофиллитового техногенного сырья позволили установить возможность применения их в производстве низкообжиговых строительных изделий в качестве активного компонента керамической шихты. Поэтому на втором этапе разрабатывались составы масс на базе пирофиллитовых метасоматитов Гайского ГОКа Оренбургской области, обжигаемые по скоростным режимам в условиях щелевой роликовой печи. Шихта для строительной майолики (различные виды декоративно-отделочных плиток) должна содержать 50–60% глинистых материалов, 40–50% отощающих материалов и плавней [5]. При планировании и проведении эксперимента были использованы матрицы многофакторного эксперимента (2- и 3-факторные). При этом изменялась доля глинистого вещества, доля силикатсодержащих пирофиллитовых хвостов и температура обжига массы. В качестве глинистого компонента использовалась глина Кумакского месторождения Оренбургской области, так как данный вид глины является базовым в производстве плиточного цеха Гайского ГОКа и относится к местным. В результате обработки экспериментальных данных были определены коэффициенты уравнений регрессии и построены графики, анализ которых позволил разработать массы для проведения промышленных испытаний в условиях плиточного цеха состава, мас. %: кумакская глина 45–60, пирофиллитсодержащее сырье 35–45%, стеклобой 5–10%.

Помол сырьевых компонентов, их смешивание, обезвоживание шликера и приготовление пресс-порошка осуществляли по стандартной технологии в лаборатории завода при участии представителей тех-

Рис. 3. Свойства пирофиллитсодержащего сырья после обжига

1 — водопоглощение, %; 2 — общая усадка, %; 3 — средняя плотность, г/см<sup>3</sup>; 4 — прочность при сжатии, МПа



нологической службы завода. Пирофиллитовые попутные продукты предварительно подвергали грубому дроблению на щековой дробилке до крупности не более 10 мм. Прессование плиток, уфельный обжиг (1050–1070°C), глазурование и политой обжиг (950–970°C) производился в плиточном цехе Гайского ГОКа на поточно-конвейерной линии по режимам, принятым в технологии завода. Физико-механические свойства плиток соответствовали требованиям ГОСТа 6141-91. На плитках опытного состава отмечалось снижение общей усадки до 0,8–1,2%. В то же время общая усадка изделий из заводской массы составляла 3,4–3,6%. Калиевая слюда серицит, содержащаяся в пирофиллитовой породе, характеризуется относительно низкой эвтектикой плавления [1] и в комплексе с эффективным плавнем искусственного происхождения стеклобоек интенсифицирует процесс спекания пирофиллита за счет увеличения количества жидкой фазы.

**Выводы.** Применение пирофиллитсодержащего техногенного сырья для строительной керамики технологически и экономически целесообразно по следующим факторам. 1. Добыча пирофиллитового сырья не требует дополнительных капитальных вложений на разведку и разработку месторождений. Оно извлекается из недр попутно с добычей руды в виде щебня, песка, что снижает его себестоимость.

2. Химический и минеральный состав пирофиллитсодержащих попутных продуктов позволяет применить их как нетрадиционное полифункциональное сырье в строительной керамике, а не только как щебень для отсыпки дорог, в производстве бетона.

3. В условиях пирогенного синтеза пирофиллитовое силикатное сырье позволяет уменьшить количество специально вводимых плавней в шихте или вообще от них отказаться, снизить компонентность масс для изделий декоративной керамики с 7–8 наименований до 3–4, получить изделия с минимальными усадочными деформациями.

4. Использование пирофиллитового техногенного сырья в ассоциации с другими минералами позволит повысить комплексность использования недр и улучшить состояние окружающей среды на территории влияния горнопромышленных комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торопов Н. А. Кристаллография и минералогия / Н. А. Торопов, Л. Н. Булак. — Л.: Стройиздат, 1972. — 503 с.
2. Удачин В. Н. Пирофиллитсодержащие метасоматиты Гайского медно-колчеданного месторождения (геология, минералогия, технология) / В. Н. Удачин. — Екатеринбург: УрО АН РФ, 2000. — 58 с.
3. Иванова В. П. Термический анализ минералов и горных пород / В. П. Иванова, Б. К. Касатов, Т. Н. Красавина и др. — Л.: Недра, 1974. — 399 с.
4. Гурьева В. А. Физико-химические исследования использования дунитов в декоративно-отделочной керамике / В. А. Гурьева. — Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2007. — 129 с.
5. Круглицкий Н. Н. Искусственные силикаты / Н. Н. Круглицкий, Б. И. Мороз. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.

© Гурьева В. А., 2008

Получено после доработки 22.04.08

В. И. ЛОГАНИНА, д-р техн. наук, проф., Н. А. ПЕТУХОВА, асп. (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

### МОДИФИКАЦИЯ РЕЦЕПТУРЫ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО КРАСОЧНОГО СОСТАВА ДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ОРГАНОГЛИНЫ

Приведены результаты исследований влияния органоглины на свойства полистирольных красок и покрытий на его основе.

Одним из перспективных направлений в науке о материаловедении является получение материалов с комплексом заданных свойств, что достигается применением нанотехнологий.

В случае полимерных нанокомпозитов в полимерную матрицу вводят вещества, состоящие из наночастиц. Роль таких веществ может выполнять органоглина, полученная модификацией монтмориллонитовых глин органической добавкой. Монтмориллонитовая глина имеет слоистую структуру, размер слоев составляет порядка 200 нм в длину и 1 нм в ширину. Неорганические катионы внутри прослоек могут быть замещены неионными ПАВ, которые связаны с поверхностью глин водородными связями. При введении органоминеральной добавки в полимерную матрицу происходит расшелушивание слоев глины и образование очень дисперсных частиц [1].

При разработке рецептуры органоминеральной добавки нами применялись монтмориллонитовая глина Пензенского региона (месторождение Лягушевское) удельной поверхности  $S_{уд} = 4782,7 \text{ см}^2/\text{г}$ . В качестве органической добавки использовали продукт взаимодействия алкилфенолов с окисью этилена — эмульгатор ОП-4. Концентрацию добавки ОП-4 определяли по изменению поверхностного натяжения раствора. Установлено, что величина адсорбции добавки ОП-4 на глине составляет  $0,00038 \text{ г}/\text{см}^2$ . Разработанная нами органоминеральная добавка является аналогом отечественного органобентонита и зарубежных бентонов.

Предложено использовать органоминеральную добавку при разработке рецептуры полистирольного красочного состава. Красочный состав изготовлялся на основе 10%-го полистирольного лака. Для получения лака применялся ударопрочный полистирол марки УПМ-0508-08 (ГОСТ 28250-89), в качестве растворителя — сольвент каменноугольной марки Б (ГОСТ 1928-79). При разработке рецептуры краски часть пигмента заменялась наполнителем — микродоломитом марки МД-10 и отуасарb марки 5VA.

Диспергирование органоглины в полимерной матрице способствует изменению степени перетира красок. Степень перетира полистирольных красок в соответствии с ТУ У В. 2.7-05761614.028-2000 должна быть не более 50 мкм. Степень перетира краски определялась по прибору «Клин» по ГОСТу 6589-57 «Методы испытаний. Определение степени перетира красок методом «Клина». Установлено, что контрольный состав (без органоглины) достигает степени перетира 52 мкм через 20 мин перетирания, в то время как введение органоглины снижает время перетирания пигмента до 5–7 мин при получении той же степени перетира. Введение в рецептуру краски отечественного органобентонита также приводит к снижению времени на перетирание пигмента по сравнению с контрольным и составляет 10 мин (рис. 1).

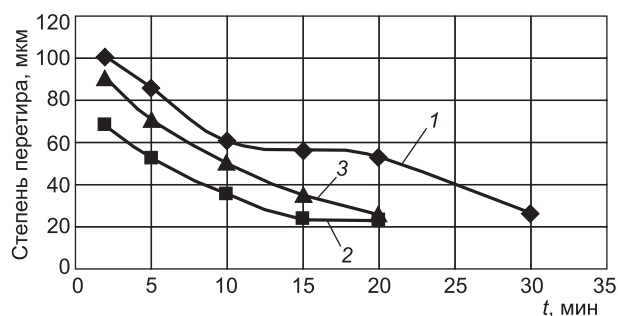


Рис. 1. Зависимость степени перетира от времени  
1 — контрольный (без добавок); 2 — с органоглиной; 3 — с органо-  
бентонитом

Таблица 1  
Условная вязкость  
лаковых растворов

№ п/п	Составы	Условная вязкость , с
1	Контрольный	8,27
2	ОП-4 глина	8,51
3	ОП-11 глина	8,53

Сокращение времени перетира краски с органоглиной существенно

влияет на энергозатраты при производстве краски и, следовательно, способствует снижению себестоимости готовых красок.

Введение модифицированной глины приводит к изменению реологических свойств лаковых растворов. Значения вязкости составов с органоглиной выше, чем у контрольного состава (без органоглины) (табл. 1).

Было установлено, что при введении органоглины наблюдается увеличение значений критической объемной концентрации пигмента (КОКП). Так, значения КОКП (пигмент  $\text{TiO}_2$ ) составляет соответственно 0,081 (контрольный состав), 0,091–0,095 (с органоглиной). Аналогичные закономерности наблюдаются и при введении других пигментов (табл. 2).

Таблица 2  
Значения критической объемной концентрации пигментов

№ п/п	Составы	КОКП			
		$\text{TiO}_2$	Охра	Сурик железный	Оксид хрома
1	Контрольный	0,081	0,068	0,083	0,054
2	С органоглиной, модифицированной ОП-4	0,091	0,067	0,093	0,063
3	С органоглиной, модифицированной ОП-11	0,095	0,076	0,096	0,068

Установлено, что введение в рецептуру полистирольной краски предлагаемой органоглины приводит к значительному снижению укрывистости краски с 160 до 112 г/м<sup>2</sup> (табл. 3).

Дополнительным подтверждением более дисперсной структуры являются полученные нами экспериментальные данные насыщенности цвета покрытий. Для оценки характеристик цвета покрытий была применена методика, заключающаяся в сканировании окрашенной поверхности и последующей работе с изображением [3]. Сканирование образцов производилось в режиме цветного фото с разрешением 300dpi. Для описания цвета была использована цветовая модель HSV (H — цветовой тон, S —

Таблица 3  
Укрывистость лакокрасочных  
покрытий

№ п/п	Органо- глина, %	Наполнитель, %		Укры- вистость, г/м <sup>2</sup>
		МД-10	отуасcarb	
Контр.	—	—	—	160
1	2	—	5	110
2	2	—	—	112
3	2	5	—	142

Таблица 4  
Насыщенность лакокрасочных  
покрытий

№ п/п	Органо- глина, %	Наполнитель, %		Насы- щенность цвета
		МД-10	отуасcarb	
Контр.	—	—	—	0,875
1	2	—	5	0,903
2	2	—	—	0,906
3	2	5	—	0,889



насыщенность,  $V$  — яркость). При такой модели насыщенность изменяется от 0 до 1. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Анализ данных, приведенных в табл. 4, свидетельствует, что применение органоминеральной добавки приводит к увеличению насыщенности цвета с 0,875 до 0,906.

Введение органоглины в рецептуру полистирольной краски изменяет кинетику отверждения покрытий (рис. 2).

Формирование полимерных покрытий протекает в несколько стадий [2]. На первой стадии формирования покрытия наблюдается интенсивное испарение растворителя, приводящее к резкому уменьшению массы полимерного покрытия. Введение органоминеральной добавки и органобентонита приводит к более постоянной скорости испарения растворителя. В первые минуты отверждения полимерного покрытия потеря растворителя составила 30,56% для контрольного состава (без добавки) и 18,75–22,86% для покрытий с органоглиной и органобентонитом соответственно. Это объясняется, на наш взгляд, более плотной упаковкой пигмента в структуре вследствие его большей дисперсности. На последней стадии пленкообразования возникает сцепление полимерного покрытия с подложкой, что приводит к ориентации структурных элементов полимера и возникновению в покрытии внутренних напряжений.

Изменение скорости испарения растворителя приводит к увеличению времени высыхания покрытий (табл. 5).

Таблица 5  
**Время высыхания лакокрасочных составов**

Время высыхания, мин, до степени	Составы	
	контрольный	с органоглиной
1	9	10
2	15	34
3	18,2	35,5
5	19,8	39,5

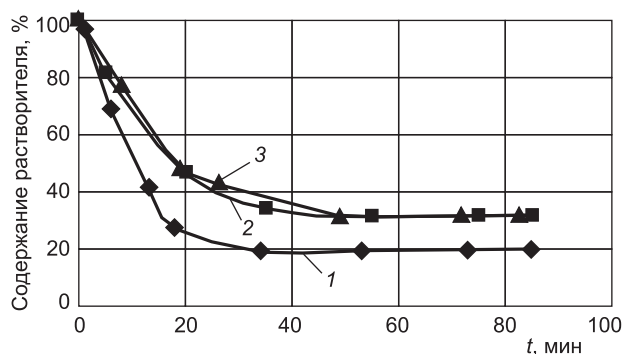


Рис. 2. Кинетика испарения растворителя

Усл. обозн. см. на рис. 1

Выявлено, что время высыхания покрытий до степени 3 на основе контрольного состава (без добавки) составляет 18 мин, в то время как с органоглиной — 36 мин.

Приведенные выше результаты исследования показывают, что введение в рецептуру краски разработанной органоглины способствует появлению более дисперсных частиц в системе и приводит к достижению более улучшенных свойств краски и покрытий на ее основе, что в целом будет способствовать увеличению межремонтного срока службы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микитаев А. К. Нанокompозитные полимерные материалы на основе органоглин/А. К. Микитаев, А. А. Каладжян, О. Б. Леднев и др. // Пластические массы. — 2004. — № 12. — С. 45–50.
2. Яковлев А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий/А. Д. Яковлев. — Л.: Химия, 1981. — 252 с.
3. Логанина В. И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий/В. И. Логанина, В. А. Смирнов, С. Н. Кислицына и др. // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2004. — № 8. — С. 10–12.

© Логанина В. И., Петухова Н. А., 2008

Получено 17.04.08

А. Д. ЕГОРОВА, канд. техн. наук, доц., В. В. НАРОДОВ, асп., А. Е. МЕСТНИКОВ, д-р техн. наук, проф. (Якутский государственный университет)

## РАСТВОРНЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТОВ, ТВЕРДЕЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Приведены результаты исследования растворных смесей на основе расширяющихся цементов из местного сырья, твердеющих в условиях вечной мерзлоты. Основными компонентами расширяющихся добавок являются горелые породы, цеолитсодержащие породы и гипсовое вяжущее. Разработаны составы композиционных вяжущих для тампонажных и грунтовых растворов, эксплуатируемых в условиях вечномерзлых грунтов. Получены, апробированы и рекомендованы к применению составы тампонажного материала для низкотемпературных скважин и грунтового раствора для замоноличивания свайных фундаментов.

Высокоэффективные вяжущие вещества, получаемые механохимической активацией, представляют практический интерес особенно при поставке материалов в отдаленные районы только в период навигации. В целях снижения потери активности цемента во времени целесообразно завозить цементный клинкер с его помолом в районе строительства.

Перспективный вид расширяющихся цементов — вяжущее на основе портландцемента и расширяющей добавки (РД). Установлена широкая номенклатура РД к цементу. Наиболее эффективны расширяющие добавки на основе глиноземистого клинкера и боксита. Однако эти добавки дорогостоящие, боксит как сырье дефицитен. Поэтому широкое практическое применение получили добавки на основе алунита и алунитизированной породы. Использование этих добавок эффективно в районах, где имеются такие породы.

Наиболее дешевым и доступным сырьем для получения РД являются глина, известняк, горелые породы и др. Эффективность этих расширяющих добавок несколько ниже, чем вышеуказанных, но они вполне пригодны для получения безусадочных и расширяющихся водонепроницаемых растворов и бетонов. При одном и том же расходе вяжущего введение РД в состав бетона значительно увеличивает прочность при сжатии и при изгибе, а также повышает морозостойкость и водонепроницаемость.

В настоящее время в ЯкутПНИИС совместно с НИИЖБ разработан состав расширяющей добавки [1]. Эта добавка представляет собой смесь тонкомолотой слюды и диопсида АО «Алданслюда» с гипсом. Расширяющую добавку получают механическим перемешиванием тонкодисперсных составляющих в определенных пропорциях, исключив предварительную обработку с целью химической активации компонентов. Серийное производство расширяющей добавки на основе молотой слюды АО «Алданслюда» уже организовано, но она выпускается малыми партиями. Поиск других сырьевых материалов для получения РД отсутствует. Проведение исследований по получению растворных смесей с применением расширяющей добавки на основе гипса и горелой породы является актуальным вопросом.

Месторождение горелых пород «Кюнкюй» находится на территории Горного улуса Республики Саха (Якутия). Месторождение расположено в зоне многолетнемерзлых пород. Средняя плотность горелых пород составляет 1610–2060 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность — 2610–2750 кг/м<sup>3</sup>, пористость от 19,01 до 41,45%, водопоглощение по массе от 5,09 до 23,18%. Колебание свойств горелых пород объясняется различной степенью при-

родного обжига. Химический состав горелых пород был исследован в химической лаборатории ГУП РС(Я) «Центргеоаналитик», %:  $\text{SiO}_2$  — 65,05–71,41;  $\text{TiO}$  — 0,77–1,19;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 16,62–24,80;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 6,06–1,00;  $\text{MgO}$  — 1,80–0,10;  $\text{CaO}$  — 2,45–0,51;  $\text{K}_2\text{O}$  — 2,92–0,84;  $\text{Na}_2\text{O}$  — 3,16–0,13;  $\text{SO}_3$ , общ — 0,25–0,65;  $\text{CO}_2$  < 0,20; п.п.п. — 0,40–0,58.

Для оптимизации исследования было использовано математическое планирование по плану полнофакторного эксперимента с 9 опытами (ПФЭ  $3^3$ ). За переменные факторы приняты:  $x_1$  — содержание расширяющей добавки в цементе, состоящей из гипсового вяжущего и молотой горелой породы, %;  $x_2$  — содержание горелой породы в добавке, %. Границы варьирования указаны в таблице.

Натуральные значения переменных

Наименование	Обозначение	Переменные	
		$x_1$	$x_2$
Основной уровень	0	15	50
Интервал варьирования		5	10
Верхний уровень	+1	20	60
Нижний уровень	-1	10	40

Испытания проводились согласно ГОСТу 11052-74 «Цемент гипсоглиноземистый расширяющийся». При этом определялись следующие свойства вяжущего вещества:  $Y_1$  — нормальная густота цементного теста, %;  $Y_2$  — начало схватывания, мин;  $Y_3$  — конец схватывания, мин;  $Y_4$  — линейное расширение в возрасте 3 сут, %;  $Y_5$  — линейное расширение в возрасте 28 сут, %;  $Y_6$  — прочность при сжатии, МПа.

По результатам исследований представлены математические уравнения на базе полнофакторного эксперимента:

$$Y_1 = 22,76 + 0,168x_1^2 + 0,103x_2^2 + 0,958x_1 + 0,963x_2 + 0,2825x_1x_2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 53,33 - 5x_1^2 - 5x_2^2 + 20x_2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 83,88 + 9,167x_1^2 + 1,67x_2^2 - 5,83x_1 + 43,3x_2 - 2,5x_1x_2; \quad (3)$$

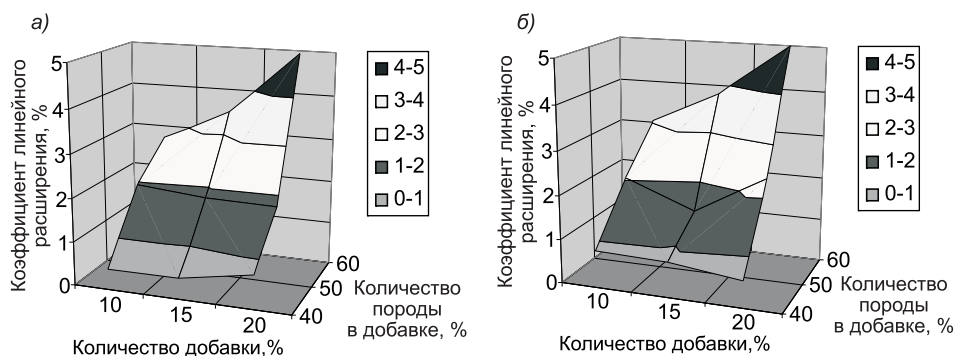
$$Y_4 = 1,721 + 0,189x_1^2 + 0,292x_2^2 + 0,391x_1 + 1,559x_2 + 0,48x_1x_2; \quad (4)$$

$$Y_5 = 1,733 + 0,315x_1^2 + 0,424x_2^2 + 0,353x_1 + 1,616x_2 + 0,576x_1x_2; \quad (5)$$

$$Y_6 = 35,41 + 2,95x_1^2 - 1,27x_2^2 - 2,44x_1 + 1,26x_2 - 0,23x_1x_2. \quad (6)$$

По полученным уравнениям были построены поверхности отклика. На рисунке приведены зависимости линейного расширения образцов в возрасте 3 и 28 сут от состава расширяющегося вяжущего.

При анализе полученных данных было выявлено, что увеличение количества расширяющей добавки заметно снижает сроки начала схватывания вяжущего. Также можно сделать вывод, что увеличение содержания горелой породы в добавке замедляет сроки схватывания вяжущего.



Поверхности отклика линейного расширения образцов в возрасте 3 (а) и 28 (б) сут от состава расширяющегося вяжущего

Наибольшая продолжительность начала и конца схватывания вяжущего наблюдается в случае содержания расширяющей добавки в количестве 10%, а горелой породы в ней 60%. Замена портландцемента ПЦ400-ДО расширяющей добавкой до 20% на основе горелой породы и строительного гипса практически не ведет к снижению активности вяжущего. Введение в состав портландцемента расширяющей добавки на основе горелой породы и гипса незначительно влияет на нормальную густоту цементного теста.

Оптимальное расширение цементов происходит при добавлении расширяющей добавки в количестве 10–20% с содержанием горелой породы до 45%.

На основе разработанных вяжущих были получены составы тампонажных цементов, соответствующих требованиям ГОСТа1581-96 «Портландцементы тампонажные. Технические условия».

С другой стороны, в РС(Я) при устройстве буроопускных свай в скважину заливают цементно-песчаный раствор. В пособии к СНиП 3.02.01-83 указана марка раствора — М100 и выше. В Якутии вечномёрзлые грунты (ВМГ) оснований имеют в среднем температуру  $-3^{\circ}\text{C}$  на глубине 10 м, т.е. являются низкотемпературными. Известно, что бетоны марок М100, М200 и 300, уложенные в ВМГ с температурой не ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ , набирают прочность 15–20% от  $R_{28}$  за месяц и 35–40%  $R_{28}$  за 6 мес. Таким образом, в низкотемпературных ВМГ песчано-цементный раствор набирает 40% марочной прочности за 6 мес.

Применение противоморозных химических добавок в песчано-цементном растворе недопустимо из-за возможной миграции солей в ВМГ, следствием этого явится понижение температуры замерзания грунтов.

Таким образом, для повышения несущей способности буроопускных свай в ВМГ следует увеличить прочность смерзания грунтового раствора со сваей. Применение в низкотемпературных грунтах цементно-песчаного раствора не эффективно. Грунтовый раствор для буроопускных свай, устраиваемых в твердомерзлых грунтах, должен отвечать следующим требованиям: быть экономичным; отепляющее воздействие на окружающие грунты должно быть минимальным; прочность смерзания со сваей не ниже прочности смерзания с грунтами оснований; несложная технология приготовления и заливки в скважину.

Для решения этой задачи проводились исследования по возможности использования в грунтовых растворах композиционных составов с применением гипсовых вяжущих.

На основе композиционного гипсового вяжущего были разработаны новые составы растворов для буроопускных свай в ВМГ. Изучены их основные технологические свойства (марочная прочность, срок и температура замерзания, прочность смерзания с материалом свай), которые показали пригодность новых растворов для применения в твердомерзлых ВМГ при заливке их ниже уровня слоя сезонного оттаивания грунта [2].

**Выводы.** 1. Значение сопротивления мерзлого раствора сдвигу по поверхности фундамента  $R_{\text{мг}}$  песчаного грунта меньше или равно значению  $R_{\text{мг}}$  разработанных растворов, т.е. разработанные растворы могут применяться в песчаных грунтах.

2. Сокращение расхода воды не ниже молекулярной влагоемкости ведет к увеличению прочности смерзания раствора со сваей; в растворе гипсоизвестковогрунтовым с уменьшением воды в 1,6 раза значение  $R_{\text{мг}}$  возрастает в 2 раза; при дальнейшем увеличении воды значение  $R_{\text{мг}}$  уменьшилось в 2,4 раза.

3. Значения  $R_{\text{мг}}$  разработанных растворов находятся между значениями  $R_{\text{мг}}$  известково-песчаного раствора и песчаного грунта, что не противоречит данным СНиП 2.02.04-88.

Авторами статьи разработаны составы композиционных вяжущих для тампонажных и грунтовых растворов, эксплуатируемых в условиях ВМГ. Получены, апробированы и рекомендованы к применению составы тампонажного материала для низкотемпературных скважин и грунтового раствора для замоноличивания свайных фундаментов в ВМГ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ № 2049080. Расширяющая добавка к цементу.
2. Саввина А. Е. Растворы для заполнения пазух при буроопускном способе погружения свай в условиях г. Якутска / А. Е. Саввина, А. Д. Егорова // Сб. науч. тр. Ресурсы строительного комплекса Республики Саха (Якутия). — Якутск, 2001. — С. 186–189.

© Егорова А. Д., Народов В. В., Местников А. Е., 2008

Получено 07.04.08

## ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 693.547.011.24

**В. В. МОЛОДИН**, канд. техн. наук, доц. (ООО «Евросити», г. Новосибирск);  
**С. Н. АНДРИЕВСКИЙ**, доц., **Ю. А. ПИНАЕВА**, инж. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

### ЗИМНЕЕ СИНХРОННОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ СМЕЖНЫХ КОЛОНН И ДИАФРАГМЫ С ПОСЛЕДУЮЩИМ БЕТОНИРОВАНИЕМ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ МОНОЛИТНЫХ КАРКАСОВ ЖИЛЫХ И ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

Обоснованы физические и математические модели динамики температурного поля и прочности бетона при зимнем синхронном бетонировании двух смежных колонн и диафрагмы с последующим бетонированием сопрягаемых плит перекрытий монолитного каркаса жилых и гражданских зданий. Рассмотрены традиционный (с изотермическим выдерживанием бетона) и управляемый температурный режим прогрева бетона в оптимальном температурном диапазоне, а также два альтернативных метода прогрева бетона — электрическими нагревательными проводами и электродный прогрев. Трехмерные дифференциальные уравнения теплопроводности бетона аппроксимированы по неявной разностной схеме дробных шагов Н. Н. Яненко. Разработанные алгоритмы реализованы на алгоритмическом языке Object Paskal в среде Borland Delphi 7.0.

В работе [1] авторами дано решение задач, связанных с расчетным обоснованием параметров зимнего бетонирования одиночных колонн и сопрягаемых с ними плит перекрытий монолитных каркасов зданий. Однако меньшую актуальность имеет решение таких задач и для монолитных каркасов более сложной формы, технологические операции возведения которых включают синхронное бетонирование двух смежных колонн и глухой диафрагмы или диафрагмы с проемом с последующим бетонированием сопрягаемой плиты перекрытия.

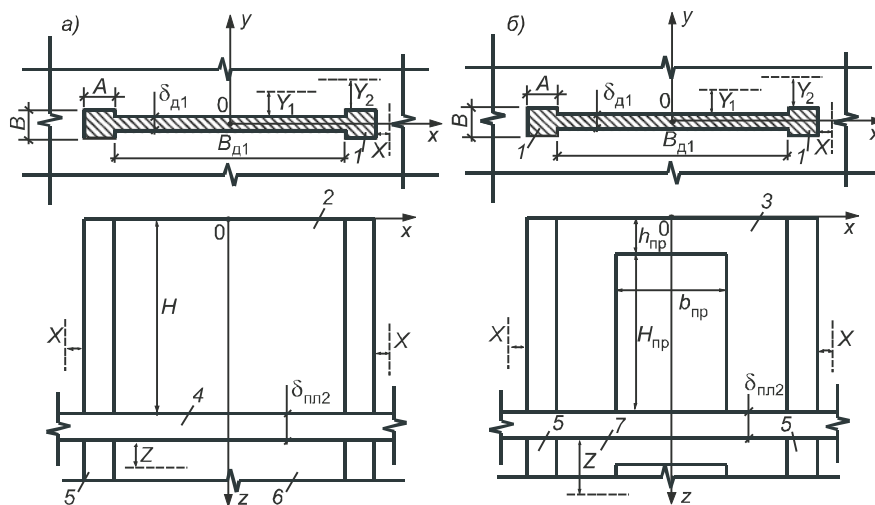


Рис. 1. Расчетная схема бетонируемых колонн и примыкающей к ним монолитной диафрагмы глухой (а) и с проемом (б)

1 — бетонируемая колонна; 2 — бетонируемая глухая диафрагма; 3 — бетонируемая диафрагма с проемом; 4 — ранее забетонированная плита перекрытия; 5 — ранее забетонированные колонны; 6 — ранее забетонированная глухая диафрагма; 7 — ранее забетонированная диафрагма с проемом

### Синхронное бетонирование смежных колонн и диафрагмы.

**Физическая постановка задачи.** В соответствии с расчетной схемой (рис. 1) две смежных колонны 1 сечением  $A \times B$  и диафрагма 2 или 3 толщиной  $\delta_{д1}$  бетонируются одновременно при температуре укладываемой бетонной смеси  $t_{бс}$ . Указанные конструкции в своем основании опираются на ранее забетонированную плиту перекрытия 4 толщиной  $\delta_{пл2}$ , а через нее — на ниже расположенные смежные колонны 5 такого же сечения ( $A \times B$ ) и диафрагму 6 и 7 толщиной  $\delta_{д2}$ . На момент начала бетонирования бетон ранее забетонированных конструкций успевает принять температуру, равную температуре окружающего воздуха. Задача осесимметричная как по оси  $X$ , так и по оси  $Y$ , т. е.

$$\frac{\partial t_{д1}(x=0, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_{д1}(x=0, y, z, \tau)}{\partial y} = \frac{\partial t_{кол1}(x=0, y, z, \tau)}{\partial y} = 0.$$

Размеры зон теплового влияния *бетонируемых* конструкций на *ранее забетонированные* определяются соотношениями:

колонны: по оси  $x$   $B_{д1}/2 + A + X$ ; по оси  $y$   $B/2 + Y_2$ ;

диафрагма: по оси  $y$   $\delta_{д1}/2 + Y_1$ ;

все ранее забетонированные конструкции по оси  $z$   $H + \delta_{пл2} + Z$ ,

где  $X$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$  и  $Z$  — расстояния по соответствующим осям от бетонируемых конструкций до границ зоны теплового влияния.

Если проектом производства работ предусмотрен *электродный* прогрев бетона колонн одним (по сечению) струнным электродом (колонны квадратного сечения) или двумя струнными электродами (колонны прямоугольного сечения), то после установки арматурного каркаса устанавливают опалубку (в том числе опалубку диафрагмы с полосовыми электродами) и с помощью крюков для временного крепления струнных электродов их закрепляют внутри арматурного каркаса колонн. Если струнный электрод по длине состоит из двух или трех элементов, то кроме крюков для временного крепления используют и отогнутые под прямым углом выводы самих электродов. Если предусмотрен прогрев бетона *электрическими нагревательными проводами*, то до установки опалуб-



ки их укладывают и закрепляют вертикально с расчетным шагом как на арматурном каркасе колонн, так и на арматурном каркасе диафрагмы. Затем устраивают выводы и отводы таким образом, чтобы была обеспечена возможность включения нагревательных проводов как на полную расчетную тепловую мощность  $M$ , так и на уменьшенную тепловую мощность  $\varphi \cdot M$  при разогреве бетона и  $\psi \cdot M$  при его остывании.

Величина коэффициентов  $\varphi$  и  $\psi$  определяется на стадии проектирования с помощью разработанного авторами специального блока программного продукта из условия соблюдения требуемой скорости перестройки температурного поля после включения и выключения нагревателей. При электродном прогреве бетона уменьшение тепловой мощности нагревателей при разогреве бетона или частичное включение расчетной тепловой мощности при остывании бетона может быть выполнено путем переключения напряжения тока на выходе из понижающего трансформатора.

Учет проема в диафрагме по схеме рис. 1, б достигается с помощью ГУ III рода с координатной привязкой горизонтальной и вертикальных граней проема.

*Математическая модель* динамики температурного поля и прочности бетона в решаемой задаче на примере глухой диафрагмы имеет вид

*Глухая диафрагма:*

$$\left. \begin{aligned} 1. \frac{\partial t_{д1}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_{д1}}{C_{д1}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 t_{д1}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{д1}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{д1}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + \\ &+ \frac{\omega_{экз}(\tau)}{C_{д1}} + \frac{Q(\tau)}{C_{д1}}, \quad x \in B_{д1/2} \wedge y \in \delta_{д1/2} \wedge z \in H \wedge \tau \in T_{R70\%}; \\ 2. \frac{\partial t_{д1}(x, y=0, z, \tau)}{\partial y} &= 0, \quad x \in B_{д1/2} \wedge z \in H \wedge \tau \in T_{R70\%}; \\ 3. \frac{\partial t_{д1}(x=0, y, z, \tau)}{\partial y} &= 0, \quad y \in \delta_{д1/2} \wedge z \in H \wedge \tau \in T_{R70\%}; \\ 4. -\lambda_{д1} \cdot \frac{\partial t_{д1}(x, y=\delta_{д1/2}, z, \tau)}{\partial y} &= K_{пр2} \cdot [t_{д1}(x, y=\delta_{д1/2}, z, \tau) - \theta], \\ &x \in B_{д1/2} \wedge z \in H \wedge \tau \in T_{R70\%}; \\ 5. -\lambda_{д1} \cdot \frac{\partial t_{д1}(x, y, z=H, \tau)}{\partial z} &= -\lambda_{пл2} \cdot \frac{\partial t_{пл2}(x, y, z=H, \tau)}{\partial z}, \\ &x \in B_{д1/2} \wedge y \in \delta_{д1/2} \wedge \tau \in T_{R70\%}; \\ 6. t_{д1}(x, y, z, \tau=0) &= t_{6с}, \quad x \in B_{д1/2} \wedge y \in \delta_{д1/2} \wedge z \in H, \\ &t_{пл2}(x, y, z, \tau=0) = \theta, \quad x \in B_{д1/2} \wedge y \in \delta_{д1/2} + Y_1 \wedge z \in \delta_{пл2}; \\ 7. t_{пл2}(x, y, z, \tau=0) &= \theta, \quad x \in B_{д1/2} \wedge y \in \delta_{д1/2} + Y_1 \wedge z \in \delta_{пл2}; \\ 8. t_{д1}(x, y, z, \tau=0) &= 0, \quad x \in B_{д1/2} \wedge y \in \delta_{д1/2} \wedge z \in (H + \delta_{пл2}, Z + \delta_{пл2} + Z); \\ 9. R_{д1}^{\tau=0} &= 0; \quad R_{д1}^{\tau+\Delta\tau} = R_{д1}^{\tau} + \Delta R. \end{aligned} \right\}$$

*Алгоритмический диспетчер изотермического  
выдерживания бетона:*

$$\left. \begin{aligned} 10. N = M, \quad \tau \in T_p \wedge \tau \in T_{ив}; \\ N = 0, \quad \tau \in T_{ост}. \end{aligned} \right\} (10.1)$$

$$\left. \begin{aligned}
& N = \varphi \cdot M, \quad \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} \geq \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\max} ; \\
& N = \psi \cdot M, \quad \tau \in T_{\text{ост}} \wedge \text{abs} \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \geq \text{abs} \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\max} .
\end{aligned} \right\} (102)$$

*Алгоритмический диспетчер управляемого температурного режима в оптимальном температурном диапазоне:*

$$11. \left. \begin{aligned}
& N = M, \quad \tau \in T_p \vee (\tau \in T_{\text{ур}} \wedge p = 2k, k = 1, 2, \dots, S); \\
& N = 0, \quad \tau \in T_{\text{ост}} \vee (\tau \in T_{\text{ур}} \wedge p = 2 - k, k = 1, 2, \dots, S).
\end{aligned} \right\} (111)$$

$$\left. \begin{aligned}
& N = \varphi \cdot M, \quad \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} \geq \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\max} ; \\
& N = \psi \cdot M, \quad \tau \in T_{\text{ост}} \wedge \text{abs} \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \geq \text{abs} \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\max} .
\end{aligned} \right\} (112)$$

В математической модели (1): 1.1 — дифференциальное уравнение теплопроводности глухой диафрагмы соответственно плиты перекрытия, колонны и диафрагмы; 1.4 — ГУ III рода на соответствующих гранях бетонируемых и ранее забетонированных конструкций; 1.6 — ГУ IV рода (условия теплового примыкания бетонируемых конструкций к ранее забетонированным; 1.2, 1.3 — условия тепловой симметрии с координатной привязкой; 1.8 — начальные условия; 10.1 — алгоритмический диспетчер неуправляемого температурного режима с изотермическим выдерживанием бетона; 10.1 и 10.2 — алгоритмические диспетчеры, управляющие температурным режимом после включения и выключения нагревателей; 11.2 — алгоритмический диспетчер, управляющий температурным режимом выдерживания бетона в оптимальном температурном диапазоне.

**Численная аппроксимация математической модели (1).** Численная аппроксимация дифференциальных уравнений и граничных условий в модели (1) выполнена по неявной разностной схеме дробных шагов академика Н. Н. Яненко [2, 3]. Координатная привязка этой схемы к решаемой трехмерной задаче с выводом всех прогоночных коэффициентов приведена в [4]. Очередность прогонок:

*1-я прогонка*  $(n+1/3)$  по оси  $z$  с границами циклов: свежееуложенный бетон бетонируемых колонн и диафрагмы  $i \in M_1$ , где  $M_1 = \text{ROUND}(H / \Delta Z)$ ; бетон ранее забетонированной плиты перекрытия  $i \in (M_1, M_2)$ , где  $M_2 = \text{ROUND}((H + \delta_{\text{пл}2}) / \Delta Z)$ ; бетон ниже расположенных ранее забетонированных диафрагмы и колонн  $i \in (M_2, M_3)$ , где  $M_3 = \text{ROUND}((H + \delta_{\text{пл}2} + Z) / \Delta Z)$ ;

*2-я прогонка*  $(n + 2/3)$  по оси  $x$  с границами циклов: бетонируемая диафрагма  $j \in N_1$ , где  $N_1 = \text{ROUND}((B_{\text{д}/2} + A) / \Delta x)$ ; ранее забетонированная плита перекрытия  $j \in N_3$ , где  $N_3 = \text{ROUND}((B_{\text{д}/2} + A + X) / \Delta x)$ ; ранее забетонированная диафрагма  $j \in N_1$ ; ранее забетонированная колонна  $j \in (N_1, N_2)$ ;

*3-я прогонка*  $(n + 1)$  по оси  $y$  с границами циклов: бетонируемая диафрагма  $j \in U_1$ , где  $U_1 = \text{ROUND}((B_{\text{д}/2}) / \Delta y)$ ; бетонируемая колонна  $K \in U_2$ , где  $U_2 = \text{ROUND}((B_{\text{д}/2}) / \Delta y)$ ; ранее забетонированная плита перекрытия  $K \in U_3$ , где  $U_3 = \text{ROUND}((B / 2 + Y_2) / \Delta y)$ ; ниже располо-

женная ранее забетонированная диафрагма  $K \in U_1$ ; ниже расположенная ранее забетонированная колонна  $K \in U_2$ .

Все ГУ III рода, расположенные на соответствующих осях в начале прогонки, аппроксимируются по неявной разностной схеме, а расположенные в конце прогонки — по явной. Детальный вывод всех прогоночных коэффициентов, в том числе прогоночных коэффициентов на границах, дан в [4].

**Плита перекрытия, сопрягаемая с забетонированными колоннами и диафрагмой.** Физическая постановка задачи. Расчетная схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 2.

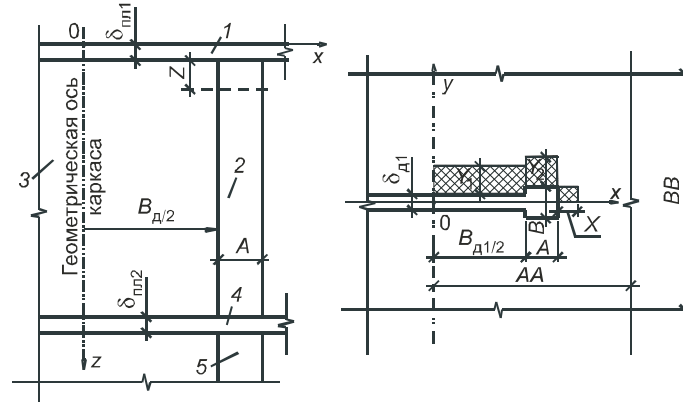


Рис. 2. Расчетная схема теплового сопряжения бетонируемой плиты перекрытия с ранее забетонированными колоннами и диафрагмами

1 — бетонируемая плита перекрытия; 2 — сопрягаемая колонна; 3 — сопрягаемая диафрагма; 4, 5 — ранее забетонированные соответственно плита перекрытия и ниже расположенная колонна

К моменту начала бетонирования плиты перекрытия бетон всех ранее забетонированных конструкций успевает, как правило, принять температуру окружающего воздуха в соответствии с расчетной схемой и ввиду относительно больших размеров бетонируемой плиты по сравнению с размерами области теплового примыкания к ранее забетонированным колоннам и диафрагме. Рассмотрим расчетный фрагмент плиты  $AA \times BB$ .

Если проектом производства работ предусмотрен электродный прогрев бетона, то возможны три варианта такого прогрева:

- 1) прогрев полосовыми электродами на нижних щитах опалубки (односторонний прогрев снизу);
- 2) прогрев бетона плиты сверху с помощью инвентарных накладных щитов с полосовыми электродами;
- 3) двухсторонний прогрев бетона электрическими нагревательными проводами, их укладывают и закрепляют сверху нижней и (или) верхней арматурных сеток.

*Математическая модель* динамики температурного поля и прочности бетона при бетонировании плиты перекрытия монолитного каркаса имеет вид:

$$1. \frac{\partial t_{пл1}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{пл1}}{C_{пл1}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 t_{пл1}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{пл1}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{пл1}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + \left[ \frac{\omega_{экз}(\tau)}{C_{пл1}} + \frac{Q(\tau)}{C_{пл1}} \right], \quad x \in AA \wedge y \in BB / 2 \wedge z \in \delta_{пл1} \wedge \tau \in T_{R70\%};$$

$$\left. \begin{aligned}
& 2. \frac{\partial t_{\text{д1}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{д1}}}{C_{\text{д1}}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 t_{\text{д1}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{д1}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{д1}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], \\
& \quad x \in B_{\text{д1}/2} \wedge y \in \delta_{\text{д1}/2} \wedge z \in (\delta_{\text{пл1}} + Z); \\
& 3. \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{C_{\text{кол1}}} \times \\
& \quad \times \left[ \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], \\
& \quad x \in (B_{\text{д1}/2}, B_{\text{д1}/2} + A) \wedge y \in B / 2 \wedge z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z); \\
& 4. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z} = -\lambda_{\text{д1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{д1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z}, \\
& \quad x \in B_{\text{д1}/2} \wedge y \in \delta_{\text{д1}/2}; \\
& 5. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z} = -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z}, \\
& \quad x \in A \wedge y \in B / 2; \\
& 6. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z} = K_{\text{пр3}} \cdot [t_{\text{пл1}}(x, y, z = 0, \tau) - \theta]; \\
& 7. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z} = K_{\text{пр2}} \cdot [t_{\text{пл1}}(x, y, z = 0, \tau) - \theta], \\
& \quad x \in AA \wedge [y \in (\delta_{\text{д1}/2}, BB / 2) \vee y \in (B / 2, BB / 2)]; \\
& 8. -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha \cdot [t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau) - \theta], \\
& \quad x \in A \wedge y \in B / 2 \wedge z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z); \\
& 9. \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x, y = 0, z, \tau)}{\partial y} = 0, \quad x \in AA \wedge z \in \delta_{\text{пл1пр3}} \cdot [t_{\text{пл1}}(x, y, z = 0, \tau) - \theta], \\
& \quad x \in AA \wedge y \in BB / 2; \\
& 10. \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x, y, z = \delta_{\text{пл1}} + Z, \tau)}{\partial z} = 0, \quad x \in (B_{\text{д1}/2}, B_{\text{д1}/2} + A) \wedge y \in B / 2; \\
& 11. t_{\text{пл1}}(x, y, z, \tau = 0) = t_{\delta\text{с}}, \quad x \in AA \wedge y \in BB / 2 \wedge z \in \delta_{\text{пл1}}; \\
& 12. t_{\text{д1}}(x, y, z, \tau = 0) = \theta, \quad x \in B_{\text{д1}/2} \wedge y \in \delta_{\text{д1}/2} \wedge z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z); \\
& 13. t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau = 0) = \theta, \quad x \in (B_{\text{д1}/2}, B_{\text{д1}/2} + A) \wedge \\
& \quad \wedge y \in B / 2 \wedge z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z); \\
& 14. R_{\text{пл1}}^{\tau=0} = 0; \quad R_{\text{пл1}}^{\tau+\Delta\tau} = R_{\text{пл1}}^{\tau} + \Delta R; \\
& 15. \left. \begin{aligned}
& 16. \end{aligned} \right\} \text{Алгоритмические диспетчеры (см. 1.10, 1.11).}
\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Очередность операций по численной аппроксимации (2) та же, что и при численной аппроксимации (1). Разработанные авторами алгоритмы реализованы на алгоритмическом языке Object Paskal в среде Borland Delphi 7.0.

**Решение тестовой задачи** на примере синхронного бетонирования двух колонн и глухой диафрагмы монолитного каркаса при строительстве административного здания на пересечении улиц Свердлова — Советская в г. Новосибирске зимой 2005/06 г. *Дано:* синхронно бетонятся две колонны  $400 \times 400 \times 3100$  мм и глухая диафрагма  $200 \times 3000 \times 3100$  мм. Свежеуложенный бетон: класс В25, плотность  $2450 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $2,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Начальная температура бетона (температура укладываемой бетонной смеси)  $5^\circ\text{C}$ . Опалубка колонн и диафрагмы: фанера ( $\delta_{\text{оп}} = 18 \text{ мм}$ ,  $\lambda_{\text{оп}} = 0,17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ ), утеплитель этафон ( $\delta_y = 10 \text{ мм}$ ,  $\lambda_y = 0,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ ). Утеплитель сверху — слой опилок ( $\delta_y = 100 \text{ мм}$ ,  $\lambda_y = 0,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ ). *Рассчитать:* 1) время набора бетоном колонн и диафрагмы прочности  $R_{70\%}$ ; 2) изменение во времени средневзвешенной по объему температуры бетона и его температуры на контакте (снизу) с ранее забетонированной плитой перекрытия; 3) изменение во времени удельных энергозатрат. Температуру изотермического выдерживания (альтернативный вариант) и среднюю температуру управляемой тепловой обработки бетона принять  $50^\circ\text{C}$ .

Результаты расчетов для электродного прогрева бетона при управляемом и неуправляемом температурных режимах приведены соответственно на рис. 3, 4.

В соответствии с данными сравнительных расчетов, приведенными на рис. 3, 4, при электродном прогреве бетона (сквозного прогрева бетона колонн струнными электродами периферийного двухстороннего прогрева бетона глухой диафрагмы) время набора бетоном 70% проектной прочности составило: при управляемом температурном режиме  $T_{R70\%} = 50 \text{ ч}$  и при

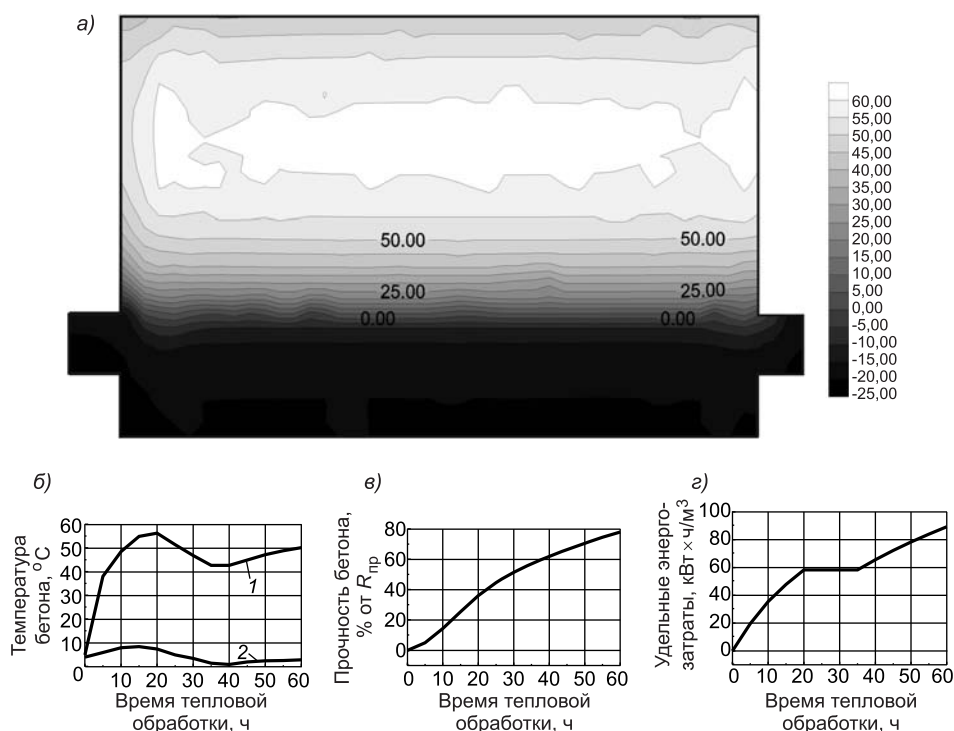


Рис. 3. Синхронное бетонирование двух смежных колонн и глухой диафрагмы на ранее забетонированной плите перекрытия с электродным прогревом бетона при управляемом температурном режиме

а) масштабное температурное поле; б) изменение средневolumной температуры бетона (1) и его температуры на контакте с плитой перекрытия (2); в) ход во времени процесса нарастания прочности бетона; г) изменение во времени удельных энергозатрат

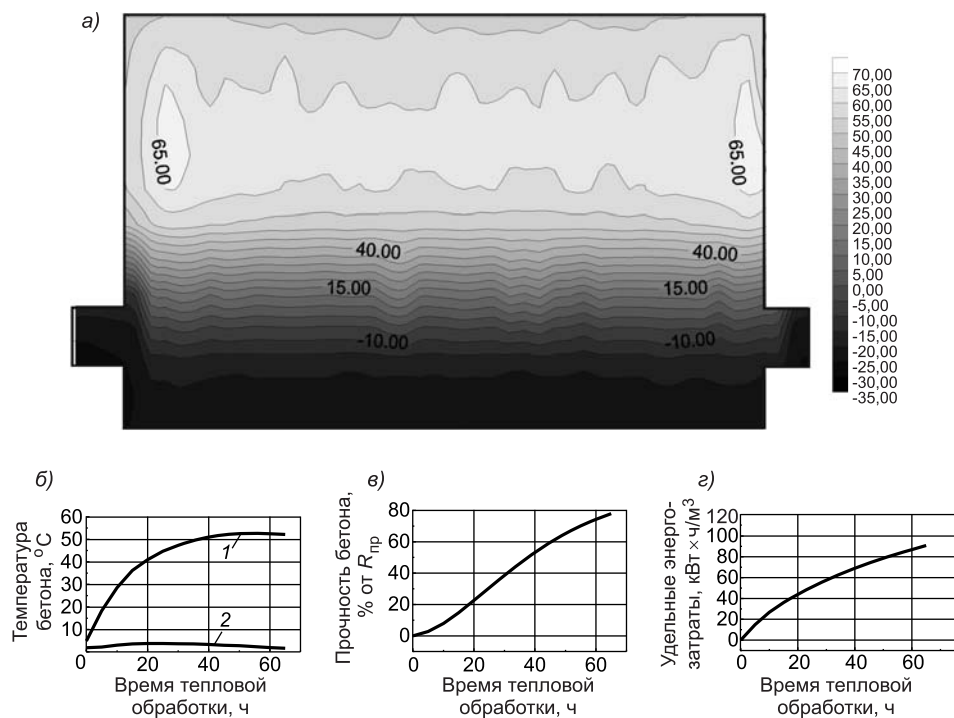


Рис. 4. Синхронное бетонирование двух смежных колонн и глухой диафрагмы на ранее забетонированной плите перекрытия с электродным прогревом бетона при его изотермическом выдерживании

а) масштабное температурное поле; б) изменение среднеобъемной температуры бетона (1) и его температуры на контакте с плитой перекрытия (2); в) ход во времени процесса нарастания прочности бетона; г) изменение во времени удельных энергозатрат

изотермическом выдерживании бетона  $T_{R70\%} = 55$  ч, удельные энергозатраты для указанных температурных режимов составили соответственно 78 и 82 кВт·ч/м³.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молодин В. В. Зимнее бетонирование одиночных колонн и плит перекрытий монолитных каркасов жилых и гражданских зданий / В. В. Молодин, С. Н. Андриевский, Ю. А. Пинаева // Изв. вузов. Строительство (в печати).
2. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н. Н. Яненко. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 1966. — 364 с.
3. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / А. А. Самарский. — М.: Наука, 1971. — 550 с.
4. Молодин В. В. Зимнее бетонирование монолитных строительных конструкций: Учеб. пособие / В. В. Молодин. — Новосибирск: Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2007. — 184 с.

© Молодин В. В., Андриевский С. Н., Пинаева Ю. А., 2008

Получено 03.04.08



# ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКА СЛУЖБЫ РАБОЧИХ КОЛЕС ГРУНТОНАСОСОВ ПРИ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ ОБВОДНЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕСКА

Проведены исследования по изучению влияния абразивного износа рабочего колеса грунтонасосов на работу земснаряда при гидромеханизированной укладке в штабель песка и песчано-гравийной смеси. В результате реализации разработанной автором модели динамики координат рабочей точки рассчитаны оптимальные сроки службы рабочих колес грунтонасосов по нескольким инвестиционным проектам. Полученные результаты подтверждают эффективность установки рабочих колес из износостойкой стали с увеличенными сроками службы рабочих колес. При этом увеличивается и сезонная выработка земснарядов и повышается эффективность гидромеханизированного способа добычи и укладки в штабель нерудных строительных материалов.

Исследованиями Т. И. Пеняскина [1, 2] установлено, что напорная характеристика КПД существенно зависят от степени абразивного износа рабочего колеса (РК) грунтонасосов (ГН). При этом по мере износа РК снижается напорная характеристика, что приводит к изменению координат рабочей точки гидравлической системы ГН (рис. 1).

Поэтому целесообразно решить следующие задачи:

1) обоснование оптимального срока эксплуатации РК грунтонасосов, после превышения которого возросшие текущие затраты превышают получаемую прибыль;

2) обоснование экономической эффективности применения рабочих колес из износостойкой стали при общепринятой продолжительности срока службы рабочих колес грунтонасосов из обычной стали (300 ч чистой работы земснарядов) с вариантным рассмотрением предельного срока их службы 500, 700 и 1000 ч чистой работы земснаряда и с оптимизацией срока службы РК в каждом инвестиционном проекте.

Ю. А. Поповым [3, 4] доказано, что напорная характеристика любого центробежного нагнетателя описывается уравнением

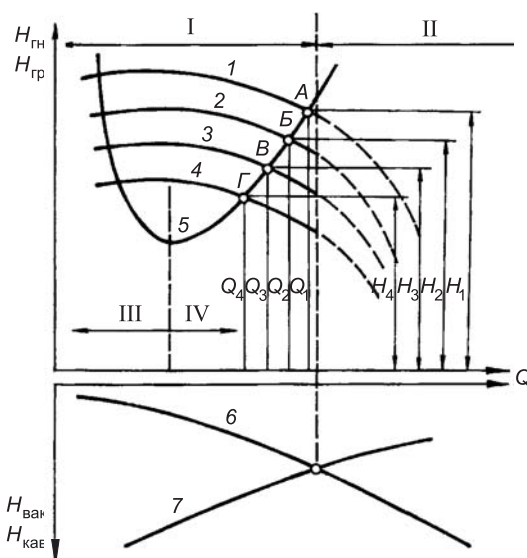
$$H_{ц/б} = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C, \quad (1)$$

а в соответствии с рис. 1 это уравнение трансформируется к виду

$$H_{ГН} = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C(\tau). \quad (2)$$

Рис. 1. Схема изменения координат рабочей точки гидравлической системы грунтонасоса

I — участок нормальных, II — искаженных рабочих характеристик; III — критический, IV — сверхкритический режим; 1, 2, 3, 4 — напорные характеристики грунтонасоса соответственно при новом рабочем колесе ( $\tau_1 = 0$ ), а также при его эксплуатации в течение времени 2, 3, 4; 5 — гидравлическая характеристика трубопровода; 6 — вакуумметрическая характеристика; 7 — кавитационная характеристика



В созданной в НГАСУ (Сибстрин) компьютерной базе данных [5] приведены коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  ( $= 0$ ) для всех серийно выпускаемых грунтонасосов при их работе на воде со сменными рабочими колесами разного диаметра.

Структурная схема гидравлической системы ГН имеет вид:

грунтонасос  $\rightleftarrows$  трубопроводная сеть  $\rightarrow$  конический грохот. (3)

Двухсторонняя связь между ГН и трубопроводной сетью ( $\rightleftarrows$ ) характеризует известный принцип: любой центробежный нагнетатель развивает только такой напор, который необходим для преодоления гидравлического сопротивления подсоединенной трубопроводной сети. При этом направленность связи ( $\rightarrow$ ) означает, что любые изменения рабочих параметров ГН (в том числе изменения гидравлических качеств по мере износа РК) приводят к изменению параметров гидротранспортной линии, обратная связь ( $\leftarrow$ ) означает, что любые изменения параметров гидротранспортной линии (наращивание плавучего гибкого трубопровода, увеличение статического напора) приводят к изменению координат рабочей точки ( $H_A$ ,  $Q_A$ ) системы. Конический грохот (КГ) в структурной схеме отделен от трубопроводной сети односторонней связью ( $\rightarrow$ ), так как условия работы КГ на параметры гидротранспорта влияния не оказывают, в то же время качество обогащения песка в КГ существенно зависит от скорости входа гидросмеси в него. Уменьшение расхода гидросмеси в транспортной системе автоматически приводит к уменьшению величины центробежной силы при закручивании потока и к значительному возрастанию потери песка с гравием. По данным Т. И. Пеняскина [1, 2] установлено, что потери полезных фракций (0,16–5 мм) в КГ возрастают с 9% при новом РК до 50% при изношенном.

Несомненно, что на величину потерь полезных фракций влияет и степень износа сита. Однако в дальнейших выводах предположим, что сито новое и к дополнительным потерям полезных фракций оно не приводит.

После замены изношенного РК грунтонасоса на новое или реставрированное его напорная характеристика на воде описывается уравнением

$$H_{ГН}^0(\tau = 0) = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C(\tau = 0); \quad (4)$$

В соответствии с [6] пересчет напорной характеристики с воды на гидросмесь может быть произведен по формуле

$$H_{ГН}^{см} = H_{ГН}^0 \cdot \left[ 1 + \frac{\psi^*}{\sqrt{\psi}} \right], \quad (5)$$

где  $S$  — объемная консистенция гидросмеси в долях единицы;

$\psi^*$  — средневзвешенный по грансоставу коэффициент транспортабельности карьерного грунта.

В соответствии с [1, 2] процесс конгруэнтного понижения напорной характеристики ГН по мере износа его рабочего колеса достоверно описывается с помощью изменяющегося во времени коэффициента  $C(\tau)$

$$C(\tau) = K_1 \cdot \tau^2 + K_2 \cdot \tau + K_3, \quad (6)$$

где  $K_1 = -0,37 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_2 = -0,023$ , а коэффициент  $K_3$  для каждого конкретного ГН находится экстраполяцией паспортной напорной характеристики на воде.

Возможность достоверного использования коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  в уравнении (6) подтверждается:

1) полным совпадением времени износа РК (300 ч чистой работы земснаряда) при разработке Троицкого месторождения песка в Челябинской

области, где Т. И. Пеняскиным совместно с научно-исследовательским институтом ВНИИНефуд (г. Тольятти) были проведены обширные экспериментальные исследования динамики рабочих характеристик земснаряда 150-45 по мере износа рабочего колеса грунтонасоса 16Р-9М, при разработке Марусинского месторождения песка в Новосибирской области с использованием грунтонасоса ГрУТ 2000/63;

2) близкими значениями диаметров рабочих колес грунтонасосов 16Р-9М и ГрУТ 2000/63 (соответственно 910 и 950 мм), а также частоты их вращения (соответственно 590 и 580 мин<sup>-1</sup>);

3) практически полным совпадением кривых гранулометрического состава Троицкого и Марусинского песков (рис. 2);

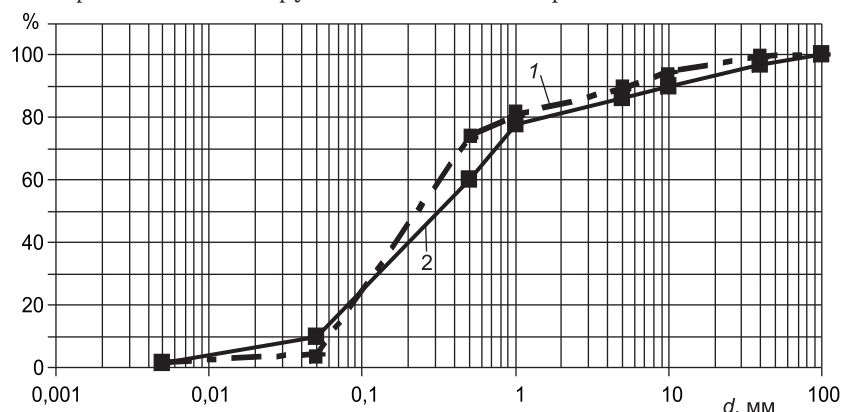


Рис. 2. Кривые гранулометрического состава песка Марусинского (1) и Троицкого (2) месторождений

4) сравнением данных экспериментальных измерений при разработке Марусинского месторождения в Новосибирской области летом 2007 г. (земснаряд 180-60 с грунтонасосом ГрУТ 2000/63) с данными расчетов по формуле (6) (табл. 1).

По мере износа РК паспортная характеристика КПД грунтонасоса ГрУТ 2000/63 описывается зависимостями:

— при новом или реставрированном РК

$$\eta_{ГН}^0(\tau=0) = f_3 \cdot Q^2 + m_3 \cdot Q + n_3; \quad (7)$$

— при частично изношенном РК

$$\eta_{ГН}(\tau) = \alpha(\tau)Q^2 + \beta(\tau)Q + \gamma(\tau), \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \alpha(\tau) &= f_1 \tau^2 + f_2 \tau + f_3 \\ \beta(\tau) &= m_1 \tau^2 + m_2 \tau + m_3 \\ \gamma(\tau) &= n_1 \tau^2 + n_2 \tau + n_3 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Таблица 1

**Данные экспериментальных измерений и данные расчетов при разработке Марусинского месторождения в Новосибирской области летом 2007 г.**

Время чистой работы земснаряда после замены РК, час	Расчетное значение расхода на воде, м <sup>3</sup> /ч	Объем песка, уложенного в штабель *, м <sup>3</sup>	Напор грунтонасоса на воде, м		КПД грунтонасоса, %	
			данные измерений	данные расчетов	данные измерений	данные расчетов
0	2190		64,8	64,0	68,4	68,9
100	2091	13037	62,8	62,4	66,1	66,9
200	1941	12929	60,3	59,9	59,9	61,0
300	1703	12803	57,4	57,0	48,1	49,5

\* По данным геодезических замеров ЗАО «Сибгидромехстрой».

В (9) эмпирические коэффициенты равны:  $f_1 = -0,36 \cdot 10^{-12}$ ;  $f_2 = -0,2 \cdot 10^{-11}$ ;  $m_1 = -0,123 \cdot 10^{-8}$ ;  $m_2 = -0,32 \cdot 10^{-7}$ ;  $n_1 = -0,31 \cdot 10^{-5}$ ;  $n_2 = 0$ .

Разработанный автором алгоритм имитационного моделирования динамики координат рабочей точки грунтонасосов по мере абразивного износа их рабочего колеса реализован на алгоритмическом языке Visual Basic и включает блоки: 1) базы данных по грунту карьерной залежи; 2) базы данных по грунтонасосу; 3) базы данных по гидротранспортной линии земснаряда; 4) обоснование нормативной грунтопроизводительности земснаряда с выводом грунтонасоса из нештатных ситуаций (при их наличии): «Кавитация ГН», «Работа системы на левой рабочей точке», «Дефицит напора ГН»; 5) имитационное моделирование динамики координат рабочей точки при предельном сроке службы рабочего колеса 300, 500, 700 и 1000 ч чистой работы земснаряда.

В соответствии с [7] введем следующие понятия:

*инвестиционные расходы* (объем капитальных вложений) — расходы на РК грунтонасосов в обычном исполнении (с максимальным сроком службы 300 ч чистой работы земснаряда) или на РК из износостойкой стали;

*индекс инвестиционного проекта*  $j = 1, 2, \dots, m$ ; в соответствии со сложившейся мировой практикой гидромеханизации земляных работ примем:  $j=1$  — рабочее колесо из обычной стали с максимальным сроком службы 300 ч чистой работы земснаряда;  $j \in 2, 3, 4$  — РК из износостойкой стали с максимальным сроком службы соответственно 500, 700 и 1000 ч чистой работы земснаряда;

*индекс варианта реализации инвестиционного проекта*  $j = 1, 2, \dots, m$ : для  $j=1$ ,  $r=1, 2, 3$ ; для  $j=2$ ,  $r=1, 2, \dots, 5$ ; для  $j=3$ ,  $r=1, 2, \dots, 7$ ; для  $j=4$ ,  $r=1, 2, \dots, 10$ , т. е. количество индексов реализации проекта  $j$  равно  $ROUND(T_j / \Delta T)$ , где  $\Delta T = 100$  ч чистой работы земснаряда;

*текущие затраты*  $C_{j,r}$  — затраты при реализации проекта  $j$  по варианту  $r$ ;

*инвестиционные расходы*  $T_{j,r}$  — объем капитальных вложений при реализации проекта  $j$  по варианту  $r$ ;

*нормативный срок окупаемости*  $T_n$  — срок окупаемости дополнительных (по отношению к базовому  $j=1$  варианту) инвестиционных расходов экономией на себестоимости.

Указанная выше последовательность рассмотрения инвестиционных проектов соответствует принципу *возрастающей* последовательности инвестиционных расходов при *убывающей* последовательности текущих затрат. При этом коэффициент сравнительной (относительной) эффективности капитальных вложений характеризует экономию на себестоимость, приходящуюся на один рубль дополнительных инвестиций, обусловленных переходом к более капиталоемкому варианту их исполнения, а обратной ему величиной является сравнительный (относительный) срок окупаемости, который характеризует период, за который дополнительные инвестиционные затраты окупаются экономией на себестоимости. Применительно к решаемой задаче имеем:

$I(j)$  — инвестиционные расходы на новое рабочее колесо ГН по проекту  $j$  и (при необходимости) на вывод ГН из нештатной ситуации «Дефицит напора ГН», если эта ситуация возникает в процессе износа РК, т.е. при  $r > 1$ ;

$C(j, r)$  — дополнительные (связанные с износом РК грунтонасоса) текущие затраты при реализации проекта  $j$  по варианту  $r$ , обусловленные:

уменьшением грунтопроизводительности земснаряда из-за снижения на масштабном графике напорной характеристики  $C_{гр}(j, r)$ ; увеличением удельных энергозатрат на разработку и гидравлический транспорт грунта из-за снижения КПД грунтонасоса  $C_{эн}(j, r)$ .

Обозначим  $T_{опт}(j)$  – оптимальный срок эксплуатации РК грунтонасосов по проекту  $j$  из условия равенства относительных величин инвестиционных расходов  $I(j, r) / T(j, r)$  и дополнительных текущих затрат  $C(j, r) / T(j, r)$ , т.е. из условия

$$\frac{I(j, r)}{T(j, r)} = \frac{C(j, r)}{T(j, r)}. \quad (10)$$

Величины, соответствующие условию (10), обозначим  $(I(j, r))_{опт}$ ,  $(\Sigma C(j, r))_{опт}$  и  $(T(j, r))_{опт}$ . Заметим, что составляющая  $I(j, r)$  для нового РК не зависит от варианта реализации проекта  $j$ . На ее величину может влиять только сумма единовременных затрат на вывод ГН из нештатной ситуации «Дефицит напора ГН», если такая ситуация возникает вследствие износа РК грунтонасоса.

При переходе к более капиталоемкому варианту коэффициент сравнительной эффективности  $E$ , характеризующий экономию текущих затрат или прирост прибыли, приходящейся на один рубль дополнительных инвестиционных расходов при переходе от проекта  $j$  к проекту  $j+1$ , определяется как

$$\begin{aligned} E &= \frac{(\Sigma C(j, r))_{опт} - (\Sigma C(j+1, r))_{опт}}{(I(j+1, r))_{опт} - (I(j, r))_{опт}} = \\ &= - \frac{(\Sigma C(j+1, r))_{опт} - (\Sigma C(j, r))_{опт}}{(I(j+1, r))_{опт} - (I(j, r))_{опт}} = \frac{-\Delta C}{\Delta I} = \frac{\Delta \Pi}{\Delta I}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Delta I$  — прирост инвестиционных затрат при переходе к более капиталоемкому варианту реализации проекта;  $\Delta C$  — экономия текущих затрат;  $\Delta \Pi$  — прирост прибыли.

Рассмотрим более подробно текущие затраты при реализации проекта  $j$  по вариантам  $r \in R$ .

Возрастающие по мере износа РК текущие затраты  $C_{гр}(j, r)$  за счет уменьшения грунтопроизводительности земснарядов можно представить в виде

$$C_{гр}(j, r) = c_{гр} \cdot 10^{-2} \int_0^T [S(\tau=0) \cdot Q_A(\tau=0) - S(\tau) \cdot Q_A(\tau)] \cdot d\tau, \quad (12)$$

где  $c_{гр}$  — стоимость 1 м<sup>3</sup> строительного песка, р.;

$S(\tau=0)$ ,  $S(\tau)$  — объемная консистенция гидросмеси в долях единицы соответственно при новом и частично изношенном рабочем колесе;  $10^{-2}$  — коэффициент приведения текущего времени эксплуатации РК к варианту реализации проекта  $r$ .

Вполне очевидно, что численная реализация (12) имеет вид:  $M = ROUND(T_j / \Delta\tau)$ ;  $\tau = C_{гр}(i=0) = 0$ ; **для  $i = 1$  шаг 1 до  $M$  цикл**

$$\{C_{гр}(i) = C_{гр}(i-1) + c_{гр} [S(i-1) \cdot Q_A(i-1) - S(i) \cdot Q_A(i)] \cdot \Delta\tau\},$$

где скобки  $\{i\}$  означают оператор соответственно begin и end.

Как уже отмечалось, снижение КПД грунтонасоса приводит к возрастанию удельных энергозатрат на единицу объема транспортируемого материала. При этом КПД центробежных нагнетателей  $\eta$  характеризует ту часть мощности, которая полезно затрачивается для создания напора  $H$  при подаче (расходе)  $Q$ , т. е.

$$\eta = N_{\pi} / N_{\text{в}}, \quad (13)$$

где  $N_{\pi}$  — полезная мощность, равная  $N_{\pi} = \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot Q_{\text{см}} \cdot H_{\text{см}} \cdot 10^{-3}$ , кВт, где  $10^{-3}$  — коэффициент перевода мощности из единицы измерения Вт в кВт;  $\rho_{\text{см}} \cdot g$  — удельный вес гидросмеси, Н/м<sup>3</sup>;

$N_{\text{в}}$  — мощность на валу привода ГН, равная отношению  $N_{\pi} / \eta$ .

Для КПД грунтонасоса с новым  $N(\tau=0)$  и частично изношенным  $N(\tau>0)$  рабочими колесами затрачиваемая мощность соответственно равна:

$$N(\tau=0) = \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot Q_A(\tau=0) \cdot H_A(\tau=0) \cdot 10^{-3} / (\eta_A^{\text{см}}(\tau=0)); \quad (14)$$

$$N(\tau>0) = \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot Q_A(\tau>0) \cdot H_A(\tau>0) \cdot 10^{-3} / (\eta_A^{\text{см}}(\tau>0)). \quad (15)$$

С учетом зависимостей (14) и (15) возрастающие во времени текущие затраты  $C_{\text{эн}}(\tau)$ , обусловленные увеличением удельных затрат на разработку и гидротранспорт грунта, могут быть выражены зависимостью

$$C_{\text{эн}}(\tau) = 10^{-3} \cdot c_{\text{эл}} \int_0^{\tau} \frac{\rho_{\text{см}} \cdot g \cdot Q_A^{\text{см}}(\tau) \cdot H_A^{\text{см}}(\tau)}{\eta_A^{\text{см}}(\tau)} \cdot \left(1 - \frac{\eta_A^{\text{см}}(\tau)}{\eta_A^{\text{см}}(\tau=0)}\right) \cdot d\tau, \quad (16)$$

где  $c_{\text{эл}}$  — стоимость электроэнергии, р./(кВт·ч).

Численная реализация (16) имеет вид:

$M = \text{ROUND}(T_j / \Delta\tau); \tau = C_{\text{эн}}(i=0) = 0$ ; для  $i = 1$  шаг 1 до  $M$  цикл

$$\left\{ C_{\text{эн}}(i) = C_{\text{эн}}(i-1) + 10^{-3} \cdot c_{\text{эл}} \cdot \left[ \frac{\rho_{\text{см}} \cdot g \cdot Q_A^{\text{см}}(i) \cdot H_A^{\text{см}}(i)}{\eta_A^{\text{см}}(i)} \cdot \left(1 - \frac{\eta_A^{\text{см}}(i)}{\eta_A^{\text{см}}(i-1)}\right) \right] \cdot \Delta\tau \right\}.$$

Текущие затраты на замену изношенного РК, равные стоимости продукта, который мог бы быть уложенным в штабель за время производства работ по замене РК, выражаются зависимостью

$$C_{\text{РК}}(T_3) = c_{\text{гр}} \cdot S(\tau=T_3) \cdot Q_A(\tau=T_3) \cdot T_{\text{норм}}, \quad (17)$$

где  $T_3$  — время эксплуатации РК от его установки до замены, ч;

$T_{\text{норм}}$  — нормативное время на замену РК, ч.

Прирост прибыли  $\Delta P$  за время эксплуатации РК можно количественно оценить следующим образом

$$\Delta P(\tau) = (c_{\text{гр}} - c_{\text{сб}}) \cdot \int_0^{T_{\text{опт}}} S(\tau) \cdot Q_A(\tau) \cdot d\tau, \quad (18)$$

где  $c_{\text{сб}}$  — себестоимость продукции, р./м<sup>3</sup>.

**Задача 1.** Оптимизация срока службы рабочих колес для инвестиционного проекта с индексом  $j$ . Для решения указанной задачи необходимо, чтобы сумма инвестиционных и текущих затрат с учетом прироста прибыли, отнесенная к продолжительности срока эксплуатации РК, удовлетворяла условию

$$\frac{Ij}{T_{\text{опт}}} + \frac{C_{\text{гр}}(\tau=T_{\text{опт}}) + C_{\text{эн}}(\tau=T_{\text{опт}}) + C_{\text{РК}}(\tau=T_{\text{опт}}) - \Delta P(\tau=T_{\text{опт}})}{T_{\text{опт}}} = \min, \quad (19)$$

где  $\tau$  — текущее время  $\tau \in Tj, r$ ;

$T_{\text{опт}}$  — оптимальный срок эксплуатации РК, удовлетворяющий условию (19), ч.

**Задача 2.** Обоснование оптимального проекта при известной стоимости РК из износостойкой стали. Выбор оптимального проекта из условия



$$\frac{I(j) + C_{\text{гр}}^{\text{опт}}(j) + C_{\text{эн}}^{\text{опт}}(j) + C_{\text{рк}}^{\text{опт}}(j)}{W_{\text{опт}}(j)} = \min. \quad (20)$$

**Задача 3.** Обоснование максимально оправданной стоимости рабочих колес из износостойкой стали. Сначала находится сумма прибыли от продажи полученной продукции при оптимальном сроке службы РК в рассматриваемом проекте  $j$

$$Pr(i) = Pr(i-1) + [S(i-1) \cdot Q_A(i-1) + S(i) \cdot Q_A(i)] \cdot \Delta\tau / 2, \quad (21)$$

а затем с учетом экономической специфики специализированного предприятия решается задача обоснования максимально оправданной стоимости рабочих колес из износостойкой стали.

Решаются указанные задачи для условий гидромеханизированной добычи песка и песчано-гравийной смеси на Марусинском месторождении в Новосибирской области. Используемый грунтонасос, ГрУТ 2000/63 с рабочим колесом 1050 мм, работает в штатной ситуации на плотности гидросмеси  $\rho_{\text{см}}$ .

Блок-схема динамики координат рабочей точки грунтонасосов приведена на рис. 3, где  $I$  — инвестиционные расходы на новое рабочее колесо ГН, р.;  $Q_{A0}$  — расход гидросмеси в рабочей точке в начальный момент

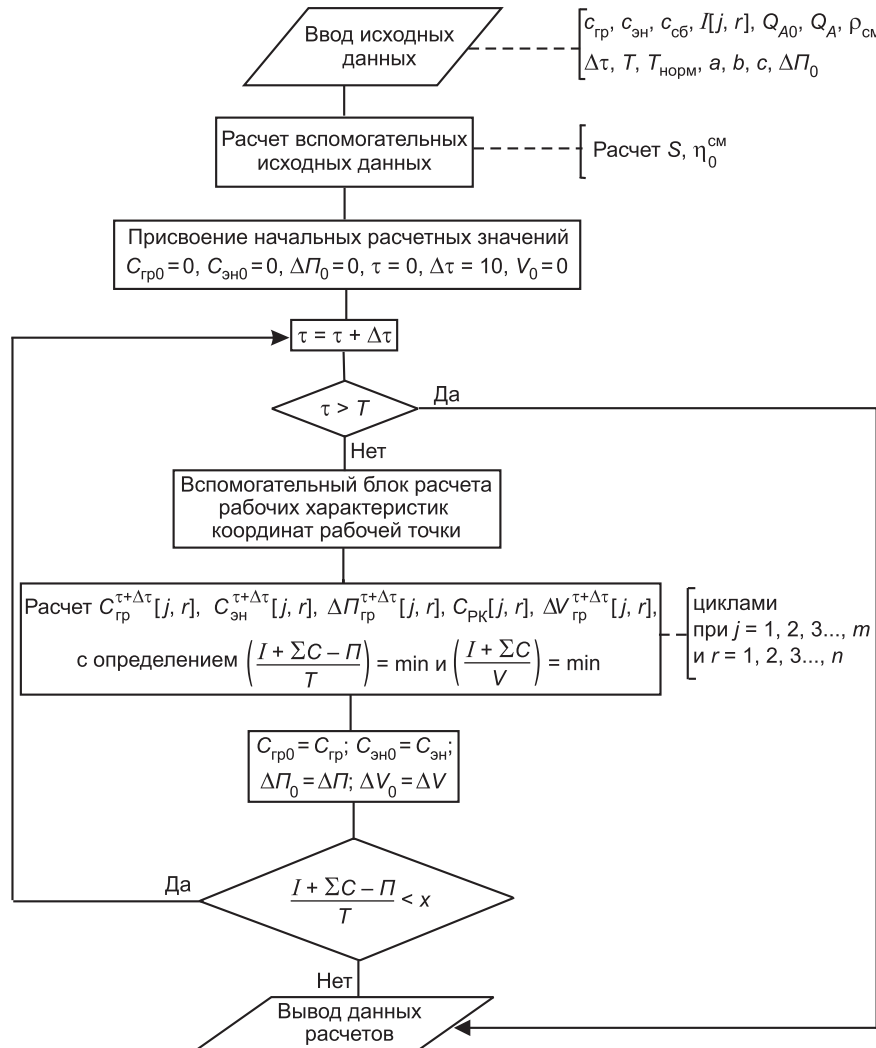


Рис. 3.

Таблица 2

**Изменение во времени рабочих параметров и объема намывного песка при работе земснаряда 180-60 с грунтонасосом ГруТ 2000/63 на Марусинском месторождении в Новосибирской области летом 2007 г.**

Время чистой работы земснаряда, ч	Средний расход гидросмеси при нормативной плотности, м <sup>3</sup> /ч	Объем намывного песка, м <sup>3</sup>
0	2179	0
100	2161	13037
200	2140	25966
300	2118	38769
400	2093	51441
500	2066	63963
600	2039	76324
700	2011	88523
800	1976	100555
900	1943	112377
1000		124002

времени, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_A$  — расход гидросмеси в рабочей точке на предельном сроке эксплуатации РК, м<sup>3</sup>/ч;  $T$  — предельный срок службы РК, ч;  $a, b, c$  — коэффициенты, определяемые с помощью специальной программы;  $\Sigma C$  — сумма текущих затрат на замену изношенного РК, на разработку и гидротранспорт грунта, затрат за счет уменьшения грунтопроизводительности земснарядов.

Рассчитываются рабочие параметры и объем намывного песка (табл. 2). Приведены графики, составленные по данным расчетов (рис. 4).

Алгоритмическая реализация блок-схемы (см. рис. 3):

1)  $\tau$  — параметр внешнего (по времени) цикла; 2) рассчитываются объемная консистенция гидросмеси в долях единицы; 3) после присвоения начальных расчетных значений производится расчет рабочих характеристик и координат рабочей точки; 4) рассчитываются возрастающие по времени, текущие затраты за счет снижения грунтопроизводительности земснаряда  $C_{гр}$  и за счет увеличения удельных затрат на разработку и гидротранспорт грунта  $C_{эн0}$ , а также затраты на замену изношенного РК, прирост прибыли за время эксплуатации ГН и увеличение объема намываемого грунта; 4) предыдущий расчет производится до получения минимального значения суммы инвестиционных и текущих затрат с учетом получаемой прибыли, приведенные к текущему времени эксплуатации РК. Это минимальное значение и является искомым значением оптимального срока службы РК. Далее проверяется условие обоснования оптимального проекта.

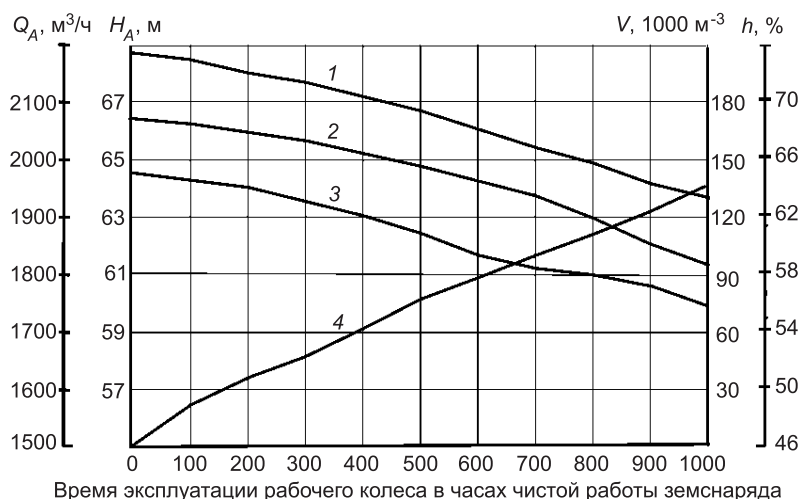


Рис. 4. Изменение рабочих параметров и объема намываемого песка с течением времени при работе земснаряда 180-60 с грунтонасосом ГруТ 2000/63:

1, 3 —  $H_A, Q_A$  (динамика координат рабочей точки на масштабном графике) соответственно в м и м<sup>3</sup>/ч; 2 — (изменение КПД ГН по мере износа РК), %; 4 —  $V$  (динамика изменения количества намываемого грунта), 1000 м<sup>3</sup>

Таблица 3

**Основные данные расчетов для рассмотренных инвестиционных проектов**

Индекс инвестиционного проекта	Срок службы рабочего колеса в часах чистой работы земснаряда	Стоимость РК, р.	Оптимальный срок службы РК в часах чистой работы земснаряда	Суммы инвестиционных и текущих затрат, отнесенные к объему, рассчитанные на оптимальный срок службы РК	Прибыль от продажи продукции через 3000 чистых часов работы земснаряда, тыс. р.
1	300	75000	270	0,1610	4912
2	500	125000	460	0,1556	4938
3	700	175000	660	0,1510	5053
4	1000	250000	950	0,1493	5085

Инвестиционные проекты с использованием РК из износостойкой стали со сроком их службы 500, 700 и 1000 ч чистой работы земснаряда дают эффект увеличения прибыли от продажи продукции относительно проекта с РК из обычной стали соответственно на 1, 2 и 4%, т.е. чем более износостойкое РК будет использовано, тем больший эффект будет получен. При этом повышается эффективность гидромеханизированного способа добычи и укладки в штабель нерудных строительных материалов за счет увеличения сезонной выработки земснарядов при сохранении высокого качества получаемой продукции.

Результаты решения поставленных задач приведены в табл. 3.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пеняскин Т. И. Оптимизация режимов эксплуатации грунтонасоса в условиях абразивного износа во взаимосвязи с коническим грохотом/Т. И. Пеняскин//Изв. вузов. Строительство и архитектура.— 1980.— № 1.— С. 126–132.
2. Попов Ю. А. Гидромеханизация в Северной строительной-климатической зоне/Ю. А. Попов, Д. В. Рощупкин, Т. И. Пеняскин.— Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982.— 224 с.
3. Попов Ю. А. Гидромеханизация земляных работ. Ч. 1: Теория процессов гидромеханизации: Учеб. пособие/Ю. А. Попов и др.— Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2000.— 84 с.
4. Попов Ю. А. Оптимизация процессов гидромеханизации земляных работ в современных условиях/Ю. А. Попов и др.//Изв. вузов. Строительство.— 2001.— № 9–10.— С. 77–84.
5. Свид. № 2005610545 об официальной регистрации программы для ЭВМ «ЗЕМСНАРЯД» Расчет проектной грунтопроизводительности земснарядов с обоснованием способов и параметров вывода грунтонасосов из нештатных ситуаций/Ю. А. Попов, В. С. Лаптев: Оpubл. 28.02.2005 г.
6. Юфин А. П. Гидромеханизация: Учеб. пособие для вузов/А. П. Юфин.— М.: Стройиздат, 1974.— 223 с.
7. Воронцовский А. В. Инвестиции и финансирование/А. В. Воронцовский.— СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 1998.— 528 с.

© Немчикова Л. А., 2008

Получено 22.04.08

**А. В. ЩЕРБАКОВ**, гл. инж. (ЗАО «Сибгидромехстрой», г. Новосибирск);  
**С. М. КУЗНЕЦОВ**, канд. техн. наук, доц. (Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск);  
**И. Л. ЧУЛКОВА**, канд. техн. наук, доц. (Сибирская автомобильно-дорожная академия, г. Омск)

## **ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ МАШИН ДЛЯ ДОБЫЧИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СПОСОБОМ ГИДРОМЕХАНИЗАЦИИ**

Предложена модель формирования комплексов машин для добычи строительных материалов способом гидромеханизации. С помощью этой модели можно оценить организационно-технологическую надежность работы одного или нескольких комплексов машин, работающих на одном участке.

Широкое применение гидротранспортные системы (комплексы) по сравнению с экскаваторами получили при разработке песчано-гравийных смесей в обводненных грунтах. Под гидротранспортной системой в области гидромеханизации земляных работ принято понимать земснаряд, работающий на одну трубопроводную транспортную линию. При этом практикой производства гидромеханизированных работ доказано, что включение в транспортную линию земснаряда перекачивающих станций уменьшает надежность системы в целом из-за резкого снижения коэффициента использования ее рабочего времени. При гидромеханизированной разработке природных месторождений песка или песчано-гравийных смесей перекачивающие станции не применяются из-за большого удорожания продукции. Примеров организации работ по замыву городских оврагов в России в последние несколько десятилетий также не было.

Впервые задача моделирования работы гидротранспортных систем была сформулирована А. П. Юфиным [1]. Ю. А. Поповым рекомендовано выбирать окончательную схему соединения гидротранспортной системы с помощью многовариантных технико-экономических расчетов [2].

Авторами предлагается производить формирование комплекса машин по модульному принципу, изложенному в [3]. Процесс формирования комплекса машин следует начать с создания комплектов. Под комплектом в данном случае принято понимать комплект вспомогательных машин и механизмов, обслуживающих земснаряд. Далее следует сформировать возможные варианты комплексов для производства работ способом гидромеханизации и рассчитать технические и экономические показатели каждого варианта. При этом основными показателями работы  $i$ -го комплекса машин должны быть средняя производительность ( $P_i$ ) и себестоимость ( $C_i$ ), а также их стандартные отклонения. Эти показатели можно определить с помощью вероятностной модели работы гидротранспортных систем [4, 5]. Составленная на основе данной модели программа «Gidropark» позволяет с помощью метода Монте-Карло формировать выборки заданного объема для любых комплексов машин, а также определять средние значения и стандартные отклонения, организационно-технологическую надежность и основные технико-экономические показатели работы комплексов.

В результате работы программы «Gidropark» имеем  $m$  видов комплексов, из которых сформируем модуль машин. Под модулем понимается несколько земснарядов, одновременно работающих параллельно на одном участке. Для эффективной работы гидротранспортных систем необходимо определить состав модуля, который обеспечит заданное значение се-

бестоимости производства работ ( $C_m$ ). При этом вариация эффективности работы модуля машин определяется по формуле

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_i \cdot n_j \cdot V_{ij}}{N^2}, \quad (1)$$

где  $V_{ij}$  — ковариация себестоимости работы комплексов машин  $i$ -го и  $j$ -го вида;

$n_i, n_j$  — соответственно количество комплексов  $i$ -го и  $j$ -го вида в парке машин;

$N$  — общее количество комплексов в модуле.

Поскольку  $n_i$  — количество комплексов  $i$ -го вида в модуле машин, то в сумме они составляют  $N$ :  $\sum_{i=1}^m n_i = N$ .

Следующим условием формирования модуля является выполнение им заданного объема работ в намеченные сроки. Следовательно, суммарная производительность модуля машин должна быть больше либо равна требуемой

$$\sum_{i=1}^m n_i \cdot \Pi_i \geq \Pi_m. \quad (2)$$

Задача по оптимизации модуля машин сводится к следующему:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_i \cdot n_j \cdot V_{ij}}{N^2} \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m n_i = N; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m n_i \cdot C_i = C_m; \quad (5)$$

$$n_1 \geq 0, \dots, n_n \geq 0; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m n_i \cdot \Pi_i \geq \Pi_m. \quad (7)$$

Если в формулы (3)–(6) ввести подстановки  $n_i = x_i \cdot N$ , где  $x_i$  — доля  $i$ -х комплексов в модуле машин, и избавиться от  $N$ , то получим задачу, аналогичную нелинейной задаче оптимизации портфеля. Эта задача была сформулирована и решена американским экономистом Г. Марковицем [6]. На основе этого решения авторами разработаны алгоритм и программное обеспечение «Park», позволяющее достаточно быстро сформировать оптимальный модуль машин и оценить его эффективность [7, 8].

В программе «Park» имеют место соответствующие доли комплексов в модуле машин. Далее по формуле (7) определяем требуемое количество комплексов в модуле

$$N \geq \frac{\Pi_m}{\sum_{i=1}^m n_i \cdot \Pi_i}. \quad (8)$$

Затем рассчитываем количество комплексов  $i$ -го вида в модуле машин  $n_i = x_i \cdot N$ . По формуле (7) проверяем, сможет ли модуль выполнить

заданный объем работ в намеченный срок, и рассчитываем номенклатуру машин в модуле.

Предложенная выше методика формирования модуля машин для производства земляных работ способом гидромеханизации позволяет сформировать и оценить экономическую эффективность, организационно-технологическую надежность и степень риска от вложения средств в создание соответствующего модуля машин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юфин А. П. Гидромеханизация / А. П. Юфин. — М.: Стройиздат, 1974. — 224 с.
2. Попов Ю. А. Инженерные основы регулирования и оптимизации результатов работ земснарядов / Ю. А. Попов, Д. В. Рощупкин, Т. И. Пеняскин. — Новосибирск: НИСИ, 1976. — 68 с.
3. Луцкий С. Я. Эффективность механизации транспортного строительства / С. Я. Луцкий, В. С. Смирнов. — М.: Транспорт, 1982. — 191 с.
4. Кузнецов С. М. Вероятностная модель работы многоступенчатых гидротранспортных систем / С. М. Кузнецов, Е. В. Лизунов, А. В. Щербаков // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 9. — С. 33–41.
5. Свид. № 6863 об отраслевой регистрации разработки «Прогнозирование показателей работы многоступенчатых гидротранспортных комплексов» / С. М. Кузнецов, Е. В. Лизунов, А. В. Щербаков: Оpubл. 07.09.2006 г.
6. Кузнецов С. М. Автоматизация формирования портфеля ценных бумаг / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова, Н. А. Сироткин // Экономика ж. д. — 2006. — № 9. — С. 73–77.
7. Свид. № 6687 об отраслевой регистрации разработки «Формирование парка строительных машин» / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова: Оpubл. 14.08.2006 г.
8. Кузнецов С. М. Автоматизированная система формирования парка строительных машин / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова, А. Д. Суворов и др. // Жилищное строительство. — 2007. — № 3. — С. 8–10.

© Щербаков А. В., Кузнецов С. М., Чулкова И. Л., 2008

Получено после доработки 05.05.08

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.35

**Б. М. ГРИШИН**, д-р техн. наук, проф., **С. Ю. АНДРЕЕВ**, канд. техн. наук, проф., **М. В. БИКУНОВА**, канд. техн. наук, доц., **С. В. ИШЕВ**, асп. (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВОЗВРАТНОГО АКТИВНОГО ИЛА АЭРОТЕНКОВ**

Рассмотрена существующая технологическая схема биологической очистки сточных вод с использованием электрогидродинамических устройств (ЭГДУ) для обработки возвратного активного ила аэротенков. Проанализированы недостатки в работе существующих ЭГДУ и предложена новая конструкция устройства для обеспечения эффективного перемешивания потока иловой смеси с кислородом воздуха совместно с электроактивацией ила. Внедрение ЭГДУ новой конструкции позволило улучшить качество биологической очистки сточных вод в аэротенках.

Интенсификация биологической очистки городских сточных вод в аэротенках может осуществляться различными способами. Одним из таких способов является насыщение возвратного активного ила аэротенков воз-



духом и обработка полученной иловоздушной смеси в неоднородном электрическом поле с использованием электрогидродинамических устройств (ЭГДУ). В работе [1] была рассмотрена технология, предусматривающая использование энергии рециркуляционного насоса для смешения потока возвратного ила с атмосферным воздухом в струйном эжекторе (рис. 1, а). Далее под остаточным напором полученная водовоздушная смесь поступала в ЭГДУ, состоящее из входной камеры и ствола, предназначенного для создания вихревого потока с относительно высокой турбулизацией, а также для его обработки электрическим током. Обработанный таким образом возвратный ил направлялся в начало аэротенка, где смешивался со сточными водами для осуществления процесса биологической очистки.

Производственные испытания ЭГДУ показали его достаточно высокую степень влияния на эффективность процессов окисления органических примесей и аммонийного азота в аэротенке [1, 2]. Однако в процессе эксплуатации ЭГДУ был выявлен целый ряд его конструктивных недостатков. Последовательное расположение катодных и анодных участков на стволе ЭГДУ приводило к частому «пробиванию» кольцевых диэлектрических прокладок и требовало их постоянной замены, что, в свою очередь, было связано со значительными неудобствами при осуществлении ремонтных работ.

Недостатком ЭГДУ с точки зрения гидродинамики являлась недостаточно высокая интенсивность перемешивания иловоздушного потока из-за отсутствия местных сопротивлений, которые бы обеспечивали достаточный уровень массообмена в стволе. Кроме того, наличие струйного эжектора в технологической схеме обработки возвратного ила приводило

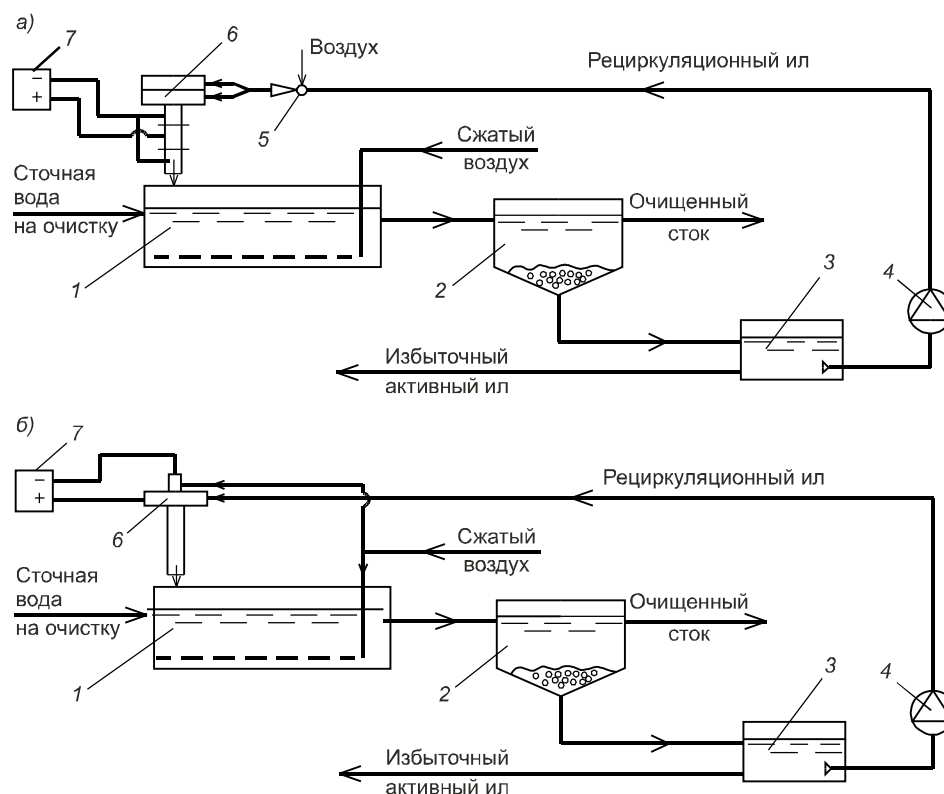


Рис. 1. Схемы обработки возвратного ила аэротенков

а — с ЭГДУ старой конструкции; б — с ЭГДУ новой конструкции; 1 — аэротенк; 2 — вторичный отстойник; 3 — иловый резервуар; 4 — рециркуляционный насос; 5 — эжектор; 6 — ЭГДУ; 7 — источник постоянного тока

к значительному увеличению потерь напора перед ЭГДУ и существенно-му снижению (до 20–25%) подачи рециркуляционного насоса, что уменьшало дозу активного ила и ухудшало кинетику окисления загрязнений в аэротенке. С целью устранения указанных недостатков была поставлена задача разработки новой конструкции ЭГДУ, отвечающей следующим требованиям:

1) обеспечение подачи в поток возвратного активного ила максимально возможного количества кислорода воздуха без ухудшения условий работы центробежного рециркуляционного насоса;

2) создание режима интенсивного перемешивания потока иловой смеси с воздухом для обеспечения высоких массообменных характеристик системы «пузырек воздуха — жидкость — бактериальная клетка ила»;

3) осуществление активации клеток ила электрическим током с помощью эффективно действующей и удобной в эксплуатации электродной системы.

Как показали гидравлические испытания новой конструкции ЭГДУ, первое требование выполняется за счет организации подачи сжатого воздуха из штатной системы аэрации аэротенка непосредственно в корпус ЭГДУ (рис. 1, б). Режим интенсивного перемешивания наиболее целесообразно создавать в стволе ЭГДУ с использованием последовательно установленных дисков или диафрагм.

Таким образом, корпус новой конструкции ЭГДУ функционально разделяется на две части или зоны (рис. 2) — организации вращательного движения иловой жидкости и подачи сжатого воздуха (верхняя зона между сечениями 1-1 и 2-2) и зоны смешения иловой жидкости с воздухом, где устанавливается центральный опорный стержень 5 с дисками 6 для турбулизации потока (нижняя часть ЭГДУ между сечениями 2-2 и 3-3). Электрообработку иловой смеси целесообразно производить в центральной части ЭГДУ на границе между зонами, размещая центральный электрод (катод) 8 в диэлектрической трубке подачи сжатого воздуха 7 (см. рис. 2). Такой прием позволяет предотвратить возникновение короткого замыкания между центральным электродом и корпусом ЭГДУ и существенно облегчить эксплуатацию установки. Для обеспечения подачи более компактной струи на центральные диски 6 нижней части аппарата на границе раздела двух зон устраивается разделительная диафрагма 4.

Конструктивные параметры гидродинамической установки определяются, прежде всего, гидравлическим расчетом.

В стволе ЭГДУ должны обеспечиваться условия для дробления не только пузырьков воздуха, но и хлопков активного ила с целью увеличения их удельной поверхности и, следовательно, скорости окисления загрязнений. Данные условия могут быть обеспечены в том случае, если масштаб наименьших турбулентных вихрей  $\lambda_0$  будет сопоставим с радиусом  $r_x$  хлопка ила ( $r_x = 1 \cdot 10^{-4}$  м) [3]. Масштаб наименьших вихрей, по Колмогорову — Обухову, может быть выражен через затраты энергии на турбулизацию

$$\lambda_0 = (v_c^3 / \epsilon_0)^{1/4}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — среднее значение мощности, рассеиваемой в единице массы перемешиваемой среды, Вт/кг;

$\epsilon_c$  — коэффициент кинематической вязкости водовоздушной смеси, м<sup>2</sup>/с.

Величина  $\epsilon_0$  связана с удельными затратами мощности  $N_{уд}$  (Вт/м<sup>3</sup>) на перемешивание соотношением

$$N_{уд} = \epsilon_0 \cdot \rho_c, \quad (2)$$

где  $\rho_c$  — плотность водовоздушной смеси.

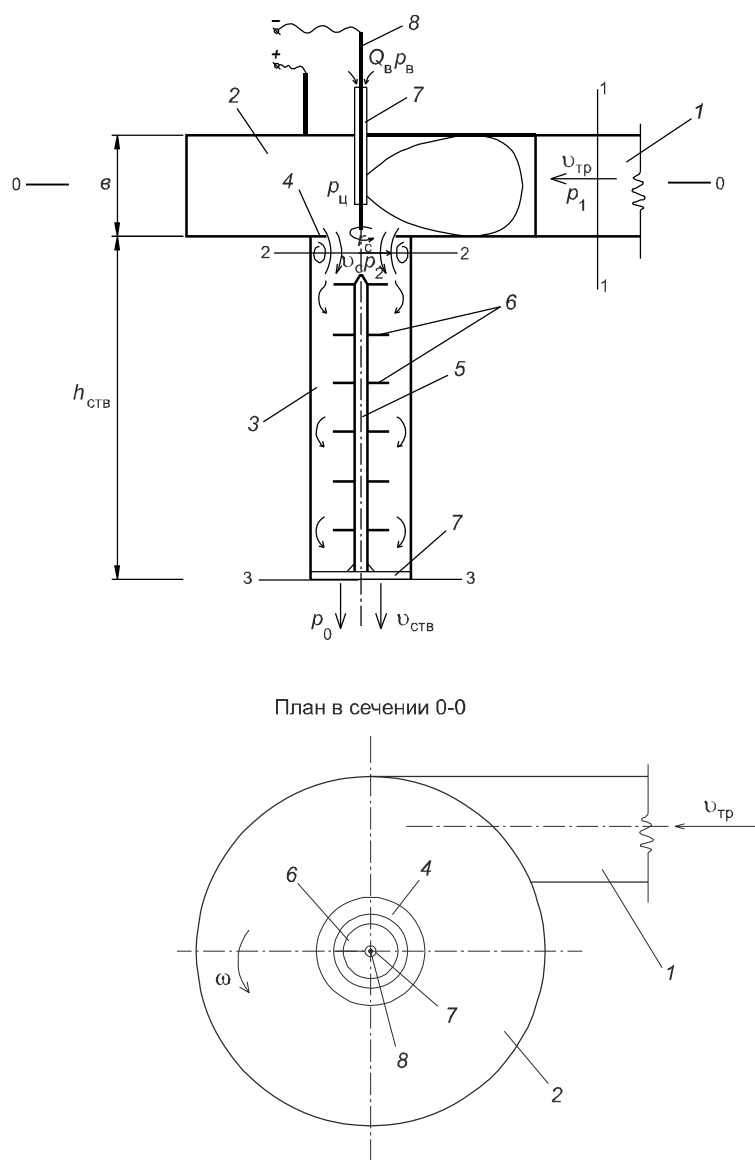


Рис. 2. Расчетная схема для определения гидродинамических характеристик аппарата обработки возвратного ила  
 1 — подающий трубопровод; 2 — входная камера; 3 — ствол; 4 — разделительная диафрагма; 5 — опорный стержень; 6 — внутренние диски; 7 — патрубок подачи сжатого воздуха; 8 — центральный электрод

Кинематическая вязкость и плотность водовоздушной смеси в стволе ЭГДУ зависят от степени насыщения иловой жидкости воздухом.

Плотность водовоздушной смеси с определенными допущениями определяется по формуле [4]

$$\rho_c = \rho_l \cdot (1 - \varphi), \quad (3)$$

где  $\rho_l$  — плотность жидкой фазы,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\varphi$  — коэффициент газосодержания смеси или объемная концентрация дисперсной фазы (воздуха).

$$\varphi = W_B / W_c, \quad (4)$$

где  $W_B$  и  $W_c$  — объемы воздуха и смеси,  $\text{м}^3$ .

Коэффициент кинематической вязкости водовоздушной смеси находится по эмпирической зависимости при  $\varphi \leq 0,15$  [4]

$$\nu_c = \nu \frac{1 + 9/2 \cdot \varphi}{1 - \varphi}, \quad (5)$$

где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости жидкой фазы,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Таким образом, для определения масштаба наименьших вихрей  $\lambda_0$  по (1) при известном газонасыщении иловой смеси необходимо знать среднее значение удельной мощности  $N_{\text{уд}}$ , которая может быть найдена по уравнению

$$N_{\text{уд}} = \frac{E}{V_c \cdot t}, \quad (6)$$

где  $E$  — расход энергии на перемешивание, Дж;

$V_c$  — объем камеры смешения (ствола ЭГДУ),  $\text{м}^3$ ;

$t$  — время смешения иловой жидкости с воздухом в стволе ЭГДУ, с.

Расход энергии на перемешивание в стволе высотой  $h_{\text{ств}}$  между сечениями 2-2 и 3-3 (см. рис. 2) определяется из соотношения

$$E = (\Delta p_c + \rho_c g h_{\text{ств}}) V_c = (\Delta p_c + E_{\text{п.уд}}) V_c, \quad (7)$$

где  $\Delta p_c$  — располагаемые потери давления,  $\Delta p_c = p_2 - p_0$ , Па;

$E_{\text{п.уд}}$  — располагаемая энергия положения;

$p_2$  — давление жидкости в сечении 2-2, Па.

Величина  $p_2$  определяется гидравлическим расчетом из уравнения баланса энергии потока между сечениями 1-1 и 2-2. Основное влияние на значение  $p_2$  оказывают давление жидкости  $p_1$  в сечении 1-1, а также геометрические размеры входной камеры.

Для случая истечения в атмосферу  $p_0 = p_{\text{атм}} = 0$  и  $\Delta p_c = p_2$ .

Тогда

$$E = (p_2 + E_{\text{п.уд}}) V_c. \quad (8)$$

Расчетные потери давления на перемешивание должны быть несколько меньше располагаемых и в общем случае определяются по соотношению

$$\Delta p_c^{\text{расч}} = \rho_c \left( \xi_m + \xi_{\text{тр}} \right) \frac{v_{\text{ств}}^2}{2}, \quad (9)$$

где  $\xi_m$  и  $\xi_{\text{тр}}$  — коэффициенты местных сопротивлений и потерь на гидравлическое трение по длине ствола;

$v_{\text{ств}}$  — скорость выхода иловой смеси из ствола ЭГДУ,  $v_{\text{ств}} = 1,8 - 2,2 \text{ м/с}$ .

При незначительной длине ствола ЭГДУ ( $l < 1 \text{ м}$ )  $\xi_m \gg \xi_{\text{тр}}$  последним значением в расчетах можно пренебречь. Тогда

$$\Delta p_c^{\text{расч}} = \rho_c \xi_m \frac{v_{\text{ств}}^2}{2}. \quad (10)$$

Коэффициент  $\xi_m$  для последовательно расположенных дисков  $b$  (см. рис. 2) находится по соотношению, применяемому для расчета центральных вставок гидравлического трубчатого смесителя [5] при расстоянии  $l_b$  между вставками ( $r_{\text{ств}} \leq l_b \leq 2r_{\text{ств}}$ ):

$$\xi_m = 1,78 \cdot n_b \cdot \frac{S_b}{S_c} \left( \frac{S_c}{S_c - S_b} \right)^2 = 1,78 \cdot n_b \cdot K_b, \quad (11)$$

где  $n_b$  — количество вставок (внутренних дисков);

$S_b$  — площадь вставки,  $\text{м}^2$ ;

$S_c$  — площадь поперечного сечения ствола ЭГДУ,  $\text{м}^2$ ;

$K_b$  — коэффициент стеснения площади поперечного сечения ствола.

Для предотвращения подпора иловой смеси в сечении 2-2 ствола ЭГДУ и с учетом соотношений (10) и (11) запишем условие для нормальной работы нижней зоны ЭГДУ в режиме смешения

$$\Delta p_c^{\text{расч}} = \rho_c \cdot 1,78 \cdot n_v \cdot K_v \frac{v_{\text{ств}}^2}{2} \leq p_2 + E_{\text{п.уд.}} \quad (12)$$

Данное условие является определяющим для выбора количества и размеров внутренних вставок (дисков), размещаемых в стволе вихревого аппарата. Полученное расчетное значение  $\Delta p_c^{\text{расч}}$  подставляется в формулу (8) для нахождения фактической энергии, затрачиваемой на перемешивание.

Далее по формулам (6), (2) и (1) определяются соответственно величины  $N_{\text{уд}}$ ,  $r_0$  и  $r_x$ . При невыполнении неравенства  $r_0 \geq r_x$  задаются новые значения давления на входе  $p_1$  или другие размеры входной камеры и ствола ЭГДУ.

Данные расчеты позволяют сконструировать вихревые аппараты необходимых размеров, а также найти требуемые технологические характеристики  $Q-H$  рециркуляционных насосов.

Сравнительные производственные испытания ЭГДУ различных конструкций были проведены на канализационных очистных сооружениях г. Заречный Пензенской области производительностью 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут. На двух секциях аэротенков были установлены новые ЭГДУ, на двух остальных — ЭГДУ старой конструкции. Подача возвратного ила на все группы ЭГДУ через общий магистральный трубопровод производилась двумя параллельно работающими центробежными насосами марки СМ 200-150-400 ( $n = 960$  об./мин) с напором 20 м и общим расходом до 440 м<sup>3</sup>/ч. Значение избыточного давления в начале всех распределительных линий, подводящих возвратный ил к установкам, поддерживалось постоянным на уровне  $0,7 \cdot 10^5$  Па для всех секций за счет открытия или закрытия входных задвижек на линиях.

Испытания показали, что в двух секциях аэротенков с новыми ЭГДУ за счет их меньшего гидравлического сопротивления расход возвратного ила возрос с 80 до 110 м<sup>3</sup>/ч и соответственно доза ила в аэрационном бассейне увеличилась с 2 до 2,5 г/л. В данных секциях остаточное содержание в биологически очищенных сточных водах БПК снизилось с 10–12 до 7–8 мг/л, аммонийного азота с 5–7 до 2,5–3 мг/л, фосфатов с 0,8–1,0 до 0,4–0,6 мг/л по сравнению с двумя другими секциями, где работали ЭГДУ старых конструкций.

Таким образом, совершенствование конструкций ЭГДУ и их гидравлического режима работы позволило не только улучшить качество биологической очистки стоков, но также упростить и удешевить эксплуатацию аэротенков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С. Ю. Электроактивационная обработка возвратного ила в системе соосных электродов как способ интенсификации работы аэротенков/С. Ю. Андреев // Изв. вузов. Строительство.— 2006.— № 10.— С. 51–58.
2. Андреев С. Ю. Обработка возвратного активного ила в вихревом электрогидродинамическом устройстве/С. Ю. Андреев, Б. М. Гришин // Водоснабжение и санитарная техника.— 2006.— № 3.
3. Евилевич М. А. Оптимизация биохимической очистки сточных вод/М. А. Евилевич, Л. Н. Брагинский.— Л.: Стройиздат, 1979.
4. Клейтон С. Эмульсии, их теория и технические применения/С. Клейтон. — М.: Иностр. лит., 1960.
5. Вейцер Ю. М. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки воды/Ю. М. Вейцер, Д. М. Минц.— М.: Стройиздат, 1984.

© Гришин Б. М., Андреев С. Ю., Бикунова М. В., Ишев С. В., 2008

Получено 22.04.08

Т. И. ХАЛТУРИНА, канд. хим. наук, проф., Т. М. РУДЕНКО, асп., О. В. ЧУР-  
БАКОВА, канд. техн. наук, доц. (Институт градостроительства, управления  
и региональной экономики, Политехнический институт ФГОУ ВПО «Сибир-  
ский федеральный университет», г. Красноярск)

## ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ ЭМУЛЬГИРОВАННЫЕ НЕФТЕПРОДУКТЫ

Представлены данные экспериментальных исследований технологии электрохимической обработки сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты, по определению параметров процесса при высоком эффекте очистки и минимизации энергозатрат и возможности его интенсификации.

Решение проблемы очистки сточных вод от нефтепродуктов в настоящее время приобрело важнейшее значение для охраны природных водоемов.

Сложную проблему представляет обезвреживание сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты, которые входят в состав смазочно-охлаждающих жидкостей. Основным способом разрушения эмульсий является ликвидация эмульгированной способности применяющихся эмульгаторов, для чего широко используется коагуляция [1].

Для обоснования основных технологических параметров стабильного процесса очистки и определения оптимальных режимов обработки был изучен процесс электрокоагуляции при использовании различной формы тока.

Для электрохимического коагулирования коллоидно-дисперсных систем используют постоянный электрический ток [1]. Экспериментальные исследования по определению оптимальных режимов обработки постоянным током были проведены по рототабельному плану второго порядка Бокса–Хантера.

В качестве более значимых были приняты:  $X_1$  — исходная концентрация нефтепродуктов, мг/дм<sup>3</sup>;  $X_2$  — плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $X_3$  — производительность, л/мин.

В число оценочных критериев были включены:  $Y_1$  — остаточная концентрация нефтепродуктов, мг/дм<sup>3</sup>;  $Y_2$  — расход электроэнергии, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования приведены в табл. 1.

Обработка экспериментальных данных позволила получить адекватные уравнения регрессии, адекватность которых проверялась по критерию Фишера.

$$\dot{Y}_1 = 9,4 + 2,1X_1 - 4,8X_2 - 0,95X_1X_2 - 1,9X_1X_3 + 2,1X_2X_3 - 1,1X_3^2;$$

$$\dot{Y}_2 = 4,75 + 4,16X_2 - 3,24X_3 - 0,23X_1X_2 + 0,27X_1X_3 - \\ - 1,96X_2X_3 + 0,56X_2^2 + 1,41X_3^2.$$

Таблица 1

	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$\Delta X$	300	15	1
0	700	30	2
+1	1000	45	3
-1	400	13	1
+1,68	1204	60	3,68
-1,68	196	3	0,3

Таблица 2

	-2,378	-1	0	+1	+2,378	$\Delta$
$X_1$	0,21	1	1,5	2	2,69	0,5
$X_2$	0,12	1,5	2,5	3,5	4,9	1,5
$X_3$	32,44	60	80	100	127,6	20
$X_4$	0	1	30	60	101,3	30
$X_5$	100	513	813	1113	1426	300
$X_6$	2,86	7	10	13	17,13	3



Установлено, что при обработке постоянным током нефтесодержащих стоков наблюдается недостаточная степень коагуляции частиц, так как при прохождении постоянного тока через стоки, содержащие эмульгированные нефтепродукты, отрицательно заряженные частицы масла двигаются под действием постоянного электрического поля к положительно заряженной пластине (аноду), осаждаются на ней, препятствуют выходу ионов  $Al^{3+}$ . Кроме замедления анодного процесса повышается сопротивление контакта анод-раствор и, следовательно, увеличивается расход электроэнергии.

Данные эксперимента при использовании переменного тока для обработки стоков показали, что имеет место значительное снижение выхода металла по току, в сравнении с пропусканием постоянного тока. Это объясняется тем, что при быстрых изменениях плотности тока (50 раз в секунду) перенапряжение не успевает мгновенно принимать значения, соответствующие значениям плотности тока в стационарных условиях. Кроме того, при обработке переменным током определенное количество электроэнергии затрачивается на перезарядку емкости двойного электрического слоя. Поэтому использование при электрохимическом коагулировании переменного тока нецелесообразно при обработке сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты.

Известно [3], что электрокоагуляционную обработку сточных вод можно проводить реверсивным переменным током с одинаковой длительностью и амплитудой положительного и отрицательного импульса, частота которого определяется задаваемым временем переполюсовки пластин. Установлено, что реверсивный переменный ток позволяет уменьшить расход электроэнергии, однако при этом снижается эффект очистки нефтесодержащих сточных вод с увеличением продолжительности непрерывной работы электродов.

Для усиления действия электродов и снижения электрозатрат на электрообработку сточных вод известно применение асимметричного переменного тока [4], который позволяет элиминировать адсорбцию частиц масел на поверхности электрода и стабилизировать процесс растворения металла.

В настоящей работе для получения оптимальных технологических режимов процесса электрообработки асимметричным переменным током проводилось планирование эксперимента, позволившее получить уравнения регрессии.

В качестве варьируемых факторов были приняты:  $X_1$  — амплитуда прямого тока, А;  $X_2$  — амплитуда обратного тока, А;  $X_3$  — период, сек;  $X_4$  — длительность обратного тока, с;  $X_5$  — концентрация нефтепродуктов в исходной воде, мг/дм<sup>3</sup>;  $X_6$  — время контакта, мин.

Оценочными критериями приняты:  $Y_1$  — содержание нефтепродуктов в очищенной воде, мг/дм<sup>3</sup>;  $Y_2$  — удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования приведены в табл. 2.

$$Y_1 = 1,55 - 0,26X_1 - 0,102X_3 + 0,144X_4 + 0,12X_5 + 0,203X_1X_2 + \\ + 0,267X_1X_4 - 0,197X_2X_5 - 0,1X_2X_6 + 0,11X_3X_4 - 0,37X_3X_5 - 0,12X_3X_6 + \\ + 0,25X_4X_5 - 0,21X_4X_6 + 0,133X_1^2 + 0,26X_2^2 + 0,19X_6^2; \\ Y_2 = 23,4 + 5,5X_1 + 12,96X_2 - 3,55X_3 + 10,8X_4 - 3,3X_5 + 6X_6 + 1,81X_1X_2 + \\ + 3,87X_1X_4 - 1,83X_1X_5 - 3,32X_2X_3 + 10,98X_2X_4 - 2,24X_2X_5 - \\ - 1,81X_2X_6 - 4X_3X_4 - 2,47X_3X_6 - 3,6X_4X_5 + 2,25X_4X_6 + 2,75X_2^2.$$

Анализ уравнений регрессий показал, что при обработке асимметричным током маслоэмульсионных стоков на остаточную концентрацию

нефтепродуктов в большей степени влияет амплитуда прямого тока, длительность обратного тока и исходная концентрация нефтепродуктов. Остаточная концентрация нефтепродуктов снижается с увеличением амплитуды прямого тока и его длительности, уменьшением длительности обратного тока и исходной концентрации нефтепродуктов. На расход электроэнергии заметно влияет амплитуда обратного тока, его длительность, время контакта, и в меньшей степени амплитуда прямого тока и исходная концентрация нефтепродуктов.

По уравнениям регрессии была проведена оптимизация диссоциативно-шаговым методом и получены области совместной оптимальности по выходным параметрам, которые позволяют регулировать процесс электрокоагуляционной очистки нефтесодержащих сточных вод (рис. 1).

В табл. 3 приведено сравнение результатов экспериментальных исследований по электрообработке переменным, постоянным, реверсив-

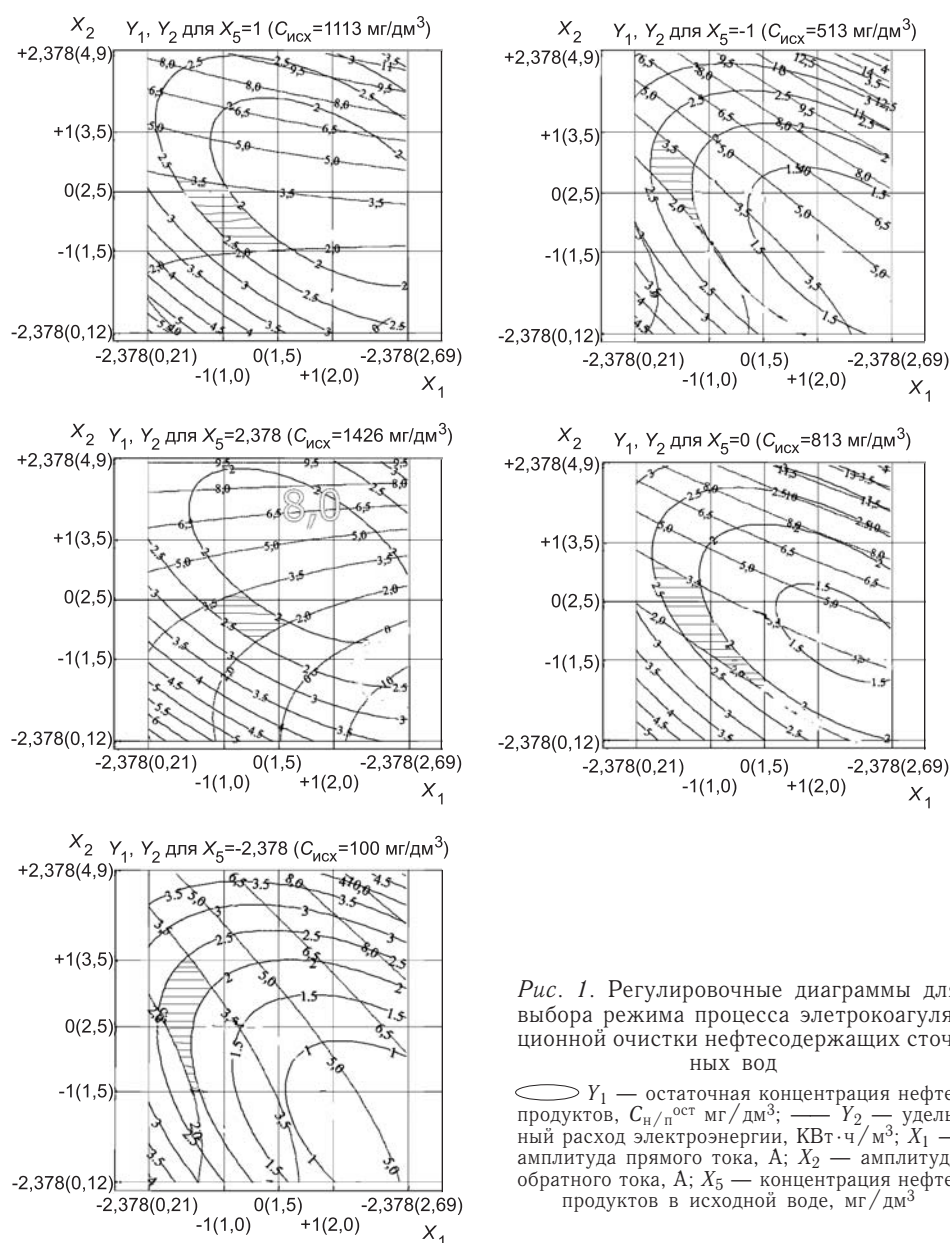


Рис. 1. Регулировочные диаграммы для выбора режима процесса электрокоагуляционной очистки нефтесодержащих сточных вод

$Y_1$  — остаточная концентрация нефтепродуктов,  $C_{н/п}^{ост}$  мг/дм<sup>3</sup>;  $Y_2$  — удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $X_1$  — амплитуда прямого тока, А;  $X_2$  — амплитуда обратного тока, А;  $X_5$  — концентрация нефтепродуктов в исходной воде, мг/дм<sup>3</sup>

ным и асимметричным током. Выявлено, что высокий эффект очистки (99,0%) достигается с применением асимметричного тока при меньших затратах электроэнергии ( в 2 раза), что является следствием эффективного растворения анода.

Преимущество применения асимметричного тока заключается в том, что эта форма тока позволяет проводить процесс электрокоагуляции в стабильном режиме (рис. 2). Это объясняется механизмом действия асимметричного переменного тока, при котором амплитуда и длительность импульсов отрицательной полярности должны быть, с одной стороны, достаточно большими, чтобы обеспечить равномерный эффективный электрохимический процесс по всей поверхности электрода. С другой стороны, они не должны превышать предельного значения, чтобы поверхностные участки положительного электрода не достигали величины потенциала выделения кислорода. Амплитуда импульса отрицательной полярности должна быть в 2–4 раза больше амплитуды положительной полярности, чтобы обеспечить эффективное разрушение масляной пленки, длительность импульса при этом по сравнению с импульсом положительной полярности может быть меньше в 3–60 раз и выбирается в зависимости от концентрации нефтепродуктов в сточных водах.

С целью снижения расхода электроэнергии при высоком эффекте очистки изучалась возможность рециркуляции части обрабатываемых маслоэмульсионных сточных вод при обработке различной формой тока. Экспериментальные исследования показали, что при применении 30% рециркуляции при электрообработке постоянным током расход электроэнергии снижается до  $W = 1,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ , при реверсивном токе требуются меньшие затраты электроэнергии —  $W = 1,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ , при использовании асимметричного тока затраты электроэнергии составляют  $W = 0,54 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ .

Альтернативным способом очистки сточных вод является гальванокоагуляция, которая не требует расхода листового металла и значительных затрат электроэнергии. Исследования проводили в гальванокоагуляторе, где использовали в качестве активной загрузки различные гальванопары (Al–АУ, Al–кокс, Fe–кокс, Fe–АУ, где АУ — активированный уголь марки БД).

Таблица 3

Обработка постоянным электрическим током				Обработка постоянным и переменным неоднородным электрическим током				Обработка реверсивным электрическим током				Обработка асимметричным переменным током			
Исходная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Остаточная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч / м <sup>3</sup>	Эффект очистки, %	Исходная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Остаточная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч / м <sup>3</sup>	Эффект очистки, %	Исходная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Остаточная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч / м <sup>3</sup>	Эффект очистки, %	Исходная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Остаточная концентрация нефтепродуктов, мг / дм <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч / м <sup>3</sup>	Эффект очистки, %
400	180,0	2,3	55,0	400	192,0	2,3	52,0	400	52,0	2,3	88,0	400	28	2,3	93,0
700	60,6	1,4	91,3	700	52,5	1,4	92,5	700	92,5	1,4	93,0	700	28	1,4	96,0
1000	70,0	6,6	93,0	1000	110,0	6,6	89,0	1000	89,0	6,6	95,0	1000	10	6,6	99,0

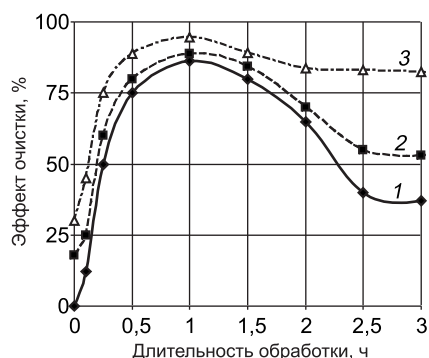


Рис. 2. Зависимость эффекта очистки при электрообработке различной формой тока от длительности обработки  
1 — постоянный ток; 2 — реверсивный ток;  
3 — асимметричный ток

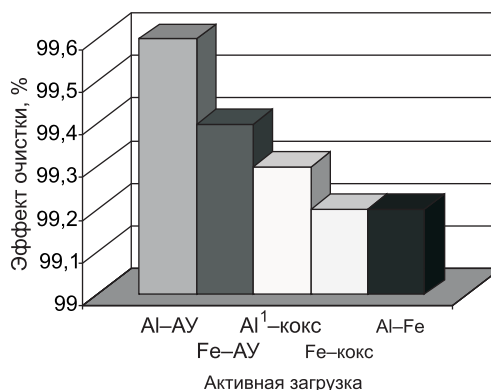


Рис. 3. Зависимость эффекта очистки масло-эмульсионных стоков от активной загрузки гальванокоагулятора

При сравнении экспериментальных исследований (рис. 3) установлено, что эффективность гальванокоагуляционной очистки нефтесодержащих стоков при использовании гальванопары Al-AU выше и достигает 98,5–99,7% в зависимости от исходной концентрации нефтепродуктов.

С целью изучения возможности снижения продолжительности гальванокоагуляции при проведении процесса в стабильном режиме исследовалось наложение внешнего электрического поля при обработке асимметричным переменным током. Установлено, что высокий эффект очистки (99,5%) может быть достигнут при меньшем времени контакта (в 2,5 раза), что позволяет значительно уменьшить габариты гальванокоагуляционного модуля.

Данные экспериментальных исследований были использованы для разработки технологических схем электрохимической очистки сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. И. Методы очистки производственных сточных вод: Справочное пособие / А. И. Жуков, И. Л. Монгайт, Н. Д. Родзилер. — М.: Стройиздат, 1977. — 80 с.
2. Шмигель В. В. Экспериментальные исследования электрохимической очистки оборотной воды нефтеперерабатывающего завода / В. В. Шмигель, В. Д. Дмитриев // Водные ресурсы. — 1981. — № 1. — С. 194–197.
3. Якименко Г. Я. О депассивации электродов при электрокоагуляционной очистке сточных вод / Г. Я. Якименко, С. П. Новикова // Вестник ХПИ. — Харьков. — 1978. — С. 27–30.
4. А.с. 981240 СССР, МКИ С02F 1/46. Способ очистки сточных вод от нефтепродуктов / Т. И. Халтурина, Т. Я. Пазенко, Г. М. Зограф и др. — Бюл. № 46; Оpubл. 18.01.1980. — 16 с.

© Халтурина Т. И., Руденко Т. М., Чурбакова О. В., 2008

Получено 08.04.08