

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

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

№ 7 (667)
Июль 2014 г.

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

Редакционная коллегия:

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

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

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.07.14. Формат 70×108¹/16
Усл. печ. л. 10,68+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6550

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Нгуен Чонг Там. Оценка вибраций тоннеля при движении поездов 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Калашников В.И., Сузальцев О.В., Дрянин Р.А., Сехпосян Г.П. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения 11

Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В. Влияние возраста высокопрочного дисперсно-армированного шлакопемзобетона на его прочностные и деформативные характеристики 22

Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Куприяшкина Е.И. Изучение процессов повреждения цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой, растворами хлористоводородной кислоты 32

Сапелин А.Н., Елистраткин М.Ю. Эффективный керамический материал для решения специальных задач в малоэтажном строительстве 39

Логанина В.И., Пышкина И.С. Разработка технологии синтеза добавки на основе гидросиликатов кальция для сухих строительных смесей 46

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Дзюбенко Л.Ф., Кожевников А.А. Оценка фильтрационного режима хвостохранилища в процессе его заполнения	50
Атавин А.А., Яненко А.П. О скоростях движения судна в камере судоходного шлюза при расчете его пропускной способности	60
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Баймачев Е.Э. Определение минимальных затрат экспергии на отопление и естественную вентиляцию жилых зданий	67
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Попов Д.А. Пневматический ударный механизм с многоканальной трубкой и его физико-математическое описание	74
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Евграфова И.М., Шубина Е.В., Лаврусевич А.А. Эколого-экономическая оценка хозяйственной деятельности. Практика и перспективы	83
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Калугин Ю.Б. Теоретические предпосылки моделирования воздействия дестабилизирующих факторов на технологический процесс	88
Кургузов В.Д. Численное моделирование напряженного состояния балки-стенки	94
Бадьин Г.М., Мосаков Б.С. Комплексная оценка технологичности возводимых зданий и сооружений	103
ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО	
Саргсян А.Е., Гришин А.С. Оценка эффективности реализации свайных фундаментов на примере сооружения РО Балаковской АЭС	112

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

N 7 (667)

July 2014

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

Editorial Board:

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS

V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.

V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS

V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.

V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)

G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)

Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.

L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.

Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS

Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.

V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS

Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.

Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008

Phone number/fax +7 (383) 266 28 59

 www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

THE THEORY OF ENGINEERING SRTUCTURES

Nguyen Chong Tam. Evaluation of tunnel vibrations generated by trains

5

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Kalashnikov V.I., Suzdal'tsev O.V., Dryanin R.A., Sekhposyan G.P. The role of dispersed and fine-grained filler in concrete of new generation

11

Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V. Influence of age high performance fiber reinforced slag concrete at its strength and deformation characteristics

22

Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K., Kupriyashkina E.I. Study of damage process of cement stone, filled with zeolite-containing rocks, solutions of hydrochloric acid

32

Sapelin A.N., Elistratkin M.Yu. Effective ceramic material for special tasks in low-rise building

39

Loganina V.I., Pyshkina I.S. Development of the technology of synthesis based supplements silicate calcium for dry construction mixtures

46

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Dzyubenko L.F., Kozhevnikov A.A. Seepage conditions estimation of a tailings dam during its filling ..

50

Atavin A.A., Yanenko A.P. About speeds of movement of a vessel in the camera of a navigable lock at calculation of its capacity	60
SANITARY ENGINEERING	
Baimachev E.E. Definition of the minimum expenses of the exergy on heating and natural ventilation of residential buildings	67
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Dedov A.S., Krutikov E.I., Popov D.A. Pneumatic percussion mechanism with multi-channel receiver and physical mathematical description	74
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Evgrosova I.M., Shubina E.V., Lavrusevich A.A. Environmental and economic assessment of economic activity. Practice and prospects	83
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Kalugin Yu.B. Theoretical prerequisites of modelling of influence of destabilizing factors on technological process	88
Kurguzov V.D. Numerical modelling of the stress-strain state of the beam wall	94
Bad'in G.M., Mosakov B.S. Integrated assessment of versatility with regards to building structures	103
MANUFACTURING APPLICATION OF SCIENTIFIC DEVELOPMENTS	
Sargsyan A.E., Grishin A.S. Efficiency Estimation of Pile Foundation by the Example of the Reactor Building of the Balakovo Nuclear Power Plant	112

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.131.55:624.042.8

НГУЕН ЧОНГ ТАМ

ОЦЕНКА ВИБРАЦИЙ ТОННЕЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДОВ

Для оценки влияния скоростей движения поездов в тоннелях на уровни создаваемых вибраций рассматривается модель балки Эйлера — Бернулли на вязкоупругом основании, подвергаемой действию подвижной нагрузки. Подвижная нагрузка представляется в виде сосредоточенных сил (давлений колес на рельс). Для решения используется преобразование Фурье и аппарат обобщенных функций. При определении прогибов, скоростей и ускорений произвольной точки балки применяется обратное преобразование Фурье. Для вычисления интегралов используется теория вычетов (теорема Коши).

Ключевые слова: вибрация, балка, вязкоупругое основание, преобразование Фурье, обобщенные функции, вычеты.

Вибрация тоннелей и расположенных вблизи линий метро зданий при эксплуатации тоннелей неглубокого заложения является серьезной проблемой в городских условиях. Вибрация тоннеля при движении поездов вызывается следующими причинами: в результате движения постоянных сил (вес поезда), вследствие ударного взаимодействия колесных пар и рельсов, вынужденных колебаний вагонов и двигателей, из-за неровностей колес и рельсов.

В настоящей работе рассматриваются колебания тоннеля, создаваемые сосредоточенными подвижными силами от веса поезда. Тоннель моделируется балкой на вязкоупругом основании, параметрами которого являются коэффициенты постели грунта и коэффициенты вязкого демпфирования, характеризующего рассеяние энергии в грунт при распространении продольных волн.

Дифференциальное уравнение балки Эйлера — Бернулли на вязкоупругом основании имеет обобщенный вид [1] (рис. 1):

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + Ku + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C \frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{j=1}^n P_j \delta(x + l_j - Vt), \quad (1)$$

где u — прогиб балки;

x — координата направления движения подвижной нагрузки;

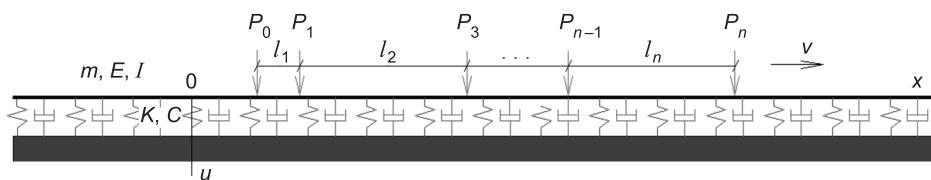


Рис. 1. Расчетная схема

t — время;
 EI — жесткость балки;
 E — модуль Юнга;
 I — момент инерции балки;
 m — массовая единица балки;
 K — коэффициент постели основания;
 C — коэффициент вязкого демпфирования основания;
 P_j — j -я сосредоточенная сила;
 ω_0 — круговая частота колебания нагрузки;
 $\delta(x + l_j - Vt)$ — дельта-функция Дирак;
 V — скорость движения поезда;
 l_j — расстояние от j -й сосредоточенной силы до крайней левой силы;
 n — число колес.

Определим вязкое демпфирование грунта

$$C = \rho\alpha = \sqrt{\rho E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

где ρ — плотность грунта, кг / м³, E — модуль упругости, Па, ν — коэффициент Пуассона грунта.

Применив преобразование Фурье [3] к обеим частям уравнения (1) по двум переменным, получим:

$$(EI\nu^4 + K - m\omega^2 - iC\omega)\tilde{U}(\nu, \omega) = 2\pi \sum_{j=1}^n P_j \exp(-i\nu l_j) \delta(\nu V + \omega), \quad (3)$$

где ν , ω — параметры преобразования Фурье,

$\tilde{U}(\nu, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) \exp(i\nu x) \exp(i\omega t) dx dt$ — изображение Фурье функции прогиба балки.

Из уравнения (3) следует

$$\tilde{U}(\nu, \omega) = \frac{2\pi \sum_{j=1}^n P_j \exp(-i\nu l_j) \delta(\nu V + \omega)}{(EI\nu^4 + K - m\omega^2 - iC\omega)}. \quad (4)$$

Скорости и ускорения балки в области частот [3] равны:

$$\tilde{U}(\nu, \omega) = - \frac{2\pi i \sum_{j=1}^n P_j \omega \exp(-i\nu l_j) \delta(\nu V + \omega)}{EI\nu^4 + K - m\omega^2 - iC\omega}, \quad (5)$$

$$\tilde{U}(\nu, \omega) = - \frac{2\pi \sum_{j=1}^n P_j \omega^2 \exp(-i\nu l_j) \delta(\nu V + \omega)}{EI\nu^4 + K - m\omega^2 - iC\omega}. \quad (6)$$

Используя свойство дельта-функции, выполним интегрирование выражений (3)–(5) по переменной ω . Для вычисления интегралов по переменной ν применим теорию вычетов [4]. Получим:

$$u(x,t) = \begin{cases} i \sum_{\substack{j=1 \\ \operatorname{Im} v_k > 0}}^n P_j \exp(-i(x+l_j - Vt)v_k) & \text{при } x + l_j - Vt < 0, \\ -i \sum_{\substack{j=1 \\ \operatorname{Im} v_k < 0}}^n P_j \exp(-i(x+l_j - Vt)v_k) & \text{при } x + l_j - Vt \geq 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\dot{u}(x,t) = \begin{cases} -V \sum_{\substack{j=1 \\ \operatorname{Im} v_k > 0}}^n P_j v \exp(-i(x+l_j - Vt)v_k) & \text{при } x + l_j - Vt < 0, \\ V \sum_{\substack{j=1 \\ \operatorname{Im} v_k < 0}}^n P_j v \exp(-i(x+l_j - Vt)v_k) & \text{при } x + l_j - Vt \geq 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\ddot{u}(x,t) = \begin{cases} -iV^2 \sum_{\substack{j=1 \\ \operatorname{Im} v_k > 0}}^n P_j v^2 \exp(-i(x+l_j - Vt)v_k) & \text{при } x + l_j - Vt < 0, \\ iV^2 \sum_{\substack{j=1 \\ \operatorname{Im} v_k < 0}}^n P_j v^2 \exp(-i(x+l_j - Vt)v_k) & \text{при } x + l_j - Vt \geq 0, \end{cases} \quad (9)$$

где v_k — корни уравнения

$$EIv^4 - mV^2v^2 + iCVv + K = 0. \quad (10)$$

Подынтегральное выражение содержит простые изолированные особые точки. При вычислении интегралов замкнутые контуры интегрирования выбираются в верхней или нижней комплексной полуплоскости в зависимости от знака показателя экспоненты.

Примеры. Используя полученные выражения, определим прогибы, скорости и ускорения тоннельной обделки типового перегонного тоннеля (рис. 2) при движении четырех вагонов типа № 81-740 / 741 с максимальной статической нагрузкой брутто колесной пары на рельсы, равной 12 (тс), его геометрические параметры показаны на рис. 3. Физические характеристики тоннеля и грунта представлены в таблице.

Критическая скорость при данном условии равна $V_{cr} = \sqrt[4]{4EIKd / \rho^2 A^2} = 1560$ м / с.

Уровни вибрации в децибелах определяются следующими выражениями [2]: для скоростей:

$$L_{\max} = 20 \lg \frac{V_{\max}}{V_0}, \quad (11)$$

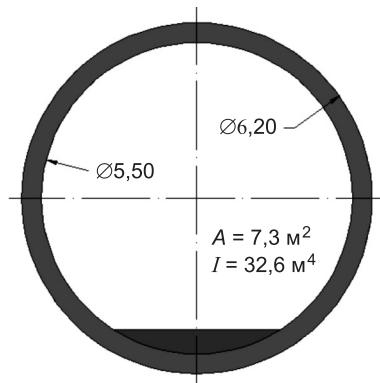


Рис. 2. Поперечное сечение тоннеля

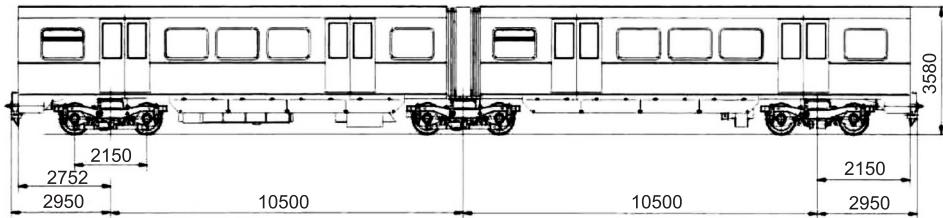


Рис. 3. Геометрические параметры вагона № 81-740 / 741

для ускорений:

$$L_{\max} = 20 \lg \frac{A_{\max}}{A_0}, \quad (12)$$

где L_{\max} — максимальные уровни вибрации, соответствующие максимальным значениям скоростей V_{\max} или ускорениям A_{\max} ($V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ (м/с) и $A_0 = 10^{-6}$ (м/с²) — пороговые значения).

Параметр	Тоннель	Средние пески
Плотность ρ , кг/м ³	2500	2000
Модуль упругости E , МПа	35000	60
Коэффициент Пуассона	0,3	0,4
Диссипация C , МПа · с / м	—	0,51
Коэффициент постели K , МПа / м	—	70

Графики изменения прогиба, скорости и ускорения тоннеля в произвольном сечении в зависимости от времени при движении поезда с разными скоростями представлены на рис. 4–6.

Следует отметить, что максимальные прогибы тоннеля практически не зависят от скоростей движения поездов, так как рассматриваемые скорости малы по сравнению с критической скоростью.

Отметим, что значения уровней вибрации (ускорений) в большей мере зависит от скоростей движения поезда (рис. 7).

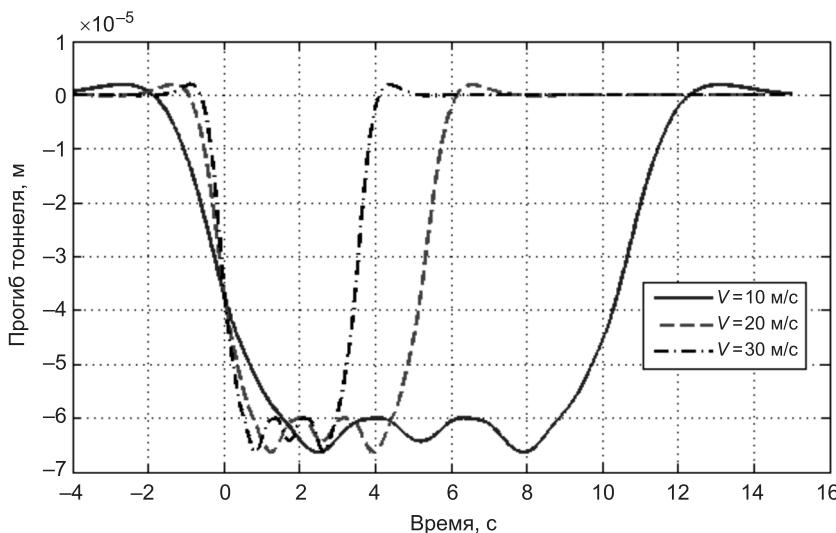


Рис. 4. Прогибы обделки тоннеля при разных скоростях движения поезда

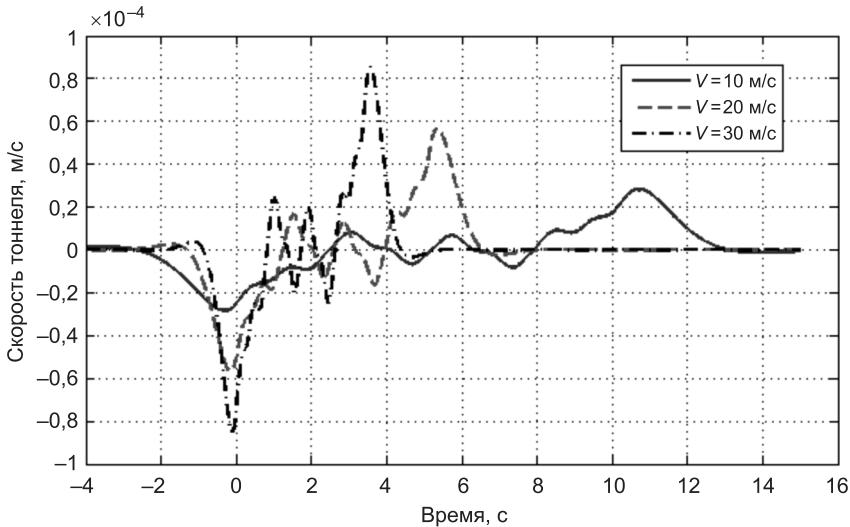


Рис. 5. Скорости вибраций тоннельной обделки при разных скоростях движения поездов

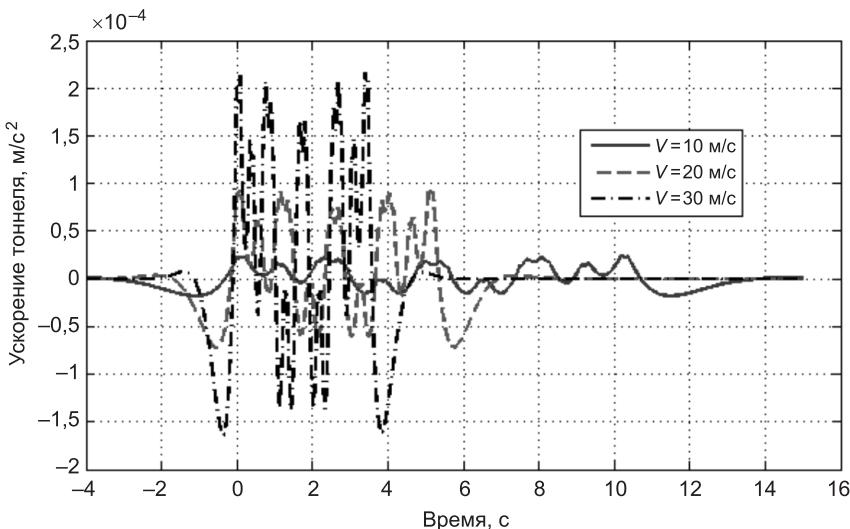


Рис. 6. Ускорения тоннельной обделки при разных скоростях движения поездов

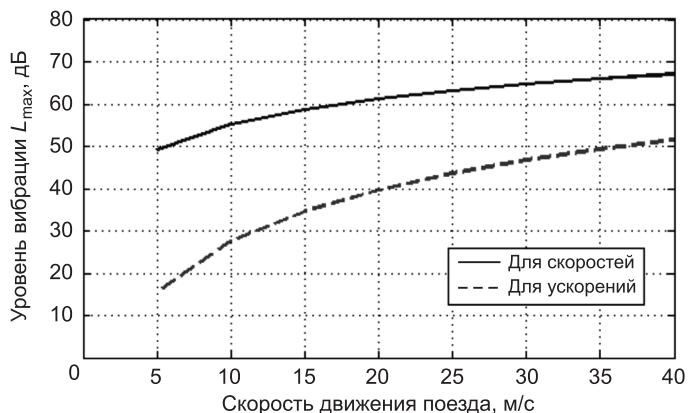


Рис. 7. Уровни вибраций тоннеля в зависимости от скоростей движения поездов

Выводы. Разработанный метод дает определение прогибов, скоростей и ускорения под действием движения сосредоточенных сил.

Анализируя полученные результаты, отметим, что скорости движения поездов значительно влияют на уровни вибраций тоннеля.

В нормативном документе СП 23-105-2004 [2] влияние скоростей движения поездов на уровни создаваемых ими вибраций не учитывается, что является недопустимым.

При увеличении скоростей движения и в особенности при анализе воздействия вибраций при движении высокоскоростных поездов оценкой влияния скорости на уровни вибраций пренебрегать не следует.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазарян, В.А. Обобщенные функции в задачах механики [Текст] / В.А. Лазарян, С.И. Конашенко. — Киев : Наук. думка, 1974. — 189 с.
2. СП 23-105-2004: Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена [Текст] / Тоннельная ассоциация России. — М., 2004.
3. Владимиров, В.С. Обобщенные функции в математической физике [Текст] / В.С. Владимиров. — М. : Наука, 1979. — 320 с.
4. Араманович, И.Г. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости [Текст] / И.Г. Араманович, Г.Л. Лунц, Л.Э. Эльсгольц. — М. : Наука, 1968. — 416 с.

НГҮЕН ЧОНГ ТАМ, асп.; E-mail: nguyentam@mail.ru

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

Получено 18.06.14

Nguyen Chong Tam, post-graduate student; E-mail: nguyentam@mail.ru, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Russia

EVALUATION OF TUNNEL VIBRATIONS GENERATED BY TRAINS

To assess the impact of train speeds in tunnels created by the vibration levels, a model of the Euler-Bernoulli beam on a visco-elastic foundation subjected to the action of a moving load is used. Moving loads are presented in the form of concentrated forces (pressure wheels on the rail). The Fourier transforms and the apparatus of the distributions functions are used. In determining of the deflections, velocities and accelerations of a point beam inverse Fourier transform is applied. To evaluate the inversion complex integrals residue theory based on Cauchy's integral theorem is using.

Key words: vibration, beam, visco-elastic foundation, the Fourier transform, generalized functions, theory of residues.

REFERENCES

1. Lazaryan, V.A. Generalized functions in problems of mechanics [Text] / V.A. Lazaryan, S.I. Konashenko. — Kiev : Naukova Dumka, 1974. — 189 p.
2. Set of Rules 23-105-2004: Evaluation of vibration in the design, construction and operation of underground objects [Text] / Russian Tunnelling Association. — M., 2004.
3. Vladimirov, V.S. Generalized functions in mathematical physics [Text] / V.S. Vladimirov. — M. : Nauka, 1979. — 320 p.
4. Aramanovich, I.G. Functions of a complex variable. Operational calculus. Stability theory [Text] / I.G. Aramanovich, G.L. Lunts, L.E. Elsgolts. — M. : Nauka, 1968. — 416 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.322

В.И. КАЛАШНИКОВ, О.В. СУЗДАЛЬЦЕВ, Р.А. ДРЯНИН,
Г.П. СЕХПОСЯН

РОЛЬ ДИСПЕРСНЫХ И ТОНКОЗЕРНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рассматриваются оптимальные рецептуры многокомпонентных порошково-активированных щебеночных и песчаных бетонов нового поколения, при использовании которых в 2–3 раза понижается удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии (кг / МПа). Показано, что в составах малоцементных бетонов в присутствии значительного количества дисперсного кварца и тонкого кварцевого песка фракции 0,16–0,63 мм (которые являются цементоемкими и неприменимыми в бетонах старого поколения) достигаются высокие технические свойства. Установлено, что бетонные смеси нового поколения должны иметь повышенное количество пластифицированной и высококонцентрированной суспензионной составляющей «цемент — молотый песок — микрокремнезем — вода» не менее 45 % от объема смеси. Сформулированы стратегические направления при создании бетонов нового поколения.

Ключевые слова: дисперсные наполнители, суспензии, бетоны нового поколения.

Как известно, бетоны старого поколения малокомпонентные: щебеночные — четырехкомпонентные, песчаные — трехкомпонентные [1]. Состав их один и тот же в течение более 180 лет! Он практически не изменился по количеству сухих компонентов и воды в основном объеме выпускаемого бетона в мире. Но в его составе присутствует еще один важнейший компонент — суперпластификатор (СП). И такой бетон с «древнейшим» составом стал бетоном переходного поколения.

Оптимизация состава и структуры бетонов нового поколения более сложная задача, чем в бетонах старого и переходного поколения. Она непосредственно связана с повышением количества и качества заполнителей и наполнителей различной дисперсности и зернистости в составе бетонов.

Четырех-, пятикомпонентные бетоны старого и переходного поколений имеют высокий удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии не менее 8–12 кг / МПа.

Такие бетоны лишь тогда превратятся в высокоэффективные семи-, восьмикомпонентные бетоны нового поколения, определяющие глобальную экономику строительства из железобетона в XXI в., когда лишь одно десятилетие будет десятилетием, определяющим прогресс в отрасли производства высококачественных дисперсных наполнителей из молотых горных пород и заполнителей для бетонов. И чрезвычайно важно, чтобы это десятилетие было в начале XXI в., тогда оставшиеся семь, восемь десятилетий Россия будет производить бетоны нового поколения, совершенствуя их из года в год. Сформулированное нами стратегическое на-

правление о перспективности самоуплотняющихся бетонов [1]: «Через рациональную реологию в будущее бетонов» необходимо дополнить: «Через высококачественные наполнители и заполнители в будущее бетонов».

Лишь с использованием дисперсных наполнителей — реологически активных (наш термин) и реакционно-активных и дополнительного количества тонких фракций песка при их оптимальной совокупной гранулометрии получены высокопрочные бетоны в мире с низкими удельными расходами цемента на единицу прочности при сжатии [2]. Такие наполнители совместно с водой и с суперпластификаторами формируют реологически активные суспензионные составляющие в бетонных смесях.

Для выявления роли реологических дисперсных суспензионных составляющих из цемента, молотого песка, микрокремнезема в разжиженных суперпластифицированных водно-дисперсных суспензиях, тонко-зернистого песка в водно-дисперсно-тонкозернистых суспензиях и растворной составляющей в удобоукладываемости многокомпонентных щебеночных бетонных смесей вычисляли значения условных реологических матриц.

В порошково-активированных щебеночных бетонах нового поколения имеются три условные реологические матрицы, определяющие реологию смесей:

— водно-дисперсная условная реологическая матрица I рода — $I_{\text{вд}}^{\Pi_T}$, выражающая избыток объема водно-дисперсной суспензии над абсолютным объемом тонкого песка:

$$I_{\text{вд}}^{\Pi_T} = \frac{V_{\text{вд}}}{V_{\Pi_T}} = \frac{V_{\text{ц}} + V_{\text{мк}} + V_{\text{пм}} + V_{\text{в}}}{V_{\Pi_T}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ц}}$, $V_{\text{мк}}$, $V_{\text{пм}}$, $V_{\text{в}}$, V_{Π_T} — абсолютные объемы цемента, микрокремнезема, молотого песка, воды и тонкозернистого песка (в составах песок фракции 0,16–0,63 мм);

— водно-дисперсно-тонкозернистая реологическая матрица II рода — $I_{\text{вдт}}^{\Pi_3}$, выражающая избыток объема водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии над абсолютным объемом песка-заполнителя:

$$I_{\text{вдт}}^{\Pi_3} = \frac{V_{\text{вдт}}}{V_{\Pi_3}} = \frac{V_{\text{ц}} + V_{\text{мк}} + V_{\text{пм}} + V_{\text{в}} + V_{\Pi_T}}{V_{\Pi_3}}, \quad (2)$$

где V_{Π_3} — абсолютный объем песка-заполнителя;

— растворная реологическая матрица III рода, выражающая избыток объема цементно-песчаного раствора, модифицированного молотым и тонкозернистым песком и микрокремнеземом над абсолютным объемом щебня:

$$I_{\text{п}}^{\text{ш}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ш}}} = \frac{V_{\text{ц}} + V_{\text{мк}} + V_{\text{пм}} + V_{\text{в}} + V_{\Pi_T} + V_{\text{ш}}}{V_{\text{ш}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{ш}}$ — абсолютный объем щебня.

В табл. 1–3 показана роль реологических матриц, объемного содержания суспензионных и растворной составляющих, соотношения сырьевых компонентов по массе и их качества в порошково-активированных щебеночных бетонах трех составов на их прочность. Два состава были малоцементными, в третьем содержание цемента увеличено до 316 кг/м³.

Таблица 1. ПАЩБ-6. Состав, реотехнологические показатели бетонных смесей и физико-технические свойства малоцементного порошково-активированного щебеночного бетона с расходом цемента 146 кг/м³

Наименование компонентов	На 1 м ³ , кг	Объем на 1 м ³ , л	В/Ц, В/Т	ρ , кг/м ³	$\frac{\Pi_m}{\Pi}$	$\frac{\Pi_t}{\Pi}$	$\frac{\Pi}{\Pi_3}$	Прочность, МПа, через сут			
									1	7	28
ЦДС Красноярский М500 Д0, с 0,75 % Mellflux 2641F	146	47	1,05		1,4	3,3	4,08	R_u 2,6	R_u 4,6	R_u 7,5	
Микрокварц (Π_m), $S_{уд} = 2600 \text{ см}^2/\text{г}$	205	77	0,067	2410	$\frac{\Pi_3}{\Pi}$	$\frac{\Pi}{\Pi_3}$	$\Sigma(H+3)$	R_c 11,2	R_c 21,4	R_c 35,8	
Песок тонкозернистый (Π_t), фр. 0,16–0,63 мм	488	173					$V_{вд} = 28,0 \%$				
МК Новокузнецкий 7 % от цемента	10	4,4					$V_{вдт} = 45,0 \%$				$\Pi_{R_c}^{уд} = 4,07 \text{ кг/МПа}$
Песок-заполнитель (Π_3) $M_{kp} = 2,2$	280	106					$V_p = 55,0 \%$				$R_{ц}^{уд} = 0,245 \text{ МПа/кг}$
Щебень, дробленный из гравия (Π), фр. 5–15 мм	1146	352	ОК 1–2 см				$I_{вд}^{\Pi_t} = 1,64$				$\Pi_{R_u}^{уд} = 19,5 \text{ кг/МПа}$
Смесь Хидетал 9γ и Mellflux 5581F 0,9 % от Ц	1,3	1,0					$I_{вдт}^{\Pi_3} = 4,30$				$R_u/R_c = 0,21$
$\Sigma M_{сух}$	2278	—					$I_p^{\Pi} = 1,60$				
Вода	154	154									
$M_{б.с}$	2431	1020									

В малоцементных бетонах использовался Вольский ПЦ М500 Д0 и ПЦ М500 ДОН, активированный сухими гиперпластификаторами (ГП) марки Mellflux в течение 5 мин в шаровой мельнице. Мельница использовалась как аппарат, смешивающий до однородного состояния два компонента (за неимением необходимого турбулентного смесителя сухих порошков). Тонкая фракция Сурского кварцевого песка отсеивалась на ситах. Эта же фракция как наиболее представительная в рядовом песке подвергалась помолу. В качестве песка-заполнителя использовался рядовой песок с модулем крупности $M_{kp} = 2,2$ Ачинского карьера Красноярского края. В качестве реакционно-активной добавки применялся Новокузнецкий микрокремнезем (МК). Для малоцементных бетонов использовали щебень, дробленный из гравия, и известняковый, доломитизированный щебень с дробимостью $D = 800–1200$, фракции 5–10 мм. Для высокопрочного бетона (см. табл. 3) использовался очень качественный чистый кварцевый Ртищевский тонкий и молотый песок, кварцево-полевошпатовый обогащенный песок, составленный из трех фракций, и высокопрочные щебни вулканического происхождения. После изготовления бетонной смеси и определения консистенции смесь укладывали в формы-двойчатки 10×10×10 см и формы 40×40×160 мм и уплотняли на виброплощадке.

Как следует из табл. 1, удобоукладываемость бетонной смеси с осадкой конуса 1–2 см достигнута при достаточно высоком В/Ц = 1,05, при

Таблица 2. ПАЩБ-3. Состав, реотехнологические показатели бетонных смесей и физико-технические свойства малоцементного порошково-активированного щебеночного бетона с расходом цемента 236 кг/м³

Наименование компонентов	На 1 м ³ , кг	Объем на 1 м ³ , л	В/Ц, В/Т	ρ_c , кг/м ³	$\frac{\Pi_m}{\Pi}$	$\frac{\Pi_t}{\Pi}$	$\frac{\Pi}{\Pi_s}$	Прочность, МПа, через сут		
								1	7	28
ЦДС Вольский М500 Д0 Н, с 0,9 % Mellflux 1641F	236	75,8	0,62		0,92	1,99	1,8	R_u 4,1	R_u 7,9	R_u 8,7
Песок молотый Сурский (Π_m), $S_{уд} = 3475 \text{ см}^2/\text{г}$	217	82,0	0,064	2380	$\frac{\Pi_s}{\Pi}$	$\frac{\Pi}{\Pi}$	$\frac{\Sigma M_{сух}}{\Pi}$	R_c 20,1	R_c 38,5	R_c 52,4
Песок тонкозернистый (Π_t), фр. 0,16–0,63 мм	469	177					$V_{вд} = 32 \%$			
МК Новокузнецкий 13 % от цемента	31,3	13,6					$V_{вдт} = 49,7 \%$	$\Pi_{R_c}^{уд} = 4,50 \text{ кг/МПа}$		
Песок-заполнитель (Π_s) $M_{kp} = 2,22$	472	168,6					$V_p = 66,6 \%$	$R_u^{уд} = 0,22 \text{ МПа/кг}$		
Щебень известняковый доломитизированный (Π) $D_p = 800–1200$, фр. 5–10 мм	849	315					$I_{вд}^{\Pi_t} = 1,79$	$\Pi_{R_u}^{уд} = 27,1 \text{ кг/МПа}$		
$\Sigma M_{сух}$	2274	—					$I_{вдт}^{\Pi_s} = 2,93$			
Вода	146	146					$I_p^{\Pi} = 2,10$			
$M_{o.c}$	2420	978						$R_u / R_c = 0,17$		

очень низком расходе цемента (146 кг/м³) и очень высоком содержании сухих наполнителей и заполнителей (2132 кг/м³).

Несмотря на высокое содержание сухих компонентов — наполнителей и заполнителей ($\Sigma_{сух} / \Pi = 14$), водотвердое отношение было очень низким, равным 0,067, т.е. влажность смеси была 6,7 %. Если сравнить бетоны старого поколения с расходами компонентов $\Pi = 300$; $\Pi_t = 600$; $\Pi_s = 1300 \text{ кг/м}^3$ при $B/\Pi = 0,6$ и жесткостью 15–30 с, то в таких бетонах B/T — отношение равно 0,078, т.е. выше на 14 %. Но необходимо учитывать, что в порошково-активированных бетонах содержится чрезвычайно водопотребный МК, водопотребный молотый песок и тонкий песок фракции 0,16–0,63 мм.

При пробном замесе порошково-активированного состава без ГП с влажностью 6,86 получена полусухая сыпучая смесь, которую невозможно уплотнить на современных вибропрессующих установках. Порошково-активированные бетоны нового поколения — это бетоны только с суперпластификаторами.

При низком расходе цемента в очень «тощем» составе, когда сумма сухих компонентов — наполнителей и заполнителей превышает массу цемента в 14 раз, бетон остается малощебеночным с плавающей структурой зерен щебня. При этом получен бетон с прочностью на сжатие 35,8 МПа с очень малым удельным расходом цемента на единицу прочности — 4,07 кг/МПа. Замена кварцевой муки известняковой позволила повысить удобоукладываемость до ОК 4–5 см. Прочность на сжатие осталась практически неизменной. Вряд ли такой «тощий» бетон марки М350

Таблица 3. ПАЩБ-33. Состав, реотехнологические показатели бетонной смеси и физико-технические свойства высокопрочного порошково-активированного щебеночного бетона с расходом цемента 319 кг/м³

Наименование компонентов	На 1 м ³ , кг	Объем на 1 м ³ , л	В/Ц, В/Т	ρ , кг/м ³	$\frac{\Pi_m}{\Pi}$	$\frac{\Pi_t}{\Pi}$	$\frac{Ш}{П_s}$	Прочность, МПа, через сут		
								1	7	28
ЦДС цемент Мордовский М500 ДО Н, с 0,9 % Melflux 2651F	319	103	0,376		0,74	1,1	2,01	R_u 8,6	R_u 12,1	R_u 15,0
Песок Ртищевский молотый (Π_m), $S_{уд} = 3200 \text{ см}^2/\text{г}$	235	88,7	0,048	2534	$\frac{\Pi_3}{\Pi}$	$\frac{Ш}{\Pi}$	$\frac{\Sigma M_{сух}}{\Pi}$	R_c 66,0	R_c 110,8	R_c 133,6
Песок Ртищевский (Π_t), фр. 0,16–0,63 мм	351	132			1,6	3,22	7,73			
МК Новокузнецкий 7,0 % от цемента	22,2	8,4								
Песок БКУ (Π_3) из 3-х фракций: фр. 0,63–1,25 = 22,4 %; фр. 1,25–2,5 = 16,2 %; фр. 2,5–5,0 = 61,4 %	510	189								
Щебень гранитный ($Ш$), фр. 5–10 мм	308	114								
Щебень габбро-диабаз ($Ш$), фр. 10–20 мм	720	262								
$\Sigma M_{сух}$	2465,2	—								
Вода	120	120								
$M_{б.c}$	2585,2	1017,1								

был когда-либо получен с расходом цемента 150 кг/м³ из малопластичных бетонных смесей. В литературе сведений о них мы не обнаружили.

Во втором составе (см. табл. 2) расход цемента был повышен на 86 кг/м³, а содержание МК было уменьшено до 13 % от массы Ц. Бетонная смесь имела осадку конуса 8 мм, прочность возросла до 52,4 МПа, а удельный расход цемента увеличился до 4,5 кг/МПа.

Для высокопластичных и самоуплотняющихся бетонных смесей соотношение компонентов и условные реологические критерии изменяются [3].

Это отчетливо прослеживается на порошково-активированном щебеночном бетоне со средним расходом цемента 319 кг/м³, в котором путем изменения гранулометрического состава песка-заполнителя от смешения трех фракций дробленого гравия получили насыпную плотность $\rho_{нас} = 1550 \text{ кг}/\text{м}^3$ с модулем крупности 2,39. В качестве тонкого песка использовали Ртищевский стекольный песок фракции 0,16–0,63 мм, в котором содержалось 73 % фракции 0,315–0,63 мм и 23 % фракции 0,16–0,315 мм. При смешивании тонкого песка с дробленым в заданном соотношении получен модуль крупности $M_k = 3,39$. В качестве каменной муки использовали песок Ртищевский с удельной поверхностью $S_{уд} = 3200 \text{ см}^2/\text{г}$. Применялся щебень гранитный фр. 5–10 мм, щебень габбро-диабаз фр. 10–20 мм.

В табл. 3 представлены результаты испытаний. Удалось при $\text{В/Ц} = 0,376$ получить бетонную смесь с осадкой конуса 21–22 см.

Получено чрезвычайно низкое водотвердое отношение (0,048) и высокая плотность бетона — 2534 кг/м³ (через 1 сут твердения в «сыром» состоянии). Плотность в естественно-сухом состоянии через 200 сут испытания бетона на усадочные деформации была 2497 кг/м³. Достигнут высокий предел прочности при сжатии через 28 сут твердения — 133,6 МПа и самый низкий удельный расход цемента на единицу прочности — 2,38 кг/МПа. Прочность на изгиб — 15 МПа. Бетон с таким расходом цемента не обнаружен нами ни в отечественных, ни в иностранных публикациях.

Проанализируем все три бетона по объемам суспензионных составляющих. Объемы дисперсных суспензий в бетонных смесях изменяются от 28 до 32 %. Содержание водно-дисперсно-тонкозернистых суспензий — от 45 до 50 %, а содержание растворной составляющей — от 64 до 68 %. Из трех составов бетонных смесей самой высокопластичной была смесь для высокопрочного бетона, в которой условный реологиче-

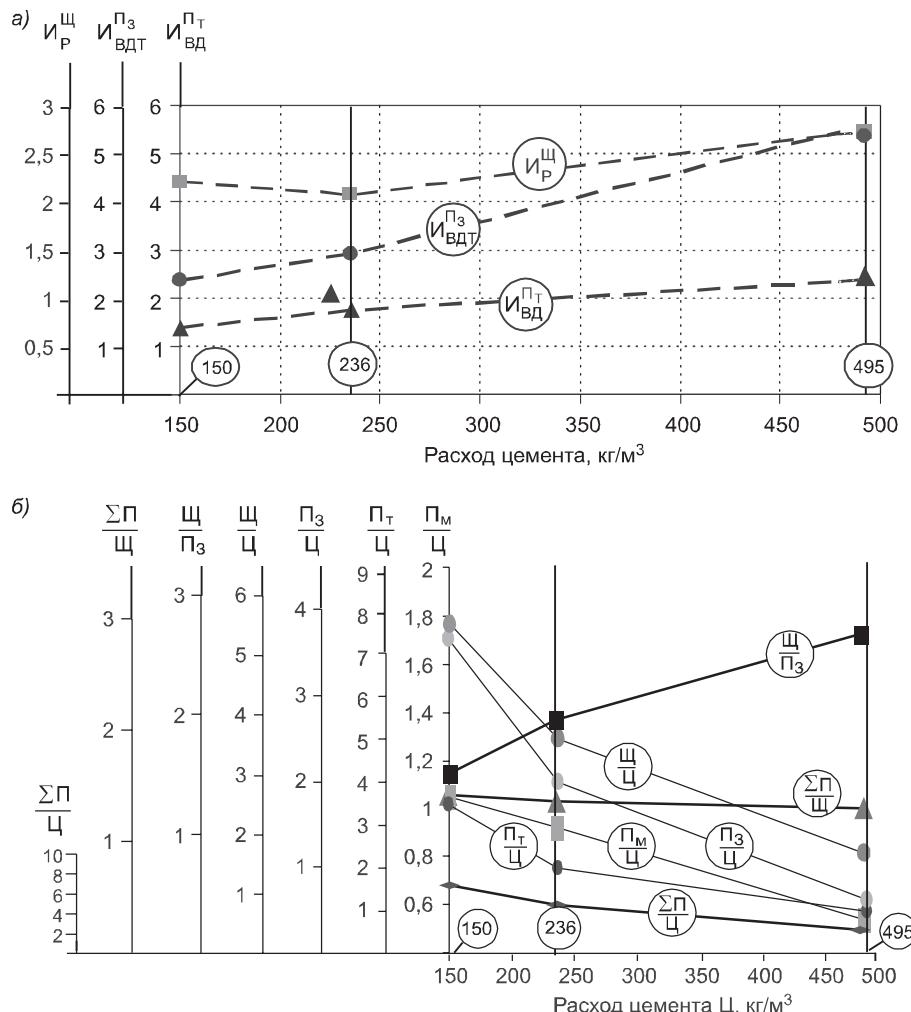


Рис. 1. Изменение реологических матриц (а) и соотношения компонентов (б) нового поколения в зависимости от расходов цемента

ский критерий I рода был самым высоким. Содержание растворной составляющей в количестве 64 % от объема бетонной смеси оказалось достаточным для раздвижки зерен щебня и повышения удобоукладываемости.

Условный реологический критерий $I_{вдт}^{п_3}$, равный отношению водно-цементно-порошковой смеси к объему песка-заполнителя, подвержен самому существенному изменению. При переходе от очень «тощих» бетонов, в которых содержится 2100 кг / м³ сухих наполнителей, тонких песков, песка-заполнителя и щебня, к «жирным» бетонам $I_{вдт}^{п_3}$ увеличивается в 2,3 раза. Относительное объемное содержание реологической матрицы I рода изменяется не столь значительно — в 1,7 раза (рис. 1, а). Относительное содержание растворной матрицы практически изменяется очень незначительно (в 1,2 раза). Такая тенденция изменения условных реологических критериев в диапазоне двух крайних составов бетона, охватывающих широкий интервал расходов цемента, требует уточнения закономерности изменений.

Важно выявить и изменение прочностных (рис. 2) и деформативных показателей от расходов цемента в тяжелых бетонах при использовании одних и тех же компонентов: высококачественного наполнителя (например, микрокварца), тонкого чистого кварцевого песка фракции 0,16–0,63 мм или 0,1–0,5 мм (при ориентации на европейские исследования) и мытого щебня фракции 5–10 мм (например, гранитного) при близких консистенциях смесей. На графике изменения прочности на растяжение при изгибе все точки находятся на прямой. Прямолинейность в характере изменения прочности на сжатие нарушается. Поэтому установление функции $R = f(\Pi)$ требует серьезных экспериментальных исследований.

Для точной оценки зависимости необходимо оценить положение точек относительно условно проведенных прямых. При этом необходимо учитывать консистенцию бетонных смесей и установить изменение ус-

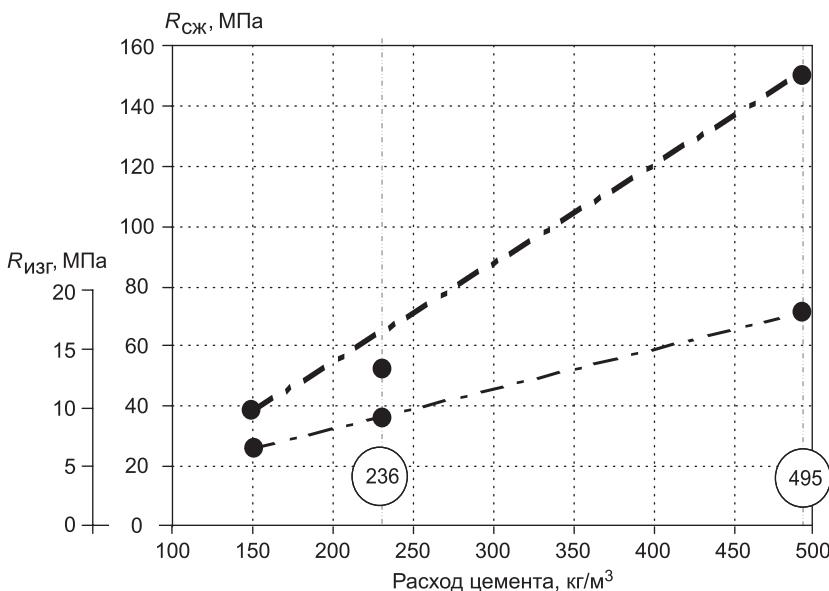


Рис. 2. Зависимость прочности порошко-активированных щебеночных бетонов от расхода цемента

ловных реологических показателей, начиная от «тощих» жестких смесей и кончая «жирными» самоуплотняющимися. Такие же изменения должны быть установлены и для всех соотношений сырьевых компонентов (см. рис. 1, б).

Накопление экспериментальных данных и их систематизация позволит разработать теорию проектирования составов порошково-активированных бетонов нового поколения.

Более простая проблема — разработка теории проектирования составов порошково-активированных песчаных (мелкозернистых) бетонов нового поколения, имеющего меньшее количество компонентов.

Разработка песчаных (мелкозернистых) бетонов является чрезвычайно актуальной, особенно для регионов, не имеющих месторождений природных каменных пород. Совершенно очевидно, что если бы можно было у песчаных бетонов иметь близкие характеристики технических свойств высокопрочных щебеночных бетонов, то они бы были широко востребованы и в жилищном, и в промышленном строительстве. К сожалению, песчаные бетоны остаются пока очень цементоемкими, с повышенными усадочными деформациями, ползучестью, повышенной трещиностойкостью. Свойства песчаных бетонов становятся сопоставимыми лишь при жестких режимах поличастотного уплотнения с одновременным высоким компрессионным давлением [4]. Такие параметры получения возможны лишь для мелкоштучных изделий.

В связи с этим проблема получения высокопрочных песчаных бетонов с низким удельным расходом цемента является очень важной. При высоком содержании песка, например, состава Ц:П = 1:3 суперпластификаторы очень плохо пластифицируют такие смеси. Получить высоко-пластичные, тем более самоуплотняющиеся нерасслаивающиеся песчаные бетонные смеси, без молотого и тонкого песка невозможно — они будут водопотребными, высокопористыми и недостаточно прочными. При оценке марок цемента, например, ПЦ500 по ГОСТ 310-76-85 в составах Ц:П = 1:3 с использованием нормального Вольского песка при В/Ц = 0,4 через 28 сут получается марка песчаного бетона М500 и подтверждается марка цемента.

Покажем, как можно получить самоуплотняющуюся песчаную бетонную смесь с меньшим количеством цемента и со значительно большей прочностью за счет порошковой активации.

Для изготовления порошково-активированного песчаного бетона использовали микрокварц ЛГОК и микрокремнезем для получения объема матрицы I рода, а для увеличения объема матрицы II рода добавляли песок фр. 0,16–0,63 мм (табл. 4). Результаты испытаний показывают, что при В/Т = 0,068 достигнута высокая осадка конуса, характерная для самоуплотняющихся бетонов. Объем матрицы I рода равен 41 %, а II рода — 619 л, т.е. 63,0 %, что оказалось достаточным для обеспечения высокой текучести.

Определим объем водно-дисперсной матрицы для цементно-песчаного раствора состава 1:3 на Вольском песке при определении активности цемента по ГОСТ 310-76.4.

(Расход компонентов: Ц = 500 кг, П₃ = 1500 кг, В = 200 л. Объемы компонентов: V_Ц = 161 л, V_{П₃} = 566 л, В = 200 л.)

Таблица 4. ПАПБ 22. Состав, реотехнологические показатели бетонной смеси и физико-технические свойства порошково-активированного песчаного бетона

Наименование компонентов	На 1 м ³ , кг	Объем на 1 м ³ , л	В/Ц, В/Т	ρ , кг/м ³	$\frac{\Pi_m}{\Pi}$	$\frac{\Pi_t}{\Pi}$	$\frac{\Pi_3}{\Pi}$	Прочность, МПа, через сут		
								1	7	28
Цемент Подольский ПЦ 500 Д0 $S_{уд} = 3362 \text{ см}^2/\text{г}$	390	126	0,39			0,44	2,49	R_u 7,0	R_u 10,2	R_u 12,0
МК Новокузнецкий 10 % от ПЦ	39,0	17,0	0,068	2370	0,74	$\frac{\Sigma(H+3)}{\Pi}$		R_c 46	R_c 82	R_c 120
ГП Melflux 5581F 0,9 % от Ц	3,5	2,7								
Микрокварц ЛГОК (Π_m), $S_{уд} = 3900 \text{ см}^2/\text{г}$	290	109				$V_{вд} = 41,0 \%$		$\Pi_{R_c}^{уд} = 3,25 \text{ кг/МПа}$		
Песок формовочный тонкозернистый ЛГОК (Π_t), фр. 0,16–0,63 мм	560	211				$V_{вдт} = 63,0 \%$		$R_u^{уд} = 0,31 \text{ МПа/кг}$		
Песок-заполнитель (Π_3), фр. 0,63–5,0 мм	970	366				$I_{вд}^{\Pi_t} = 1,93$		$\Pi_{R_u}^{уд} = 32,5 \text{ кг/МПа}$		
$\Sigma M_{сух}$	2249	—				$I_{вдт}^{\Pi_3} = 1,69$		$R_u / R_c = 0,1$		
Вода	153	153								
$M_{б.c}$	2308	985								

Он равен 36–37 %, а условная реологическая матрица I рода $I_{вд}^{\Pi_3} = 0,64$. Если в стандартный раствор ввести СП, не уменьшая содержания воды, то песчаный раствор из малопластичного перейдет в высокопластичный.

Проанализируем, достаточно ли будет объема цементного теста для обеспечения реологии течения и заполнения пустот в песке. При насыпной плотности Вольского песка 1500 кг/м³ пустотность составила 43 %, а содержание цементного теста 36–37 %. При обволакивании частиц тестом пустотность дополнитель но возрастает, что скажется на снижении прочности пластифицированного песчаного бетона. В бетонах старого поколения с хорошим крупным песком нет реологической водно-дисперсно-тонкозернистой матрицы второго рода, которая определяет реологию и плотность песчаной бетонной смеси. Содержание ее в бетоне нового поколения 73 %. Поэтому песчаная бетонная смесь на 73 % является супензионной. Порошково-активированные щебеночные бетонные смеси нового поколения на 45–50 % являются супензионными. Полностью супензионными бетонами нового поколения на 100 % являются реакционно-порошковые бетоны. Поэтому трансформация стопроцентных супензионных бетонов в порошково-активированные щебеночные и песчаные с увеличенным объемом супензионной составляющей является «азбукой» создания бетонов нового поколения. Пока что нет иных «азбук», знание которых позволило бы обеспечить выпуск бетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности, с традиционной и высокой прочностью. Наиболее важным является то, чтобы эти супензионные составляющие были получены агрегативно-устойчивыми и высоко-

концентрированными для обеспечения кинетической устойчивости. Именно в этом состоит наукоемкость создания таких супензий, что связано с физико-химией дисперсных систем. Поэтому для будущего бетонов может быть сформулировано еще одно стратегическое направление: «Через физико-химию агрегативно-устойчивых предельно-концентрированных супензий — в будущее бетонов».

Бетоны нового поколения не могут быть получены без эффективных супер- и гиперпластификаторов. К суперпластификаторам для сверхпрочных бетонов должны быть предъявлены требования:

— цементные супензии с суперпластификаторами должны обладать высокой гравитационной текучестью (расплыв конуса Хагерманна не менее 30 см) при объемной концентрации твердой фазы 65–70 %;

— сложные цементно-минеральные супензии «цемент — каменная мука» при соотношении 1 : 1 по массе должны обладать аналогичной текучестью при объемной концентрации 70–75 %.

Таким образом, с уверенностью можно утверждать, что как для щебеночных, так и для песчаных порошково-активированных бетонов открываются новые перспективные направления в строительстве. Они позволяют производить высокопрочные бетоны в тех регионах, в которых отсутствуют месторождения горных пород для производства щебня. Это существенно уменьшит перевозки щебня и гравия.

Результаты исследований показывают, что оптимальные содержания высокодисперсных, грубодисперсных и зернистых компонентов в реологических матрицах песчаных и щебеночных бетонных смесях позволяют создать как высокопрочные бетоны, так и малоцементные бетоны нового поколения рядовых марок. В высокопрочных бетонах экономической основой является уменьшение расходов всех компонентов бетона в 2–3 раза, в бетонах рядовых марок — снижение расхода цемента в 1,5–2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Технологии бетонов. — 2007. — № 5. — С. 8–10; 2007. — № 6. — С. 8–11; 2008. — № 1. — С. 22–26.
2. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения [Текст] / В.И. Калашников // Строительные материалы. — 2011. — № 3. — С. 103–106.
3. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения [Текст] / В.И. Калашников // Бетон и железобетон. — 2012. — № 1. — С. 82.
4. Краснов, Л.М. Влияние высокого наполнения мелкозернистого бетона на структурную прочность [Текст] / Л.М. Краснов, С.В. Федосов, М.В. Акулова // Строительные материалы. — 2009. — № 1.— С. 48–50.

КАЛАШНИКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
СУЗДАЛЬЦЕВ Олег Владимирович, асп.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ДРЯНИН Роман Александрович, асп.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
СЕХПОСЯН Григорий Погосович, асп.*

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Kalashnikov Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Suzdal'tsev Oleg Vladimirovich, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Dryanin Roman Alexandrovich, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Sekhposyan Grigoriy Pogosovich, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

THE ROLE OF DISPERSED AND FINE-GRAINED FILLER IN CONCRETE OF NEW GENERATION

Discusses the best recipe multicomponent powdered-activated crushed stone and sand concrete of new generation, which when used in 2–3 times is reduced specific consumption of cement unit compressive strength (kg/MPa). It is shown that in mixtures of concrete with a small amount of cement in the presence of a significant number of dispersed thin quartz and quartz sand fraction of 0,16–0,63 mm (with a large amount of cement and not applicable in concrete older generation) are achieved high mechanical properties. It is established that a concrete mix of new generation should have increased the number of plasticized and highly concentrated suspension component cement-ground sand-fume-water, not less than 45 % of the volume of the mixture. Formulated strategic direction when creating concrete of new generation.

Key words: disperse fillers, suspensions, concrete of new generation.

REFERENCES

1. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology in the future of concrete [Text] / V.I. Kalashnikov // Tehnologii betonov. — 2007. — N 5. — P. 8–10; 2007. — N 6. — P. 8–11; 2008. — N 1. — P. 22–26.
2. Kalashnikov, V.I. Terminology of the science of concrete of new generation [Text] / V.I. Kalashnikov // Stroitel'nye materialy. — 2011. — N 3. — P. 103–106.
3. Kalashnikov, V.I. How to turn the concretes of the old generation in high-performance concretes new generation [Text] / V.I. Kalashnikov // Beton i zhelezobeton. — 2012. — N 1. — P. 82.
4. Krasnov, L.M. The effect of the high filling of fine-grained concrete on the strength [Text] / L.M. Krasnov, S.V. Fedosov, M.V. Akulova // Stroitel'nye materialy. — 2009. — N 1. — P. 48–50.

УДК 691.327:666.973.2:669.046.58

Н.Н. ЧЕРНОУСОВ, Р.Н. ЧЕРНОУСОВ, А.В. СУХАНОВ

ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТА ВЫСОКОПРОЧНОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ШЛАКОПЕМЗОБЕТОНА НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены результаты исследования роста кубиковой прочности и начального модуля упругости фиброшлакопемзобетона на образцах-призмах. Проведены исследования изменений деформаций усадки фиброшлакопемзобетона в зависимости от возраста бетона и условий хранения экспериментальных образцов — температуры и относительной влажности среды. В опытах варьировались состав матрицы, объемное содержание фибровой арматуры и площадь открытой поверхности образцов. Получены зависимости, позволяющие с высокой достоверностью определять прочность бетона, начальный модуль упругости и усадку фиброшлакопемзобетона разного возраста и в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: фиброшлакопемзобетон, усадка, относительная влажность, начальный модуль упругости, прочность бетона на сжатие.

Расширение применения железобетонных конструкций из бетонов, позволяющих использовать для их производства вторичные отходы различных отраслей промышленности и местные заполнители, способствует экономическому потреблению материальных и энергетических ресурсов, снижению стоимости и трудоемкости технологических процессов. К таким бетонам, в частности, относится мелкозернистый шлакобетон на основе отсева от дробления литого шлакового щебня. Одним из направлений улучшения качества такого бетона является введение в состав шлакобетонной смеси стальных фибр, обладающих высокими прочностными показателями при растяжении и повышенным модулем упругости [1, 2].

Цель настоящего исследования — получение зависимостей, наиболее достоверно описывающих изменение прочностных свойств дисперсно-армированного шлакопемзобетона во времени, исследование влияния усадки на его прочностные и деформативные характеристики.

Для прогнозирования срока службы железобетонных изделий необходимо знать количественные закономерности изменения прочностных характеристик бетона за длительный промежуток времени.

Испытания с целью выявления подобных закономерностей начались в 1979 г. на образцах, изготовленных на основе шлаков металлургического производства ОАО «НЛМК» [2]. В исследуемых составах использовались в качестве вяжущего цемент марок 400 и 500 соответственно Старооскольского и Белгородского цементных заводов, а в качестве заполнителя — шлакопемзовый песок фракции 0...5 мм и тонкомолотая шлаковая добавка с тонкостью помола 2800–3300 см²/г. Составы конструктивного шлакопемзобетона, химический состав шлаковой пемзы, зерновой состав и физико-механические свойства шлакопемзового песка, а также основные свойства шлакопемзовой добавки приведены в табл. 1–5 соответственно.

Влияние возраста высокопрочного дисперсно-армированного...

Таблица 1. Составы конструктивного шлакопемзобетона

Шифр состава	Марка цемента	Расход материалов на 1 м ³ бетона				СДБ в % от массы цемента
		цемент, кг	шлаковая добавка, кг	пемзовый песок фр. 0...5 мм, кг	вода, л	
А	400	470	428	1130	232	0,2
Б	500	530	483	840	247	0,2
В	500	560	515	900	265	0,2
Г	500	560	515	850	255	0,25
Д	500	380	345	900	225	0,2

Таблица 2. Химический состав шлаковой пемзы

Содержание основных оксидов, % от массы						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	S _{общ}
40,08	37,77	11,97	9,81	0,20	0,24	0,69

Таблица 3. Зерновой состав шлакопемзового песка

Остатки на ситах, %	Размеры сит, мм						
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0
Частные	0,88	7,62	24,28	28,99	21,50	14,39	5,69
Полные		7,62	31,90	60,89	82,39	96,78	100,00

В опытах варьировались прочность бетонной матрицы и процентное содержание фибр в шлакопемзобетоне.

В качестве дисперсного армирования применялась фибровая арматура, изготавливаемая из светлой проволоки общего назначения (ГОСТ 3282-74) на лабораторной установке, изготовленной на Новолипецком металлургическом комбинате по чертежам станка для рубки проволоки, разработанным в ЛенЗНИИЭПе. Получение периодического сплюсывания обеспечивалось с помощью профилирующего валика. При этом нанесение периодических вмятин на проволоку осуществлялось глубиной до 1/3 диаметра фибры за счет перемещения профилирующего валика в вертикальных направляющих. Такое профилирование является наиболее эффективным. В исследованиях использовалась фибра длиной 25 мм и диаметром 0,25 мм (рис. 1).

Первые испытания проводились на образцах, в которых расход фибр составлял 3–5 % от собственной массы бетонной смеси для составов А и Б, что

Таблица 4. Физико-механические свойства шлакопемзового песка

Наименование свойств	Единицы измерения	Значения
Плотность	г / см ³	2,90
Пустотность	%	58,0
Водопотребность	%	42,3
Удельная поверхность	м ² / т	197,8
Объемная насыпная масса	кг / м ³	980–1180

Таблица 5. Основные свойства шлакопемзовой добавки

Наименование показателей	Единицы измерения	Значение показателей
Модуль основности	—	0,89–1,08
Модуль активности	—	0,26–0,38
Глиноземистый модуль	—	16,8–18,4
Коэффициент качества	—	1,54
Коэффициент насыщения	—	1,99
Удельная поверхность	см ² / г	2500–3300

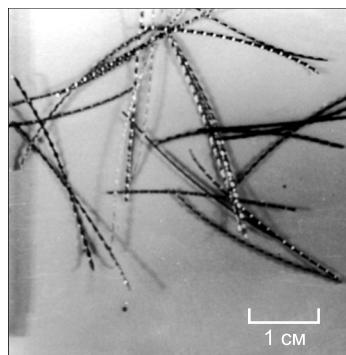


Рис. 1. Фибра из проволоки к условиям эксплуатации помещений.

Нагружение образцов при испытании на сжатие происходило со скоростью $0,6 \pm 0,4$ МПа / с. Средние значения результатов испытаний приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты испытаний фиброшлакопемзобетона на сжатие

Шифр состава	Дата испытаний	Возраст бетона, сут	Объем фибрового армирования				
			0	0,8	1,0	1,2	1,4
<i>Средние значения кубиковой прочности R_m, МПа</i>							
А	1979 г.	28	32,2	39,1	42,1	42,8	43,0
	1991 г.	4300	36,6	41,3	42,86	45,6	46,3
	2001 г.	8000	38,2	42,1	44,14	45,8	46,7
	2014 г.	12700	38,4	43,0	44,48	45,6	46,8
Б	1979 г.	28	48,0	56,7	59,8	64,4	70,7
	1991 г.	4300	54,8	60,8	64,6	66,2	69,0
	2001 г.	8000	56,3	63,2	63,8	66,6	69,7
	2014 г.	12700	56,8	62,2	65,9	66,2	70,3
<i>Средние значения призменной прочности R_b, МПа</i>							
А	1979 г.	28	28,5	35,4	40,5	42,1	43,1
	1991 г.	4300	36,1	37,5	42,1	45,5	46,2
	2001 г.	8000	38,0	40,3	41,1	45,8	46,2
	2014 г.	12700	35,8	40,4	44,4	45,0	46,6
Б	1979 г.	28	50,0	55,9	61,1	65,1	70,7
	1991 г.	4300	51,2	58,8	63,3	66,0	68,6
	2001 г.	8000	54,1	62,9	63,3	64,2	70,2
	2014 г.	12700	54,0	61,0	64,1	64,8	69,5
<i>Средние значения начального модуля упругости $E_b \cdot 10^3$, МПа</i>							
А	1979 г.	28	28,3	31,3	31,5	31,7	33,2
	1991 г.	4300	30,4	31,8	32,2	32,9	33,1
	2001 г.	8000	30,1	32,4	32,5	32,7	33,5
	2014 г.	12700	31,0	32,2	32,5	33,1	33,4
Б	1979 г.	28	35,6	38,0	38,3	39,9	40,2
	1991 г.	4300	37,6	39,5	40,2	40,8	41,1
	2001 г.	8000	37,8	39,7	40,5	40,7	41,4
	2014 г.	12700	38,0	39,9	40,5	41,0	41,2

В работе [3] предложены следующие формулы для определения прироста значений физико-механических характеристик сталефибролакобетона в зависимости от объемного содержания фибровой арматуры (μ , %):

— для кубиковой прочности

$$R_{fm} = R_m (1 + 0,15\mu), \quad (1)$$

где R_{fm} , R_m — кубиковая прочность сталефибролакобетона и шлакопембетона соответственно;

— для прочности на растяжение при изгибе

$$R_{fbt} = R_{bt} (1 + 1,16\mu), \quad (2)$$

где R_{fbt} , R_{bt} — прочность сталефибролакобетона и шлакопембетона на растяжение при изгибе соответственно;

— для начального модуля упругости при сжатии

$$E_{fb} = E_b (1 + 0,06\mu), \quad (3)$$

где E_{fb} , E_b — начальный модуль упругости сталефибролакобетона и шлакопембетона соответственно.

Анализ данных, полученных при испытании образцов серий А и Б, позволил получить следующие зависимости для описания роста прочности и модуля упругости фибролакобетона при сжатии в зависимости от его возраста t в сутках:

$$R_{fm} = R_m (28) \cdot \left[1 + \left(\frac{23}{105+B} \right) \left(\frac{t-28}{t+15} \right) \right] \cdot (1 + 0,15\mu), \quad (4)$$

$$E_b = E_b (28) \cdot \left[1 + \left(\frac{23}{55+B} \right) \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3} \cdot (1 + 0,06\mu). \quad (5)$$

Здесь B — класс бетона по прочности на сжатие, МПа.

На рис. 2, а, б представлены теоретические кривые зависимости прочностных характеристик фибролакобетона состава Б с различным объемным содержанием фибры от его возраста.

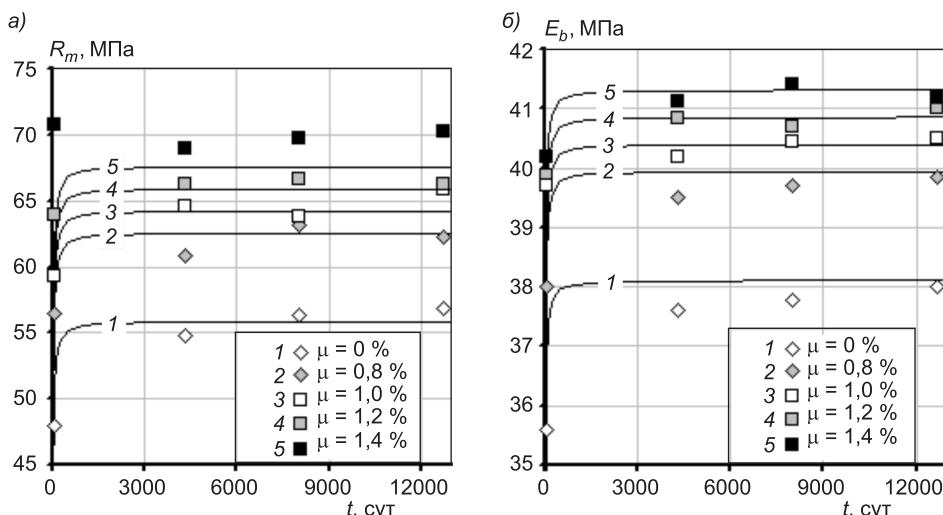


Рис. 2. Эмпирические точки и теоретические кривые роста прочностных характеристик фибролакобетона состава Б во времени
а — рост кубиковой прочности бетона; б — рост начального модуля упругости бетона

Исследование деформаций усадки фиброшлакопембетона проводилось в четыре этапа.

На первом этапе испытывали образцы размером $15 \times 15 \times 60$ см, изготовленные из фиброшлакопембетона состава Б [2], и образцы размером $16 \times 16 \times 310$ см, изготовленные из состава В (см. табл. 1). Время влажностного хранения бетона составляло трое суток. Результаты наблюдений за первые 245 сут представлены на рис. 3, а, б. В течение указанного

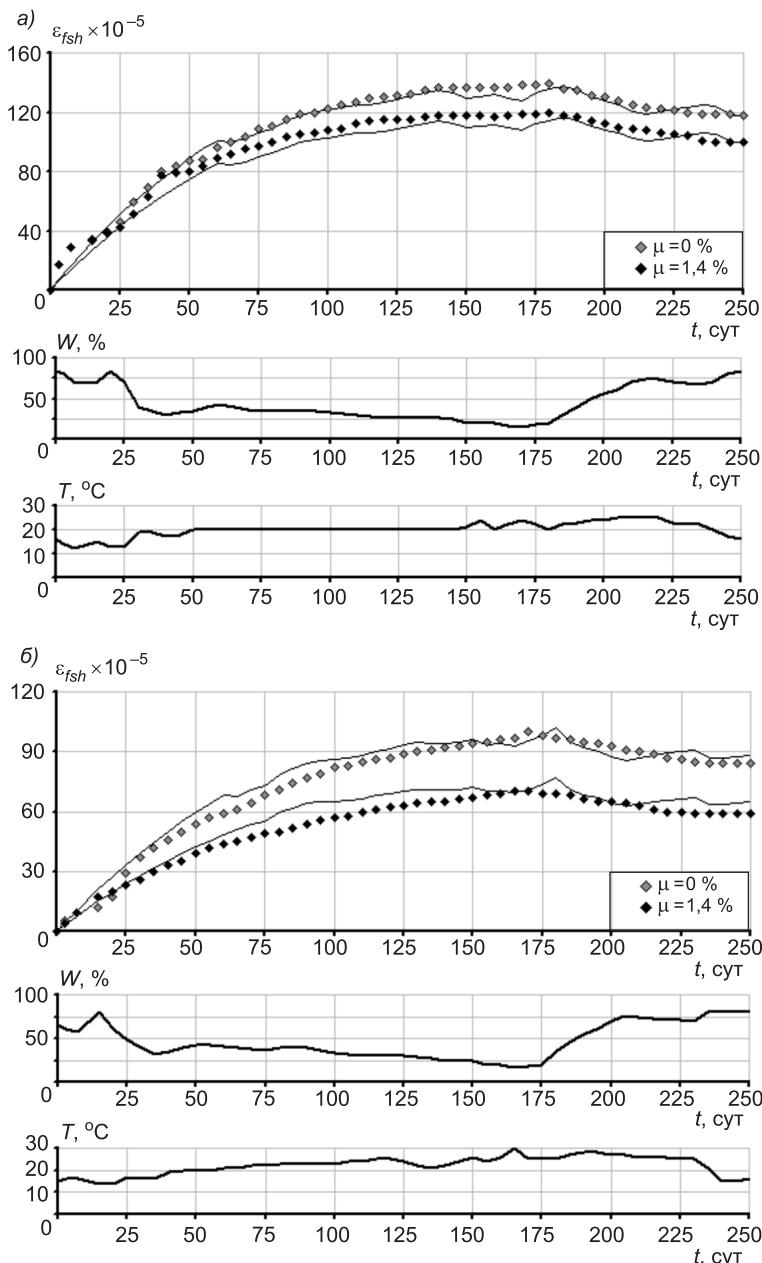


Рис. 3. Эмпирические точки, теоретические кривые изменения усадки в зависимости от влажности и температуры окружающей среды
а — для фиброшлакопембетона состава Б; б — состава В

периода времени температура в помещении лаборатории в среднем была 21 °C, а влажность колебалась от 17 до 85 %.

Для определения предельных деформаций усадки фиброшлакопемзобетона ε_{fsh} в нормальных условиях хранения предложена зависимость [3]:

$$\varepsilon_{fsh}(\infty) \cdot 10^5 = 67,5 + 1,1R_m - 13,2\mu. \quad (6)$$

Следуя рекомендациям [4], вычисление предельных деформаций усадки бетона необходимо производить с учетом коэффициента ξ_{1s} , зависящего от возраста бетона t_W в момент окончания влажностного хранения, а также коэффициентов — ξ_{2s} , учитывающего модуль открытой поверхности бетона, и ξ_{3s} , учитывающего зависимость от влажности среды.

В то же время в формуле, предложенной в [4] для вычисления деформаций усадки бетона в произвольный момент t (в сутках), не учитывается изменение относительной влажности среды с течением времени. Данные, полученные в результате испытаний образцов составов Б и В, показали, что деформации усадки зависят от значения влажности окружающей среды. С целью учета колебаний относительной влажности окружающей среды, возраста бетона в момент окончания влажностного хранения, модуля открытой поверхности бетона и объемного содержания фибровой арматуры в бетоне предложено определять усадочные деформации бетона в произвольный момент времени t по формуле

$$\varepsilon_{fsh}(t) = \varepsilon_{fsh}(\infty) \cdot (1 - e^{-\alpha(t)}) \cdot \xi(t) \xi_{2s} \xi_{3s}, \quad (7)$$

где $\xi(t)$ — коэффициент, учитывающий величину относительной влажности среды хранения бетона в момент времени t (в сутках); α — параметр, характеризующий скорость нарастания деформаций усадки во времени и принимаемый в зависимости от модуля открытой поверхности [4].

Анализ эмпирических данных, приведенных на рис. 3, *a*, *b*, позволил получить следующие зависимости для коэффициента $\xi(t)$:

- при $t < 50$: $\xi(t) = 1,6$;
- при $50 < t < 250$:

$$\xi(t) = 0,013W + 1 \quad \text{при } 10 < W < 40; \quad (8)$$

$$\xi(t) = 1,42 - 0,005W \quad \text{при } 40 \leq W < 85.$$

Здесь W — относительная влажность среды в момент времени t (%).

На втором этапе испытания проводились на образцах-призмах состава Г размером 10×10×40 см с целью исследования усадки фиброшлакопемзобетона, время хранения которого составляло 1000 сут. Время влажностного хранения образцов бетона t_W составляло 10 сут. В опытах варьировались прочность бетонной матрицы R_m и процентное содержание фибр μ в шлакопемзобетоне. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Анализ эмпирических данных, приведенных в табл. 7 и на рис. 4, позволил получить следующие зависимости для коэффициента $\xi(t)$ при $250 < t < 1000$:

$$\xi(t) = 0,01W + 0,2 \quad \text{при } 10 < W < 50; \quad (9)$$

$$\xi(t) = 1,1 - 0,005W \quad \text{при } 50 \leq W < 90.$$

Таблица 7. Средние значения величины относительных деформаций усадки образцов второй серии испытаний

$\mu, \%$	$R_m, \text{МПа}$	Величина относительных деформаций усадки $\varepsilon_{fsh}(t) \cdot 10^{-5}$ при выдержке образцов, сут										
		$t = 7$	28	50	80	130	190	270	390	550	750	1000
0	30,5	10,6	30,4	39,5	50,0	58,5	68,0	74,5	74,2	88,6	96,5	95,4
	35,0	10,4	28,5	39,9	45,4	63,2	68,4	81,0	75,0	84,5	98,3	98,4
	40,5	11,7	30,2	41,4	49,8	65,7	70,0	84,5	84,0	92,0	101,4	108,2
	43,5	12,4	32,8	48,0	57,4	67,5	76,5	82,0	86,2	105,4	106,0	106,5
1,0	34,0	7,8	28,0	35,4	47,0	53,2	69,1	70,8	76,6	86,4	91,2	90,0
	40,0	9,6	29,1	36,4	43,2	56,0	68,4	69,8	72,4	83,0	86,7	96,0
	46,0	10,8	24,7	38,4	48,6	61,3	69,6	71,2	73,4	82,5	88,0	98,3
	51,4	12,4	26,0	47,0	48,4	62,5	70,0	68,4	72,8	86,0	86,6	106
1,2	36,8	10,0	20,7	37,3	41,9	51,1	57,0	59,1	69,6	81,2	88,4	87,0
	41,5	10,9	28,2	34,7	42,6	51,6	66,0	59,2	70,6	82,1	91,4	90,0
	47,6	11,9	23,8	37,2	48,6	58,4	65,0	66,6	72,1	84,3	87,1	96,8
	51,0	13,6	31,6	41,4	56,8	58,0	68,1	66,5	70,8	84,5	89,6	99,4
1,4	38,0	4,8	20,2	36,6	40,0	46,4	60,2	61,0	67,4	80,1	86,2	85,9
	43,0	7,8	26,2	34,5	41,4	46,8	65,0	64,2	68,6	81,8	86,4	91,0
	49,5	9,8	26,3	34,2	49,6	46,2	63,5	69,8	80,0	91,5	97,4	97,0
	52,0	11,8	26,8	40,0	51,4	54,2	66,3	74,0	80,2	92,4	100,2	98,0

На рис. 4 представлены опытные значения (см. табл. 7) и теоретические кривые изменения деформаций усадки шлакопемзобетона прочностью 30,5 МПа и фиброшлакопемзобетона ($\mu = 1,4 \%$) прочностью 38 МПа, построенные с учетом зависимости (9).

На третьем этапе испытания проводились на образцах-призмах состава Д размером 10×10×40 см. Прочность образцов из шлакопемзобетона составляла 30,03 МПа, прочность образцов фиброшлакопемзобето-

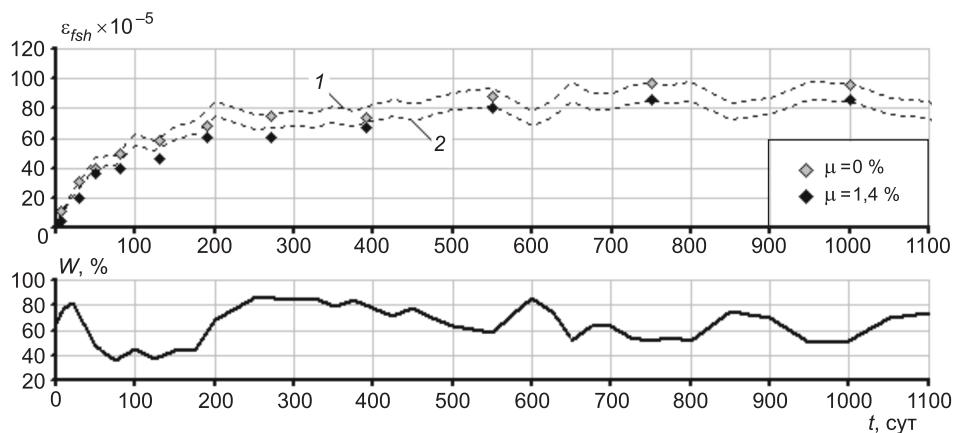


Рис. 4. Эмпирические точки и теоретические кривые изменения деформаций усадки шлакопемзобетона с прочностью 30,5 МПа (1) и фиброшлакопемзобетона ($\mu = 1,4 \%$) с прочностью 38 МПа (2), построенные с учетом зависимости (9); ниже — кривая изменения относительной влажности среды

на ($\mu = 1,4 \%$) составляла 35,56 МПа. Образцы после изготовления выдерживались в камере термовлажностной обработки при температуре 78–80 °С. Затем они находились в нормальных температурно-влажностных условиях в течение 100 сут, после чего были помещены в естественные климатические условия г. Липецка с целью исследования усадки фиброшлакопемзобетона в эксплуатационных условиях. Время наблюдения за деформациями усадки образцов составило 440 сут (03.04.2013–17.06.2014).

Анализ экспериментальных данных позволил получить следующие зависимости для деформаций усадки зрелого фиброшлакопемзобетона $\Delta\varepsilon_{fsh}(t_{i+1} - t_i)$, хранящегося в эксплуатационных условиях за произвольный период от t_i до t_{i+1} суток:

$$\Delta\varepsilon_{fsh}(t_{i+1} - t_i) = \left(\sum_{k=n-1}^0 \Delta\varepsilon_{fsh}(t_{i-k} - t_{i-k-1}) + \alpha\Delta T + \beta\Delta W \right) \cdot \frac{10^{-5}}{1 + 0,015R_m(t)}, \quad (10)$$

где t_i, t_{i+1} — количество суток хранения фиброшлакопемзобетона в начале и в конце периода соответственно;

n — количество предшествующих периодов;

α — коэффициент линейной температурной деформации бетона;

β — коэффициент линейной влажностной деформации бетона;

$\Delta T, \Delta W$ — разность между температурой и относительной влажностью среды в конце и начале периода соответственно;

$R_m(t)$ — прочность фиброшлакопемзобетона в возрасте t сут, определяемая по формуле (4).

Коэффициенты α и β определяются эмпирически, значения данных коэффициентов для фиброшлакопемзобетона приведены в табл. 8. В данной формуле периоды выбираются в зависимости от характера изменений условий среды хранения бетона.

Зависимость (10) позволяет при расчете усадочных деформаций учитывать как предысторию влияния условий окружающей среды на фиброшлакопемзобетон, так и изменение прочности бетона с возрастом.

Эмпирические кривые, полученные по результатам испытания образцов-призм состава Д, и теоретические кривые изменения деформаций усадки, построенные по формуле (10), представлены на рис. 5.

С учетом (10) общую усадку фиброшлакопемзобетона, хранящегося в эксплуатационных условиях t_i суток (здесь t_i — конец исследуемого периода), можно определить по формуле

$$\varepsilon_{fsh}(t_i) = \varepsilon_{fsh}(\infty) + \Delta\varepsilon_{fsh}(t_i - t_{i-1}). \quad (11)$$

Таблица 8. Значения коэффициентов линейной температурной и влажностной деформаций для фиброшлакопемзобетона

Характер изменений среды за период		Значения коэффициентов	
Влажность	Температура	α , град ⁻¹	β
Возрастает	Возрастает	0,4	0,1
Уменьшается	Падает	0,4	-0,4
Возрастает	Падает	0,4	-0,4
Уменьшается	Возрастает	0,4	-0,27

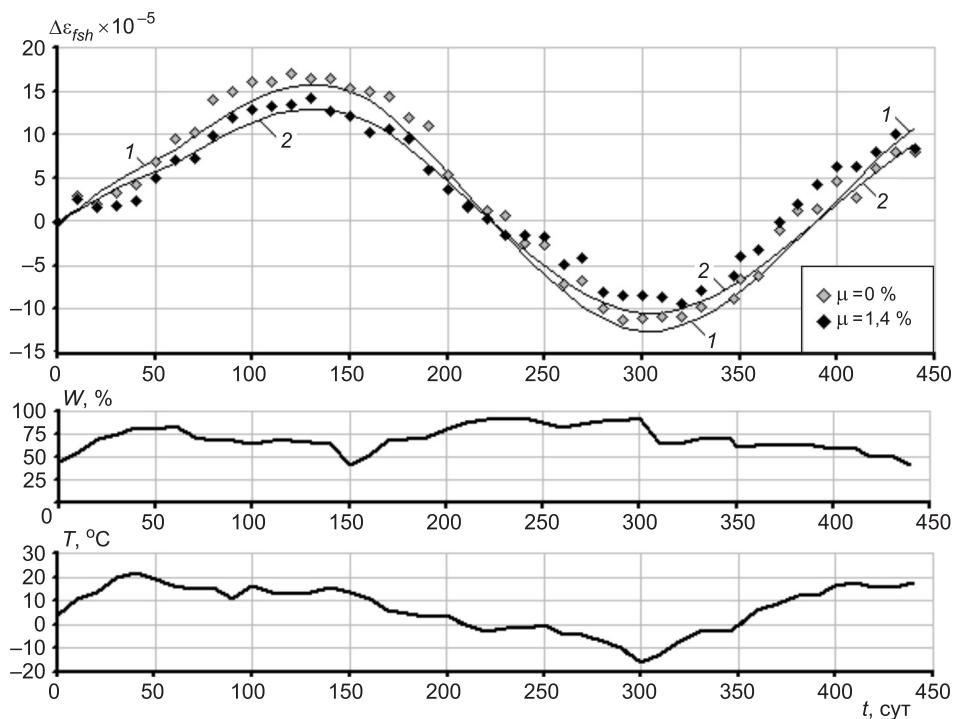


Рис. 5. Эмпирические точки и теоретические кривые изменения деформаций усадки для шлакопемзобетона состава Д ($\mu = 0\%$) (1) и для фиброшлакопемзобетона ($\mu = 1.4\%$) (2); ниже — кривые изменения относительной влажности и температуры окружающей среды

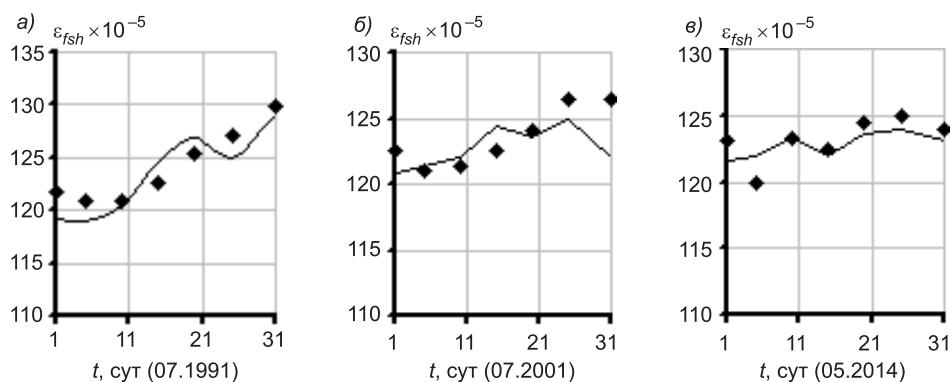


Рис. 6. Эмпирические точки и теоретические кривые, построенные по формуле (11), характеризующие изменение усадки фиброшлакопемзобетона ($\mu = 1.4\%$) состава Б
а — в июле 1991 г., б — в июле 2001 г., в — в мае 2014 г.

Продолжение исследований образцов фиброшлакопемзобетона составов А и Б позволило сделать вывод о высокой достоверности зависимости (11), что проиллюстрировано на рис. 6, а–в.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Черноусов, Р.Н. Прочность и деформативность элементов конструкций транспортных сооружений на основе мелкозернистого сталефиброшлакобетона [Текст] /

- Р.Н. Черноусов // Науч. вестн. Воронеж. гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. — 2011. — № 1(21). — С. 87–97.
2. Черноусов, Н.Н. Высокопрочный дисперсно-армированный шлакопемзобетон [Текст] / Н.Н. Черноусов, И.И. Пантелькин, А.П. Каравичев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1981. — № 7. — С. 70–73.
3. Черноусов, Н.Н. Железобетонные конструкции с использованием дисперсно-армированного шлакопемзобетона [Текст] / Н.Н. Черноусов, И.И. Пантелькин. — М. : АСВ, 1998. — 230 с.
4. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций [Текст] / НИИЖБ Госстроя СССР. — М. : Стройиздат, 1988. — 120 с.

ЧЕРНОУСОВ Николай Николаевич, канд. техн. наук, доц.

Липецкий государственный технический университет

ЧЕРНОУСОВ Роман Николаевич, канд. техн. наук, доц.

Липецкий государственный технический университет

СУХАНОВ Андрей Владимирович, инж.

Липецкий государственный технический университет

Получено 09.06.14

Chernousov Nikolai Nikolayevich, candidate of technical sciences, assistant professor, Lipetsk State Technical University, Russia

Chernousov Roman Nikolayevich, candidate of technical sciences, assistant professor, Lipetsk State Technical University, Russia

Sukhanov Andrey Vladimirovich, engineer, Lipetsk State Technical University, Russia

INFLUENCE OF AGE HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED SLAG CONCRETE AT ITS STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS

The results of studies of growth cube strength and initial modulus of fiber reinforced slag concrete samples-prisms. Researches fiber reinforced slag concrete shrinkage strain changes depending concrete age and storage conditions of the experimental samples — temperature and relative humidity of the environment. In experiments ranged matrix composition, a volume fibric armature and open surface area of the concrete. The dependencies, allowing a high degree of certainty to determine the strength of concrete, initial modulus and shrinkage fiber reinforced slag concrete different ages and different conditions.

Key words: fiber reinforced slag concrete, shrinkage, relative humidity, initial modulus of elasticity, durability on compression.

REFERENCES

1. Chernousov, R.N. Strength and deformation of structural elements on the basis of transport facilities fine steel fiber cinder slag concrete [Text] / R.N. Chernousov // Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. — 2011. — N 1(21). — P. 87–97.
2. Chernousov, N.N. High-dispersion-reinforced slag concrete [Text] / N.N. Chernousov, I.I. Pantelkin, A.P. Karavichev // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1981. — N 7.— P. 70–73.
3. Chernousov, N.N. Concrete structures using particulate reinforced fiber concrete [Text] / N.N. Chernousov, I.I. Pantelkin. — M. : ASV, 1998. — 230 p.
4. Recommendations for accounting creep and shrinkage of concrete in calculating concrete constructions [Text]. — M. : Stroyizdat, 1988. — 120 p.

УДК 691.54:678.046.3:620.193

**В.П. СЕЛЯЕВ, А.А. СЕДОВА, Л.И. КУПРИЯШКИНА, А.К. ОСИПОВ,
Е.И. КУПРИЯШКИНА**

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПОВРЕЖДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ,
НАПОЛНЕННОГО ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДОЙ,
РАСТВОРАМИ ХЛОРИСТОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ**

Посредством статического контакта фаз изучено взаимодействие растворов хлористово-водородной кислоты различной концентрации с наполненным цементным композитом. Проанализированы повреждения материалов на цементном связующем с учетом степени наполнения цеолитсодержащими породами при взаимодействии с агрессивной средой.

Ключевые слова: цементный камень, цеолитсодержащая порода, хлористоводородная кислота, осадок, структура, кинетические кривые, прочность.

За последние годы строительная индустрия развивается быстрыми темпами. Особенno бурно расширяется производство различных видов бетонов, обладающих заданным набором эксплуатационных и физико-механических характеристик. При этом большое значение приобретают технологии производства бетонов, основанные на экономии ресурсов как материальных, так и энергетических. Перспективны направления исследований, связанные с разработкой бетонов, обеспечивающих снижение расхода цемента.

Широкое применение в производстве строительных материалов находят цеолитсодержащие породы, которые наряду с экономией цемента на 20–30 % позволяют улучшить ряд свойств бетонов. Значительно повышается коррозионная стойкость, морозостойкость и прочность. В Республике Мордовия имеются большие запасы цеолитсодержащих пород (ЦСП), дешевизна, высокие адсорбционные и ионообменные свойства которых делают экономически целесообразным использование их в строительной индустрии.

Задача настоящей работы — изучение процессов взаимодействия цементного камня, наполненного ЦСП, с растворами хлористоводородной кислоты. Проблема повреждения строительных материалов под воздействием агрессивных сред в настоящее время весьма актуальна. Самыми распространенными являются кислотная, углекислотная, сульфатная коррозия и коррозия выщелачивания [1]. Свободные кислоты встречаются в сточных водах промышленных предприятий. Кислая среда может возникнуть также при конденсации на поверхности конструкций влаги, если в атмосфере содержатся агрессивные вещества. Такая атмосфера характерна для современных промышленных центров. Поэтому необходимо знать процессы, возникающие при кислотной коррозии бетона. Метод заключался в выдерживании цементных композитов (цемент М400), наполненных ЦСП на 10, 20, 30 % в растворах HCl различной концентрации: 1,0; 2,0; 3,0 %. Композиты экспонировались в агрессивной среде 7,

© Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Куприяшкина Е.И.,
2014

14, 28 сут. Кислотность растворов контролировалась с помощью pH-метра, «Эксперт-pH». По истечении 7, 14, 28 сут композиты вынимали из раствора, подсушивали на воздухе на фильтровальной бумаге и испытывали образцы на сжатие и изгиб. Фильтрат анализировали на содержание ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} комплексонометрическим методом. Содержание ионов Fe^{3+} и Al^{3+} определяли спектрометрическим методом. Осадок, выделенный из цементного камня в процессе контакта с HCl , сушили, элементный состав исследовали энергодисперсным рентгеновским методом. Структура осадка изучалась с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа «Quanta 200i 3D FEI».

Установлен вид и характер кинетических зависимостей $\text{pH} — t$, сут. Из кинетических кривых, представленных на рис. 1, видно, что pH растворов в 1%-ной кислоте повышается быстрее, чем в 2- и 3%-ной. Равновесие наступает в системе «цементный камень — кислота» через 7–10 сут в 1%-ной кислоте ($\text{pH} \approx 11$). В 2- и 3%-ной — через 15 сут, при $\text{pH} \approx 10$ в 2%-ной и $\text{pH} \approx 9$ в 3%-ной кислоте.

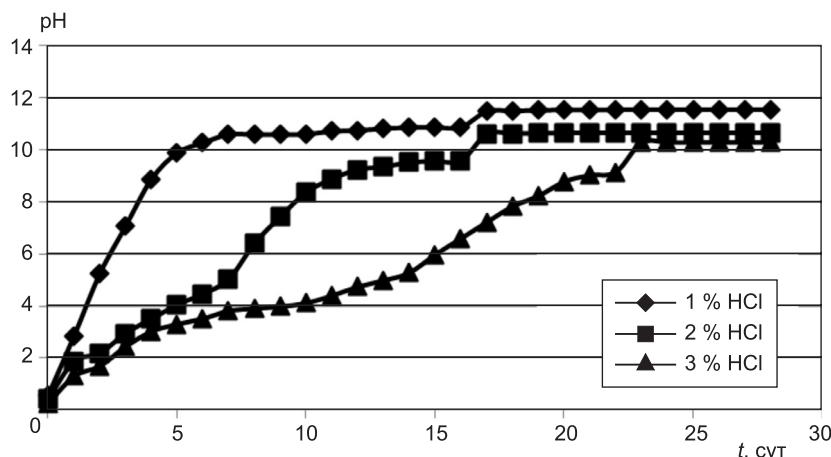


Рис. 1. Динамика изменения pH среды при выдерживании цементного камня в растворах соляной кислоты различной концентрации в течение 28 сут. Содержание ЦСП в цементном камне 20 %. Диаметр гранул ЦСП — 0,315 мм

Вероятно, при контакте бетона с водным раствором сильной кислоты (HCl) происходит разрушение гидросиликата кальция и других гидратных фаз с образованием гидроксида кальция, растворимость которого при температуре 18–20 °C равна 1,1 г/л. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ переносится в окружающую среду, что приводит к повышению pH раствора.



Образовавшийся гидроксид кальция частично нейтрализуется кислотой, а с повышением концентрации кислоты pH раствора понижается. Понижение pH раствора может происходить и за счет увеличения ЦСП в цементном камне. В высокоосновном связующем содержание CaO составляет около 65 %, а в ЦСП Атяшевского месторождения — до 7,16 %. При увеличении степени наполнения до 30 % (от массы цемента) наблюдается снижение pH до 9 вместо 11. Хлорид кальция, образовавшийся при взаимодействии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с HCl , хорошо растворяется в воде, поэтому почти полностью вымывается из пор бетона и большого

влияния не оказывает на равновесие «бетон — кислота». Разрушение гидросиликата кальция приводит к образованию геля кремнекислоты $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, который отличается малой растворимостью в воде (около 0,01 г/л) по сравнению с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Поэтому почти весь гель кремнекислоты остается в порах бетона, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию). Таким образом, процесс коррозии бетона становится в определенной степени самотормозящимся. Чем больше образуется геля кремнекислоты, тем плотнее и менее проницаем он для ионов кальция, тем сильнее тормозится процесс коррозии во времени [2].

Полученные данные подтверждают графики изменения прочности при сжатии цементных композитов, наполненных ЦСП (рис. 2). Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии свидетельствуют о наибольшей прочности образцов, выдержаных в кислоте с меньшей концентрацией (1 %). При выдерживании образцов в течение 7 сут происходит понижение прочности. При дальнейшем экспонировании (14 сут)

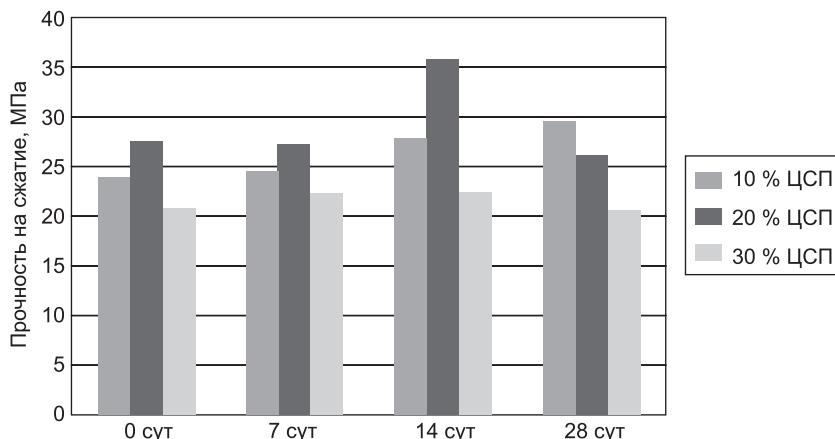


Рис. 2. Влияние степени наполнения ЦСП на прочность при сжатии цементных композитов, обработанных 1%-ной соляной кислотой

прочность образцов повышается за счет образования в порах геля кремнекислоты, который закупоривает поры, уплотняет материал и препятствует дальнейшему проникновению агрессивной среды в глубь цементного камня. Особенно это проявляется в образцах при степени наполнения ЦСП на 20 %. На 14-е сутки выдерживания цементного камня в 1%-ной кислоте HCl прочность составила 35,9 МПа. Накапливание большего объема геля кремнекислоты приводит к разрыву пор, разрушению структуры и к дальнейшему понижению прочности.

В табл. 1 представлены результаты анализа фильтрата после выдерживания цементного камня в растворах хлористоводородной кислоты различной концентрации. В большом количестве содержатся ионы Ca^{2+} и Fe^{3+} , в меньшем — ионы Mg^{2+} , Al^{3+} . При этом содержание указанных ионов зависит от концентрации кислоты, содержания ЦСП, времени контакта цементного камня с кислотой. Количество ионов Ca^{2+} и Fe^{3+} возрастает по мере увеличения концентрации кислоты и времени контакта «цементный камень — кислота».

Снижение концентрации Fe^{3+} в фильтрате по мере увеличения времени контакта и доли ЦСП до 30 %, вероятно, связано с переходом Fe^{3+} в

Таблица 1. Результаты анализа фильтрата ($n = 3$; $t_{p,f} = 4,3$; $p = 0,95$)

t , сут	ЦСП, %	(HCl), W, %	C(Ca ²⁺)	C(Fe ³⁺)	ЦСП, %	C(Ca ²⁺)	C(Fe ³⁺)	ЦСП, %	C(Ca ²⁺)	C(Fe ³⁺)
			мг/л	мг/л		мг/л	мг/л		мг/л	мг/л
7	10	1	1,492 ± 0,003	0,470 ± 0,005	20	1,843 ± 0,006	0,090 ± 0,005	30	1,468 ± 0,007	0,125 ± 0,006
		2	2,347 ± 0,008	8,915 ± 0,004		4,027 ± 0,008	6,780 ± 0,010		2,562 ± 0,009	0,250 ± 0,007
		3	5,200 ± 0,008	14,830 ± 0,010		5,393 ± 0,005	11,421 ± 0,012		5,005 ± 0,008	2,625 ± 0,011
	14	1	1,742 ± 0,007	1,385 ± 0,009		1,698 ± 0,007	0,205 ± 0,007		1,775 ± 0,010	Следы
		2	3,458 ± 0,009	4,975 ± 0,007		3,871 ± 0,008	0,154 ± 0,006		3,460 ± 0,007	Следы
		3	5,586 ± 0,004	9,160 ± 0,008		5,626 ± 0,010	0,674 ± 0,008		5,543 ± 0,011	Следы
	28	1	1,694 ± 0,006	0,009 ± 0,005		0,996 ± 0,012	0,089 ± 0,009		1,927 ± 0,009	Следы
		2	3,183 ± 0,007	0,121 0,009		3,609 ± 0,019	0,144 ± 0,007		3,766 ± 0,006	Следы
		3	4,427 ± 0,007	0,177 ± 0,008		5,148 ± 0,009	0,182 ± 0,011		5,677 ± 0,008	Следы

осадок, эти ионы образуют малорастворимый гидроксид Fe(OH)_3 уже при $\text{pH } 2\text{-}3$. А также можно предположить, что повышение доли ЦСП в бетоне понижает содержание железа в цементном камне. В цементе Fe_2O_3 содержится 4,20 %, а в цеолитсодержащей породе — 2,80 %.

Элементный анализ осадка, полученного из цементного камня в процессе контакта его с хлороводородной кислотой по данным энергодисперсного рентгеновского микронализа, свидетельствует, что он состоит из оксидов кремния, кальция, железа, алюминия. В меньшей мере содержатся оксиды магния, калия, натрия, титана. Содержание перечисленных оксидов зависит от концентрации хлористоводородной кислоты, содержания ЦСП, продолжительности контакта «цементный камень — кислота». В табл. 2 представлены результаты анализа по оксидам, имеющим важное значение в оценке процесса взаимодействия наполненного цементного камня и кислоты.

Таблица 2. Результаты анализа осадка

t , сут	ЦСП, %	W(HCl), %	Содержание оксидов, %		
			SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
7	10	1	44,65	6,65	17,81
		2	52,26	2,85	24,31
		3	62,66	3,93	14,96
28	20	1	13,48	34,60	3,86
		2	30,72	17,76	13,87
		3	44,67	8,38	13,98
7	30	1	53,95	5,84	15,70
		2	65,31	2,52	13,07
		3	62,66	3,00	8,55
28	30	1	37,91	19,27	11,64
		2	57,70	6,62	9,44
		3	64,35	4,63	8,00
7	30	1	44,44	5,67	7,37
		2	45,00	4,02	5,60
		3	58,99	4,81	4,30
28	30	1	27,02	20,16	11,10
		2	30,90	13,17	4,87
		3	52,65	6,96	4,03

Согласно результатам анализа осадка, содержание SiO_2 в осадке увеличивается по мере увеличения концентрации хлористоводородной кислоты, а значит, с повышением концентрации HCl усиливается процесс разрушения бетона и увеличивается количество геля кремниевой кислоты, который закупоривает поры бетона и образует осадок наряду с другими оксидами.

Содержание CaO в осадке понижается по мере увеличения концентрации хлористоводородной кислоты и продолжительности контакта «бетон — кислота», что, вероятно, связано с тем, что гель кремниевой кислоты частично закупоривает поры бетона, который становится менее проницаем для ионов кальция. Снижение содержания CaO и Fe_2O_3 в осадке связано также с повышением доли цеолитсодержащей породы

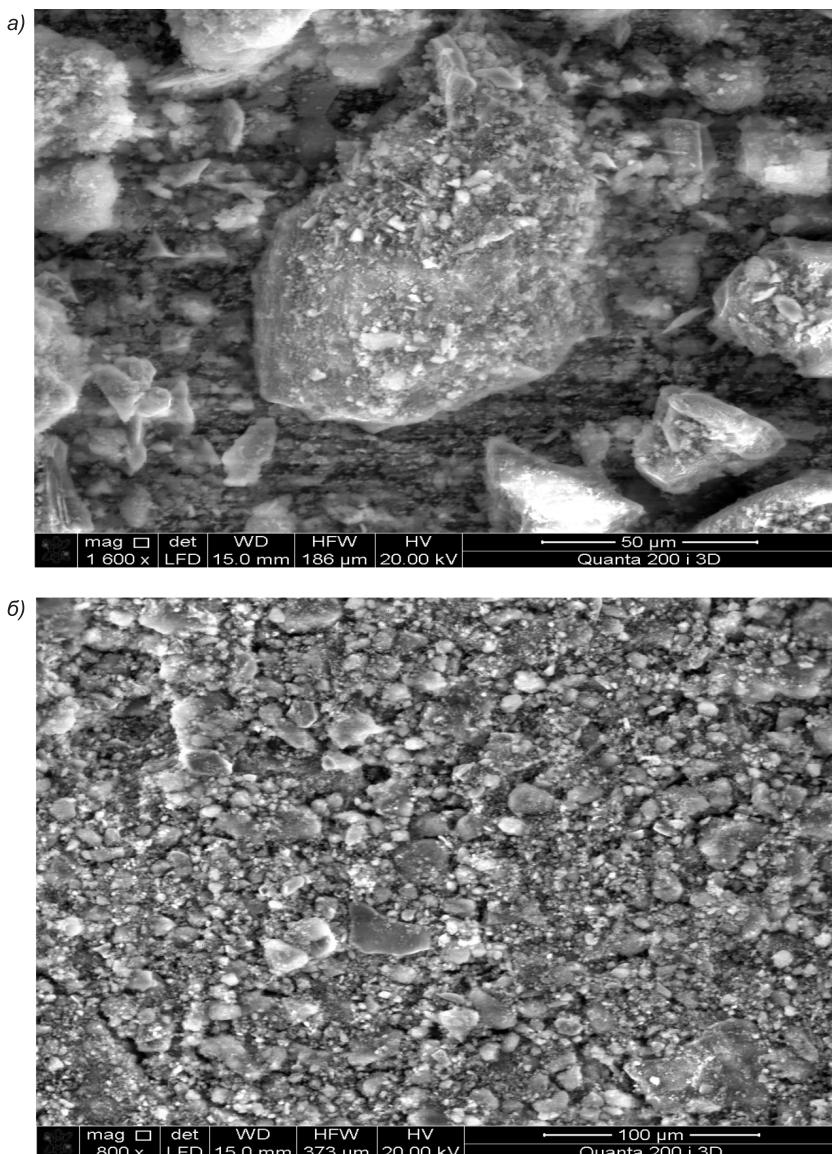


Рис. 3. Микроструктура осадка, полученного из цементного композита, содержащего 10 % ЦСП (а); 30 % ЦСП (б)

в бетоне. В цеолитсодержащей породе содержание указанных компонентов ниже, чем в цементном связующем.

Метод растровой электронной микроскопии позволил установить структуру осадков. Из рис. 3 видно, что отложение новообразования происходит в местах, где имеются дефекты в цементном камне. При выдерживании цементного камня со степенью наполнения ЦСП, равной 10 % (рис. 3, а), имеются отложения объемные, неравномерные с наличием пустот и трещин. С увеличением доли ЦСП до 30 % увеличивается масса осадка (рис. 3, б). Осадок объемный рыхлый, так как состоит из оксидов, которые имеют аморфную структуру.

Под действием кислоты на цементный камень образуется кальциевая соль и аморфные бессвязные массы. Образовавшиеся продукты, растворимые в воде, выносятся ею из бетона, нерастворимые же остаются в виде рыхлых масс.

Таким образом, на прочность цементного камня влияет концентрация агрессивной среды и степень наполнения. Чем выше концентрация кислоты, тем сильнее идет процесс разрушения цементного камня (рН-фактор). Для замедления процессов коррозии необходимо вводить наполнители, однако степень наполнения цементного камня цеолитсодержащей породой не должна превышать 20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Соломатов, В.И. Химическое сопротивление материалов [Текст] / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : РААСН, 2001. — 284 с.
- Рахимбаев, Ш.М. Процессы кольматации при химической коррозии цементных систем. Физическая модель [Текст] / Ш.М. Рахимбаев // Бетон и железобетон. — 2013. — № 4. — С. 30–32.

*СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
СЕДОВА Анна Алексеевна, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
ОСИПОВ Анатолий Константинович, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
КУПРИЯШКИНА Елена Игоревна, студ.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск*

Получено 18.06.14

Selyaev Vladimir Pavlovich, RAASN academician, doctor of technical sciences, professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Sedova Anna Alexeevna, candidate of chemical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, candidate of technical sciences, professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Osipov Anatoliy Konstantinovich, candidate of chemical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Elena Igorevna, student, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**STUDY OF DAMAGE PROCESS OF CEMENT
STONE, FILLED WITH ZEOLITE-CONTAINING ROCKS,
SOLUTIONS OF HYDROCHLORIC ACID**

Means of a static phase contact the interaction hydrochloric acid solutions of various concentrations with a full cement composite. Analyzed material damage to the cement binder with the degree of filling of the zeolite-containing rocks in the interaction with aggressive media.

Key words: cement stone, rock containing zeolite, hydrochloric acid, the precipitate, structure, kinetic curves, strength.

REFERENCES

1. Solomatov, V.I. Chemical resistance of materials [Text] / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev, Yu.A. Sokolova. — 2nd ed., rev. and compl. — M. : RAASN, 2001. — 284 p.
 2. Rakhimbaev, Sh.M. Mudding processes in the chemical corrosion of cement systems. Physical model [Text] / Sh.M. Rakhimbaev // Concrete and reinforced concrete. — 2013. — N 4. — P. 30–32.
-

УДК 691.42

А.Н. САПЕЛИН, М.Ю. ЕЛИСТРАТКИН

ЭФФЕКТИВНЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

На основе полых алюмосиликатных микросфер получен обжиговый керамический материал, обладающий пониженным приростом показателя теплопроводности по мере увлажнения. Рассмотрена возможность применения подобного материала для возведения участков стен малоэтажных зданий, работающих в условиях периодического увлажнения.

Ключевые слова: алюмосиликатные микросфера, глина, сорбционное увлажнение, цокольная часть здания.

В настоящее время происходит рост объемов индивидуального жилищного строительства. В связи с этим производство и продажа строительных материалов по-прежнему экономически выгодны [1–4]. Однако большинство ниш на этом рынкеочно заняты. Так, в качестве эффективных стеновых материалов надежно удерживают позиции газосиликат, керамзитобетон, древесина. Выпуском этих материалов, как правило, занимаются крупные заводы с устоявшейся репутацией, отлаженной инфраструктурой, высокопроизводительным оборудованием, позволяющим удерживать себестоимость продукции на достаточно низком уровне, а качество на высоте.

На долю малого бизнеса, развитие которого является одной из приоритетных экономических задач, остается сфера оказания различных строительных услуг, производство декоративных металлоизделий, тротуарной плитки и искусственного облицовочного камня и т.п. Ожидать успешного старта можно, только делая ставку на относительно простой с технологической точки зрения продукт, обладающий востребованным набором свойств и заполняющий одну из существующих ниш, на весьма насыщенном рынке строительных материалов.

Если проанализировать с точки зрения энергоэффективности, служащей приоритетным направлением развития строительного комплекса, применяемые материалы в среднестатистическом современном коттедже или таунхаусе, то на фоне удовлетворительного состояния всего находящегося выше отметки «0» нельзя не обратить внимания на цокольную часть здания. Наиболее часто используемым материалом для возведения стены на уровне земли уже многие годы остается рядовой керамический кирпич (250×120×65 мм), выпускаемый по ГОСТ 530–2012 методом пластического формования. Данный стандарт, в части требований по стабильности геометрических характеристик, наличия дефектов, теплотехнических показателей, применительно к подобному кирпичу, является прямым наследником редакции 1980 г. Вероятно, такие мягкие требования были продиктованы необходимостью сохранить старые производства, реконструкция которых нецелесообразна. В нынешнее время применение

такого материала можно оправдать только низкой ценой, доступностью и отсутствием прямых конкурентов.

Как известно, основная сложность работы стенового материала в кладке цокольной части стены заключается в повышенной влажности этого участка. Этим с технической точки зрения оправдано использование керамического кирпича, являющегося водостойким материалом. В то же время термическое сопротивление стены на этом участке и морозостойкость толстошовной кладки приносятся в жертву. Безусловно, эти проблемы решаются за счет создания декоративно-облицовочного слоя снаружи и применения пенополистирольной (или другой водостойкой) теплоизоляции. Однако еще требуется обеспечить надежное крепление защитного слоя к стене, чему препятствует наружное размещение утеплителя. В случае же утепления внутренней части стены точка росы смешается далеко внутрь конструкции, повышается ее влажность со всеми вытекающими последствиями. В большинстве случаев теплоизоляция цоколя попросту не делается, что дает вклад до 10–15 % в общий объем потерь тепла.

Наиболее простым решением для возведения цокольной части здания было бы применение теплоизоляционно-конструкционного материала, сочетающего достаточный уровень прочности с относительно низкой теплопроводностью и главное способного сохранять свои теплоизоляционные свойства в условиях повышенной влажности.

Весьма перспективным материалом для решения указанных строительных задач может стать керамический композит на основе алюмосиликатных микросфер, на который имеется патент. Алюмосиликатные микросфера (ценосфера, легкая фракция золы-уноса, ЛФЗУ, зольные микросфера, микросфера энергетических зол, АСПМ, alumosilicate microsphere, cenospheres, flyashcenospheres, FAC) — полые стеклокристаллические микросфера размером от 20–50 до 400–500 мкм (наиболее часто от 100 до 250 мкм).

Ценосфера образуются в топках тепловых электростанций, работающих на каменном угле. При высоких температурах силикатный минеральный материал углей плавится и в газовом потоке продуктов сгорания дробится на мельчайшие капли. Газовые включения в минеральных частицах при нагреве расширяются и раздувают отдельные капли расплава, т.е. капли, в которых внутреннее давление газа уравновешивается силами поверхностного натяжения, образуют полые шарики. В остальных происходит разрыв капель (внутреннее давление больше сил поверхностного натяжения) либо они остаются просто силикатными шариками, сплошными или пористыми (поверхностное натяжение больше внутреннего давления). Образующиеся в процессе горения микросфера выносятся топочными газами из высокотемпературной зоны, накапливаются в золосборнике ТЭС и смываются водой в пруды-золонакопители. В прудах легкие микросфера всплывают на поверхность, тем самым самостоятельно отделяясь от других компонентов золы. Впоследствии материал собирается, сушится и просеивается.

Микросфера по совокупности своих свойств уникальны. Образуясь как отход одного производства, они могут стать основой целой гаммы строительных материалов. Залог этого — простота их применения. Нали-

чие непроницаемой оболочки у каждой из частиц предрасполагает к получению композитов на их основе путем омоноличивания с помощью вяжущих веществ. Пирогенный характер процесса образования микросфер создает хорошие предпосылки для их использования в качестве пористого микрозаполнителя при изготовлении легких керамических изделий.

Для получения обжиговых композитов на основе микросфер были использованы следующие материалы: микросфера с насыпной плотностью $360 \text{ кг} / \text{м}^3$ — в качестве микрозаполнителя, молотое стекло, глина, вода.

Важной особенностью микросфер, выгодно выделяющей их из большинства других пористых заполнителей, является наличие стекловидной непроницаемой оболочки частиц, отсутствие открытых пор и, как следствие, низкая сорбция воды материалами на их основе (рис. 1).

Технология получения композита отличается простотой и состоит из нескольких этапов:

1. Дозирование и смешивание порошкообразной глины с микросферами. Добавление воды и тщательное перемешивание до образования однородной формовочной массы.

2. Формование изделий в пресс-форме при давлении 5–10 МПа.

3. Обжиг по следующему режиму: подъем температуры до 100°C за 15 мин, выдержка при 100°C 10 мин, поднятие температуры до 650°C за 120 мин, выдержка при температуре 650°C 60 мин, поднятие температуры до 1050°C за 120 мин, выдержка при температуре 1050°C 120 мин, нормальное остывание печи.

При наличии соответствующей оснастки возможно изготовление изделий практически любых типоразмеров от 1 до 14,3 НФ.

Составы и основные физико-механические свойства материалов приведены в табл. 1. Морозостойкость составляет более 50 циклов.

Таблица 1. Состав и свойства образцов на глиняном связующем

Состав	Состав, % по массе			Давление прессования, МПа	Основные свойства материала	
	микросфера	глина	молотое стекло		средняя плотность, $\text{кг} / \text{м}^3$	прочность на сжатие в сухом состоянии, МПа
МСГ-1	60,0	30,0	10,0	5	862	16,4
МСГ-2	47,6	39,3	13,1	5	941	18,4
МСГ-3	43,5	14,1	42,4	5	1324	26,3
МСГ-4	47,6	13,0	39,4	10	1300	38,1
МСГ-5	43,5	14,1	42,4	10	1329	28,2
МСГ-6	47,6	39,3	13,1	10	1012	22,2
МСГ-7	42,0	15,0	43,0	5	1018	18,3



Рис. 1. Сорбционная кривая алюмосиликатных микросфер

Таблица 2. Сравнительная теплопроводность материалов

Материал	Средняя плотность, кг / м ³	Теплопроводность, Вт / (м · К), в состоянии	
		сухом	водонасыщенном
Ячеистый бетон	970	0,21	0,37
Материал на микросферах МСГ-2	941	0,22	0,27

Как видно из табл. 2, в сравнении с ячеистым бетоном сопоставимой плотности керамический композит на основе микросфер имеет большую теплопроводность в сухом состоянии. Однако прирост этого показателя при насыщении материала водой существенно ниже. Для материала МСГ-2 он составил чуть более 22 % против 76 % у ячеистого бетона. Коэффициент приращения теплопроводности на 1 % влажности (КТК) у материалов на основе микросфер колеблется в пределах 2–3 %, что в 2–3 раза меньше таких аналогов, как ячеистых бетонов (4–7 %), бетона на природных пористых заполнителях (4–7 %), керамзитобетона (4–6 %). Полное насыщение материала водой в реальных условиях вряд ли возможно. Поэтому можно считать, что величина снижения термического сопротивления конструкции из предлагаемого композита в наиболее влажные периоды времени не превысит 10–15 %.

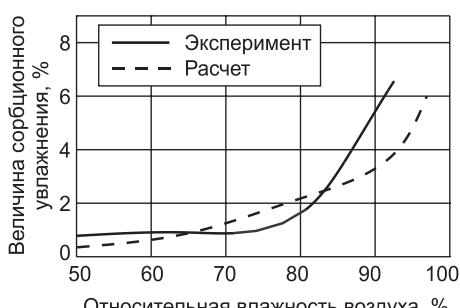


Рис. 2. Зависимость величины сорбционного увлажнения материала МСГ-2 от влажности окружающей среды

показаны на графике (рис. 2). При естественной относительной влажности воздуха 60–80 % влажность материала повысится всего на 2–3 %.

Анализ особенностей применения материалов на основе алюмосиликатных микросфер в качестве конструкционно-теплоизоляционного был

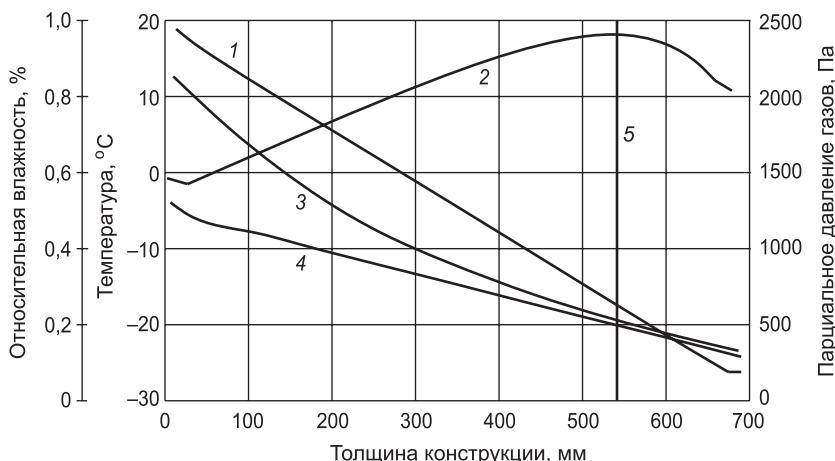


Рис. 3. Распределение характеристик в толще стены

1 — температура; 2 — относительная влажность; 3, 4 — парциальное давление внутреннего воздуха и насыщенного пара; 5 — расположение плоскости возможной конденсации

проводен для ограждающей конструкции, состоящей из внутренней штукатурки (30 мм, предполагается наличие подвального помещения), кладки из крупноформатного кирпича на основе алюмосиликатных микросфер и глины (650 мм), наружной штукатурки (10 мм). Параметры, обеспечивавшие требуемый уровень теплозащиты выбранных ограждающих конструкций, рассчитаны для условий Московского региона.

При расчете температуры на внутренней поверхности ограждения для наиболее холодной пятидневки в Москве было установлено, что условие не выпадения конденсата выполняется (рис. 3).

Поведение рассматриваемой ограждающей конструкции было математически смоделировано в программе WUFI®.

На рис. 4 показано распределение влаги в слоях материала и колебание общего ее содержания в конструкции с течением времени (рис. 5)

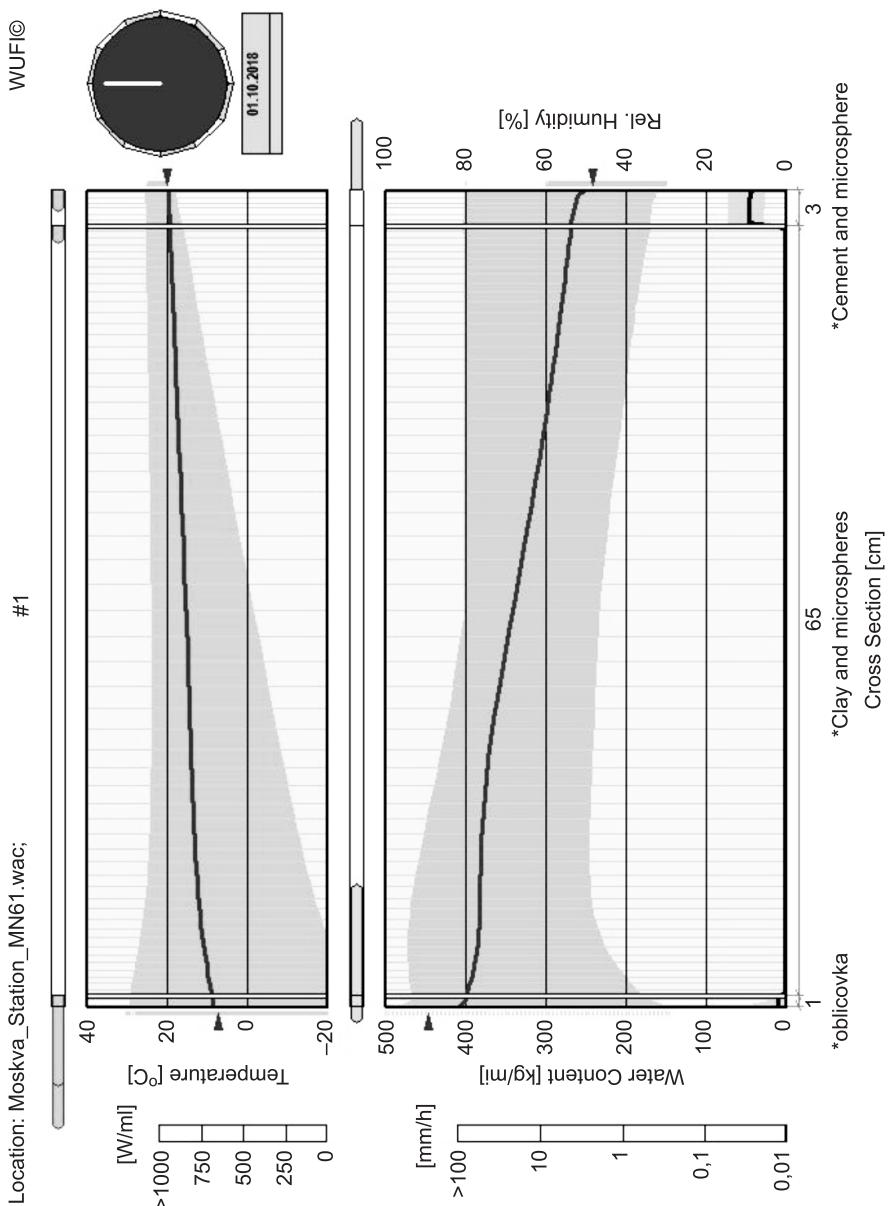


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования

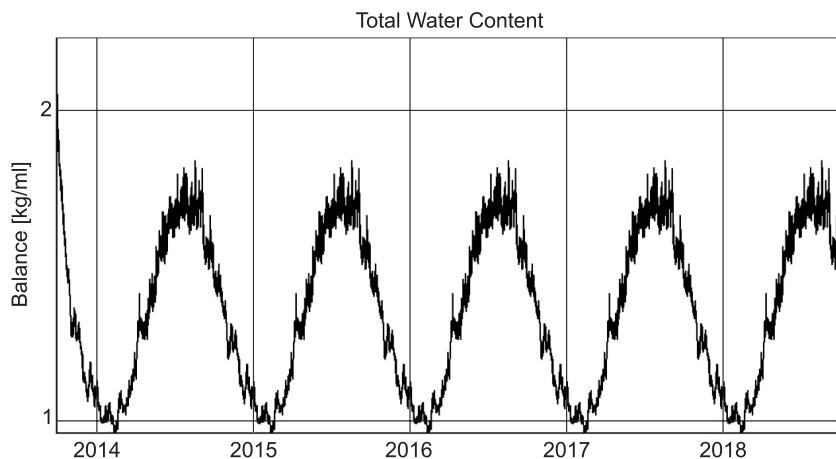


Рис. 5. Общее водосодержание в ограждающей конструкции в зависимости от времени

при начальной равновесной влажности, характерной для 80 % относительной влажности воздуха.

Результатами моделирования в программе WUFI® можно подтвердить отсутствие накопления влаги за годовой цикл эксплуатации.

Кроме использования для возведения цокольной части зданий, подобный керамический композиционный материал на основе микросфер может быть с успехом применен и в других ситуациях, например, для кладки дымоходов и вентиляционных каналов, по которым проходят горячие дымовые газы и воздух, содержащие большое количество паров воды. Хорошие теплофизические показатели материала позволяют избежать быстрого снижения температуры газового потока даже при большой протяженности газохода, обеспечивая хорошую тягу и надежную и безопасную работу теплового оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик, В.С. Геоника. Предмет и задачи: монография [Текст] / В.С. Лесовик. — 2-е изд., доп. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. — 219 с.
2. Lesovik, V.S. Geonics. Subject and objectives [Текст] / V.S. Lesovik. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. — 100 р.
3. Лесовик, В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов [Текст] / В.С. Лесовик // Изв. вузов. Строительство. — 1994. — № 7. — С. 96.
4. Лесовик, В.С. Влияние состава сырья на свойства безавтоклавных силикатных материалов [Текст] / В.С. Лесовик, А.А. Володченко // Вестн. БГТУ. — 2013. — № 1. — С. 10–15.

САПЕЛИН Андрей Николаевич, асп.

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва

ЕЛИСТРАТКИН Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 10.06.14

Sapelin Andrey Nikolaevich, post-graduate student, Research Institute for Building Physics, Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia

Elistratkin Mikhail Yurievich, candidate of technical sciences, assistant professor,
Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

EFFECTIVE CERAMIC MATERIAL FOR SPECIAL TASKS IN LOW-RISE BUILDING

Based on hollow microspheres obtained calcined aluminosilicate ceramic material having a low heat conductivity increase as moisture. The possibility of using such material for the construction of low-rise buildings walls stations operating under periodic moistening.

Key words: cenospheres, clay, moisture sorption, the plinth of the building.

REFERENCES

1. Lesovik, V.S. Geonics. Subject and tasks: monograph [Text] / V.S. Lesovik. — 2nd., ext. — Belgorod : BSTU, 2012. — 219 p.
 2. Lesovik, V.S. Geonics. Subject and objectives [Text] / V.S. Lesovik. — Belgorod : BSTU, 2012. — 100 p.
 3. Lesovik, V.S. Genetic basis of energy savings in the building materials industry [Text] / V.S. Lesovik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1994. — N 7. — 96 p.
 4. Lesovik, V.S. Influence of the feed composition on the properties of silicate materials [Text] / V.S. Lesovik, A.A. Volodchenko // Herald BSTU. — 2013. — N 1. — P. 10–15.
-

УДК 691.55:666.914.5

В.И. ЛОГАНИНА, И.С. ПЫШКИНА

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Приведены сведения о химическом и минералогическом составе гидросиликатной добавки, синтезированной в присутствии диатомита. Показано, что введение добавок гидросиликатов способствует ускорению набора механической прочности.

Ключевые слова: добавка, гидросиликаты кальция, сухие строительные смеси, диатомит.

В ранее проведенных исследованиях установлено, что применение добавок на основе гидросиликатов кальция (ГСК) позволяет получить известковые сухие строительные смеси с более высокими эксплуатационными свойствами [1, 2]. Синтезируемые гидросиликаты представляют собой смесь низкоосновных и высокоосновных гидросиликатов [3]. Учитывая, что низкоосновные гидросиликаты кальция обладают более высокой прочностью, в продолжение дальнейших исследований при синтезе наполнителя, использовали вещества, содержащие аморфный кремнезем, в частности, диатомит Инзенского месторождения. К натриевому жидкому стеклу добавлялся диатомит, после перемешивания вводился 10%-ный раствор CaCl_2 . Полученную смесь отфильтровывали и высушивали до постоянной массы при температуре 100 °C. Высушеннную добавку измельчали. При синтезе наполнителя соотношение жидкость:твердая фаза составило Ж:Т = 1:2 [4].

Синтезируемый наполнитель характеризуется истинной плотностью, равной $\rho_{\text{ист}} = 2200 \text{ кг}/\text{м}^3$, насыпной плотностью — $\rho_{\text{нас}} = 370 \text{ кг}/\text{м}^3$ и активностью А = 370 мг/г.

При оценке химического состава добавки, синтезированной в присутствии диатомита, установлено, что преобладают оксиды кремнезема, составляющие 81,81 % (табл. 1).

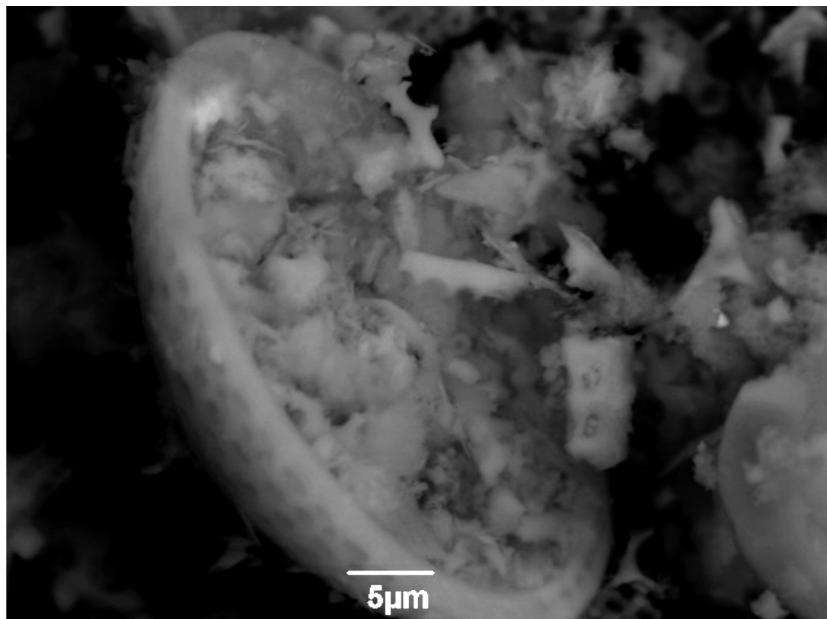
Таблица 1. Химический состав гидросиликатной добавки

Наименование оксида	Содержание, %	Наименование элемента	Содержание, %
SiO_2	81,81	Si	38,25
Na_2O	4,95	Na	3,67
Al_2O_3	4,49	Al	2,37
CaO	3,09	Ca	2,21
Fe_2O_3	1,51	Fe	1,05

Рентгенофазовый (РФА) анализ показал, что минералогический состав добавки в основном представлен кристаллическими разновидностями гидросиликатов кальция — гидросиликаты кальция тоберморитовой группы, твердый раствор CSH(B) в виде слабозакристаллизованного геля и твердый раствор C-S-H (II).

Структура синтезируемой добавки изучалась с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа Shanning Electron Microscope JSM — 6390 LV. Съемка проводилась в режиме низкого вакуума при давлении $P = 50 \text{ Па}$.

© Логания В.И., Пышкина И.С., 2014



Изображение структуры добавки, синтезированной в присутствии диатомита. $\times 3000$

При изучении структуры гидросиликатной добавки выявлено, что диатомит является подложкой, на которой формируются гидросиликаты кальция (см. рисунок).

Изучалось влияние синтезируемой добавки на структурообразование известковых составов. Для сравнения изготавливались известковые образцы, приготовленные с применением гидросиликатов кальция, синтезированных без диатомита, и известковые образцы с применением диатомита в количестве 30 % от массы извести. Содержание добавок ГСК составляло 30 % от массы извести. В работе применялась известь-пушонка, приготовленная на извести второго сорта с активностью 86 %. Готовились составы с водоизвестковым отношением В/И = 1,0. В возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения определяли прочность при сжатии (табл. 2).

Установлено, что в возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения прочность при сжатии $R_{сж}$ известковых образцов на основе гидросиликатной добавки, синтезированной в присутствии диатомита, выше и составляет $R_{сж} = 7,59$ МПа, в то время как у известковых образцов на основе гидро-

Таблица 2. Прочность при сжатии известковых образцов

Добавка	Прочность при сжатии, МПа
Контрольный	2,12
Добавка, синтезируемая в присутствии 10%-го раствора CaCl_2	4,7
Добавка, синтезируемая в присутствии 10%-го раствора CaCl_2 и диатомита	7,59
Диатомит	3,25

силикатной добавки, синтезированной без диатомита, $R_{сж} = 4,7$ МПа. Прочность при сжатии контрольного образца составляет $R_{сж} = 2,12$ МПа.

Для изучения закономерностей влияния добавки, синтезированной в присутствии диатомита, на свойства известковых составов изготавливались известковые образцы с различным содержанием добавки. Количество добавки варьировалось от 10 до 30 % от массы извести. В возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения определяли прочность при сжатии. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3. Прочность при сжатии известковых составов

Состав	Прочность при сжатии, МПа
Содержание синтезируемой добавки в количестве 10 % от массы извести	4,2
Содержание синтезируемой добавки в количестве 20 % от массы извести	4,865
Содержание синтезируемой добавки в количестве 30 % от массы извести	7,59

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 3, показал, что применение в рецептуре известковых составов добавки, синтезируемой в присутствии диатомита, в количестве 10–30 % от массы извести приводит к повышению прочности при сжатии известковых образцов в возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения на 198–358 % по сравнению с образцами на основе контрольных составов (без добавки). Установлено, что при содержании в рецептуре синтезированной добавки в количестве 30 % от массы извести прочность при сжатии известковых образцов составляет $R_{сж} = 7,59$ МПа.

Также исследовалось влияние технологии синтеза наполнителя на механические свойства смесей. Варьируемым фактором были удельная поверхность добавки и модуль жидкого стекла. Содержание синтезированной добавки составляло 30 % от массы извести. В возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения определяли прочность при сжатии.

Установлено, что при увеличении удельной поверхности добавки прочность при сжатии известковых образцов увеличивается. При величине удельной поверхности $S_{уд}$ добавки, равной $S_{уд} = 19\ 000$ см²/г, прочность известкового образца составляет $R_{сж} = 7,2$ МПа, а при $S_{уд} = 23\ 500$ см²/г — 7,525 МПа.

Увеличение модуля жидкого стекла приводит к повышению прочности при сжатии известковых образцов. Так, при применении при синтезе добавки жидкого натриевого стекла с модулем $M = 2,9$ прочность известкового образца составляет $R_{сж} = 7,2$ МПа, а при применении жидкого натриевого стекла с модулем $M = 2,8$ и $M = 2,7$ соответственно $R_{сж} = 7,105$ МПа и $R_{сж} = 6,825$ МПа.

Таким образом, использование диатомита в технологии синтеза гидросиликатов кальция позволяет получить добавку, обладающую более высокой активностью взаимодействия с известью, что способствует получению известковых композитов с более высокой прочностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логанина, В.И. Тонкодисперсные наполнители на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей [Текст] / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Ю.А. Мокрушина // Строительные материалы. — 2010. — № 2. — С. 36–40.
2. Логанина, В.И. Штукатурные составы для реставрационных работ с применением окрашенных наполнителей [Текст] / В.И. Логанина, Л.В. Макарова // Региональная архитектура и строительство. — 2009. — № 1. — С. 38–41.
3. Логанина, В.И. Влияние режима синтеза наполнителя на структуру и свойства известковых сухих строительных смесей [Текст] / В.И. Логанина, И.С. Пышкина // Вестн. Волгоград. гос. архит-строит. ун-та. — 2014. — № 36 (55). — С. 64–67.
4. Логанина, В.И. Разработка наполнителя для сухих строительных смесей на основе гидросиликатов кальция с применением опалкристабалитовых пород [Текст] / В.И. Логанина, И.С. Пышкина // Академ. вестн. УралНИИпроект РАASN. — 2014. — № 2. — С. 96–98.

ЛОГАНИНА Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: loganin@mail.ru.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ПЫШКИНА Ирина Сергеевна, аспн.; E-mail: glazycheese@gmail.com
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 16.06.14

Loganina Valentina Ivanovna, doctor of technical sciences, professor; E-mail: loganin@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Pyshkina Irina Sergeevna, post-graduate student; E-mail: glazycheese@gmail.com, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF SYNTHESIS BASED SUPPLEMENTS SILICATE CALCIUM FOR DRY CONSTRUCTION MIXTURES

Provides information about the chemical and mineralogical composition hydrosilicate additives synthesized in the presence of diatomite. It is shown that the introduction of additives Hydrosilicates to accelerate the mechanical strength of the set.

Key words: additive, calcium hydrosilicates, dry mixes, diatomite.

REFERENCES

1. Loganina, V.I. Fine fillers based on calcium silicates for dry construction mixtures [Text] / V.I. Loganina, L.V. Makarova, Yu.A. Mokrushina // Building materialy. — 2010. — N 2. — P. 36–40.
2. Loganina, V.I. Plastering compositions for restoration work with colored fillers [Text] / V.I. Loganina, L.V. Makarova // Regional architecture and stroitelstvo. — 2009. — N 1. — P. 38–41.
3. Loganina, V.I. Influence of the synthesis of the filler on the structure and properties of lime dry construction mixtures [Text] / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina // Herald Volgograd State Architectural University. — 2014. — N 36 (55). — P. 64–67.
4. Loganina, V.I. Development filler for dry construction mixtures on the basis of hydrated silicates of calcium with opalkristabalitovyh rocks [Text] / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina // Academic Gazette UralNIIproekt RAASN. — 2014. — N 2. — P. 96–98.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.514.2:626.212

Л.Ф. ДЗЮБЕНКО, А.А. КОЖЕВНИКОВ

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА ХВОСТОХРАНИЛИЩА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЗАПОЛНЕНИЯ

Рассматриваются вопросы формирования фильтрационного режима хвостохранилища при наращивании его ограждающей дамбы. Приводятся оценки фильтрационного расхода под подошвой дамбы наращивания, отсыпаемой на неконсолидированное основание, и первичной дамбы.

Ключевые слова: хвостохранилище, дамбы наращивания, неконсолидированное основание, фильтрация.

Актуальность темы исследований определяется тем, что практически на всех эксплуатируемых и строящихся хвостохранилищах в криолитозоне наблюдается ряд осложнений, вызванных как особенностями природно-климатических условий, так и технологией намыва [1, 2]. Среди них наиболее распространенными являются: фильтрация через тело ограждающей дамбы и ее основание, а также в береговых примыканиях, значительный срок консолидации намытых мелкодисперсных хвостов, устойчивость дамб наращивания, опирающихся на недостаточно консолидированное основание из намытых хвостов и др. Анализ данных по аварийности различных накопителей отходов (хвостохранилищ, шламохранилищ, золошлакоотвалов) позволяет выделить основные причины, обусловливающие возникновение аварий. Все они могут быть объединены в следующие группы:

1. Неправильные проектные решения из-за недостаточности достоверных данных инженерно-геологических, гидрологических изысканий, отсутствия обоснованных методик расчета устойчивости откосов дамб, учитывающих неоднородность складируемого материала, баланса воды в накопителе и т.п.

2. Некачественное строительство пионерных сооружений (подготовка основания, уплотнение отсыпаемого в дамбы грунта, стыки коллекторов и др.).

3. Нарушение правил эксплуатации (несоблюдение размеров пляжа и превышения гребня дамбы над уровнем воды в пруде, нарушение технологии намыва и т.д.).

Доля каждой группы факторов составляет по некоторым оценкам [3]: ошибки проектирования — 23 %, строительства — 28 %, эксплуатации — 49 %.

Намытые хвосты в общем случае являются неоднородным, анизотропным материалом, их свойства, в том числе фильтрационные, существенно зависят от гранулометрического состава хвостов, процессов фрак-

ционирования при намыве и в конечном итоге определяются не только технологией обогащения, но и технологией укладки отходов в хвостохранилище. На рассматриваемом хвостохранилище гранулометрический состав хвостов при выходе с фабрики достаточно однороден, в них практически нет частиц диаметром крупнее 0,2 мм. При таком составе хвостов отсутствуют процессы фракционирования, в пределах упорной призмы откладываются мелкодисперсные частицы, намытый материал водонасыщен и имеет низкие прочностные характеристики. Процессы водоотдачи в намытых техногенных грунтах и их консолидация протекают в течение длительного времени, что существенно осложняет возможность наращивания ограждающей дамбы и требует проведения специальных мероприятий по повышению несущей способности основания.

В таких условиях необходимо решать не только вопросы устойчивости дамб наращивания, но и формирование фильтрационного режима хвостохранилища, определение возможных утечек под основанием дамб наращивания.

В настоящее время нет достаточно надежных методов расчета фильтрационного режима хвостохранилищ, которые бы позволяли учитывать одновременно влияние природно-климатических и технологических факторов, неоднородность структуры тела сооружения и его основания, анизотропность свойств хвостов. Попытки адаптации существующих методов расчета положения кривой депрессии в намывных плотинах к хвостохранилищам при реализации различных расчетных схем (наличии сплошных и несплошных водоупорных прослоек) оказались в большинстве своем неудачными [2]. Процессы фильтрации в теле хвостохранилища являются по-прежнему мало изученными, что определило *цель работы* — выбор методов расчета и оценка расхода фильтрационных вод под основанием нефильтрующей дамбы наращивания, опирающейся на неконсолидированные хвосты, а также утечки из хвостохранилища.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнена адаптация существующих схем расчета напорной фильтрации для нефильтрующих пионерных дамб и дамб наращивания;
- проведены расчеты по выбранным схемам напорной фильтрации с анализом результатов;
- выполнена оценка фильтрационных расходов в теле хвостохранилища с учетом технологических факторов намыва;
- выполнено сравнение полученных результатов расчетов с имеющимися натурными данными.

Указанные задачи реализованы на примере хвостохранилища 2-й очереди (II класс) ОФ Албазинского ГОКа, предназначенного для складирования гидравлическим способом хвостов после переработки руды по гравитационно-флотационной схеме и осветления воды с использованием ее в обратном водоснабжении золотоизвлекательной фабрики.

Проектный срок эксплуатации хвостохранилища 10 лет. В эксплуатацию сооружение введено в декабре 2011 г.

Емкость хвостохранилища образована ограждающей дамбой с противофильтрационным экраном и бортами долины ручья Ошибочный (рис. 1, а). Водопропускные сооружения в ограждающей дамбе проектом не предусмотрены.

Высота ограждающей дамбы 1-й очереди 18,00 м, заложение верхового откоса 1:3, низового 1:2,5, ширина дамбы по гребню 10,00 м. 2-я и 3-я

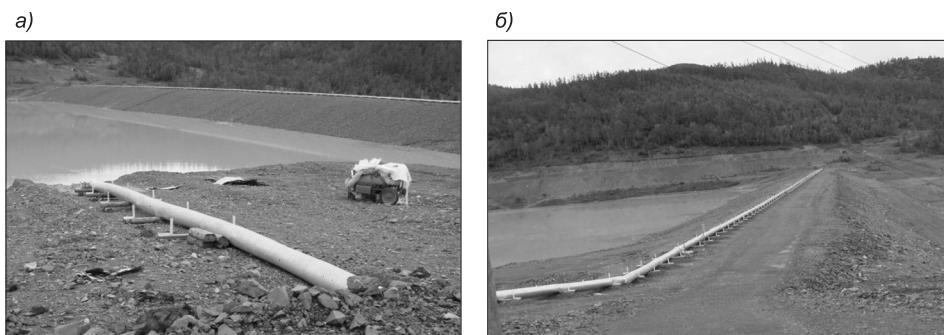


Рис. 1. Ограждающая дамба хвостохранилища 1-й очереди: торцевой выпуск зимнего складирования (а), распределительный пульповод (б)

очереди высотой по 4,00 м отсыпаются на намытый пляж, в сторону верхового откоса. Максимальная общая высота дамбы после ее наращивания 26,00 м.

В основании первичной дамбы залегают водопроницаемые грунты: гравийно-галечниковый грунт с супесчаным заполнителем толщиной 2-3 м, далее идут дресвяно-щебнистые грунты мощностью 3-4 м, ниже — трещиноватые песчаники.

Тело ограждающей дамбы 1-й очереди отсыпается из водопроницаемого грунта с высоким коэффициентом фильтрации. Противофильтрационными элементами служат экран и понур из полиэтиленовой пленки толщиной 1,5 мм.

Пульпа в хвостохранилище подается из распределительного пульповода (стальная труба Ду 325 мм, длиной 620,00 м), который прокладывается



Рис. 2. Выходы фильтрационных вод у подножия ограждающей дамбы

на опорах по гребню ограждающей дамбы (рис. 1, б). Распределительные пульповоды оборудованы выпусками с патрубками Ду 100 мм, врезанными через каждые 50 м, к которым присоединяется гибкий шланг.

Признаком возникновения неблагоприятного фильтрационного режима на указанном объекте является образование со стороны нижнего бьефа у подошвы дамбы очагов фильтрации. Это проявляется в виде небольших заболоченных участков летом и незамерзающих луж и ручьев зимой. Динамика процессов фильтрации под подошвой ограждающей дамбы в течение 2012–2014 гг. прослеживается на фотографиях (рис. 2).

Проектом предусмотрено непосредственно у подошвы дамбы устройство дренажной насосной станции, которая должна откачивать профильтровавшуюся воду обратно в хвостохранилище. В настоящее время насосная станция не работает в связи с отсутствием оборудования.

Особенности конструкции ограждающей дамбы и дамб наращивания (с водонепроницаемым экраном и понуром) (рис. 3, 4) определили выбор расчетной схемы напорной фильтрации. Для оценки величины фильтрационного расхода в существующем сооружении (рис. 5) был выбран приближенный метод коэффициентов сопротивления [4].

В работе принимаются два основных способа схематизации.

Схема 1: рассматривается дамба наращивания 2-й очереди. Считается, что хвостохранилище заполнено до отметки 371,50 м (здесь и далее



Рис. 3. Монтаж пленочного экрана ограждающей дамбы 1-й очереди



Рис. 4. Отсыпка защитного слоя пленочного экрана ограждающей дамбы 1-й очереди

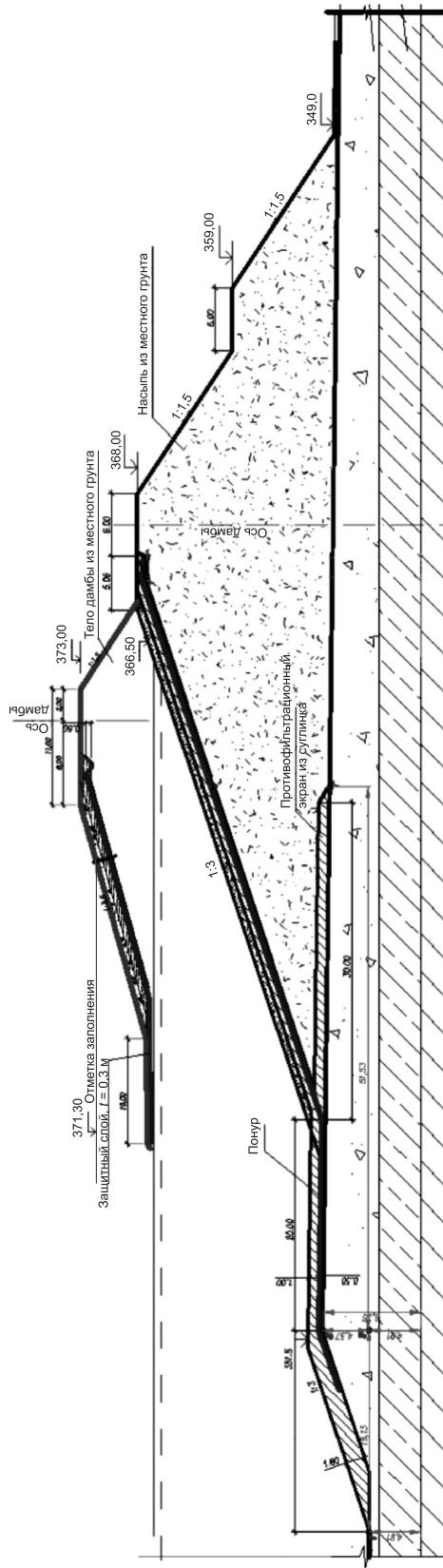


Рис. 5. Поперечный профиль ограждающей дамбы

принята условная система высот). Отметка основания 2-й очереди дамбы 366,50. Отметка гребня 373,00 м.

Считается, что откос дамбы 1-й очереди является водоупором, так как в качестве противофильтрационных элементов приняты экран и понур из водонепроницаемой полимерной пленки толщиной $t = 1,5$ мм.

Схема 1а: рассматривается также дамба наращивания 2-й очереди с другой схематизацией контура.

Схема 2: рассматривается случай, когда хвостохранилище заполнено полностью до проектной отметки 2-й очереди 371,50 м. В качестве противофильтрационных элементов 1-й и 2-й очереди служат экран и понур из водонепроницаемой полимерной пленки толщиной $t = 1,5$ мм. В хвостохранилище при его наращивании формируются два напорных потока: под дамбой наращивания — между двумя водоупорными элементами и под первичной дамбой — по слою хорошо дренируемого грунта.

Результаты расчета фильтрации под дамбами наращивания хвостохранилища 2-й очереди по схемам 1, 1а, 2 представлены в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения:

H — напор на сооружение; k_f — коэффициент фильтрации;

q — удельный расход фильтрации;

Q — общий фильтрационный расход;

$\Sigma\xi$ — суммарный коэффициент сопротивления подземного контура;

Таблица 1. Расчет фильтрации методом коэффициентов сопротивления

Вид схемы	H , м	k_ϕ , м/сут	$\Sigma \xi$	q , $\text{м}^2/\text{сут}$	Q , $\text{м}^3/\text{сут}$	$I_{\text{вых}}$	$I_{\text{доп}}$
Схема 1	5,0	0,2	5,222	0,19	100,45	0,083	0,25
Схема 1а	5,0	0,2	4,073	0,25	132,17	0,106	0,25
Схема 2	21,5	50	13,229	81,26	26590,01	0,350	0,40

$I_{\text{вых}}$ — максимальный градиент на выходе фильтрационного потока на нижнем откосе.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно большой величине суммарного фильтрационного расхода, который неизбежно будет высачиваться в месте сопряжения дамбы наращивания и первичной дамбы, а также под подошвой первичной дамбы. Расчеты показали, что фильтрационная прочность грунтов тела и основания дамб обеспечивается.

В практике эксплуатации хвостохранилища и одновременного возведения 2-го яруса накопителя нередки случаи выхода фильтрационного потока на гребень первичной дамбы. В этом случае необходимо предусматривать строительный дренаж, однако возведение дамбы наращивания происходит, как правило, в условиях дефицита времени на консолидацию намытых хвостов и нехватки емкости для складирования отходов. Эти обстоятельства служат основанием для принятия эксплуатирующей организацией достаточно спорных решений — отсыпке дамбы наращивания без проведения каких-либо мероприятий по ускорению консолидации. Следствием таких решений могут быть выпор грунтов основания и выход фильтрационного потока на гребень первичной дамбы.

Кроме указанных расчетных схем, предпринимались попытки адаптировать расчетные схемы для грунтовых плотин с водонепроницаемым экраном и понуром при расположении водоупора на досягаемой глубине. Расчеты показали их неадекватность, поскольку не соблюдается требуемое в методе (50–100 раз) соотношение между коэффициентами фильтрации водонепроницаемых элементов и грунтами ограждающей дамбы и ее основания.

Анализируя результаты расчетов по дамбе наращивания (расхождение составляет 27 %), предпочтение следует отдать схеме 1, отражающей более обоснованно конструктивные элементы подземного контура. В схеме 2, в которой изменяются геометрические параметры расчетной области, фильтрационный расход достигает огромного значения из-за больших значений напора на сооружение и наличия хорошо проницаемых грунтов основания.

Текущая ситуация на сооружении исследовалась весной 2014 г. Для оценки теоретических результатов расчетов на хвостохранилище было выполнено определение расходов фильтрационных вод в нижнем бьефе дамбы. Расходы вычислялись по скоростям, измеренным при помощи поплавкового метода. Результаты измерений представлены в табл. 2, из которой видно, что расходы фильтрационных вод увеличиваются до некоторого момента, а затем значение расходов уменьшается. Это связано с тем, что при разработке нового канала для плавучей насосной станции обратной воды, расположенной в прудке верхней части хвостохранилища, были вскрыты подземные ручьи. Часть воды, которая проходила в об-

Таблица 2. Определение расходов фильтрационных вод в натурных условиях

Место (пикет) сосредоточенного выхода потока	Дата замера	Отметка воды в прудке хвостохранилища, м (УС)	Расход воды, м ³ /сут
ПК 31+25	10.08.2013	—	—
ПК 32+65			5520
ПК 32+90			720
$\Sigma = 6240$			
ПК 31+25	16.11.2013	365,87	—
ПК 32+65			6480
ПК 32+90			960
$\Sigma = 7440$			
ПК 31+25	10.03.2014	366,41	432
ПК 32+65			6816
ПК 32+90			1560
$\Sigma = 8808$			
ПК 31+25	28.06.2014	367,38	360
ПК 32+65			6096
ПК 32+90			1512
$\Sigma = 7968$			

ход перехватывающих сооружений, стала поступать в прудок хвостохранилища и тем самым уменьшился поток под основанием ограждающей дамбы.

Снижение фильтрационного расхода в нижнем бьефе подтверждается уменьшением площади заболоченных участков и уровней воды в ручейках, а некоторые ручьи, которые не замерзали зимой, исчезли (рис. 6).

Полученные результаты расчетов суммарного фильтрационного расхода показывают, что расчетный расход более чем в 7 раз превышает проектную производительность насосной станции ($Q' = 3600 \text{ м}^3/\text{сут}$), а измеренный в натурных условиях при незаполненном до проектной отметки хвостохранилище 2-й очереди — в 2,4 раза.

Тем самым косвенно подтверждается неадекватность выбранных расчетных схем реальным процессам фильтрации в хвостохранилище.



Рис. 6. Нижний бьеф хвостохранилища (состояние на июнь 2014 г.)

В связи с этим выполнено определение расходов фильтрации с учетом технологических факторов намыва в соответствии с рекомендациями [5].

Для схемы 2 определяются удельные расходы инфильтрации q_i , водоотдачи q_v и фильтрации из прудка q_n .

Суммарный удельный фильтрационный расход в сооружении равен:

$$q = q_i + q_v + q_n, \text{ м}^2/\text{сут}. \quad (1)$$

Отдельные составляющие определяются по следующим формулам:

1. Часть максимального среднесуточного удельного расхода, приходящаяся на участок инфильтрации, включая водоотдачу в пределах пляжа намыва:

$$q_i + q_v = \mu_m (k_m t / 24 + I) \cdot L_n, \text{ м}^2/\text{сут}, \quad (2)$$

где $\mu_m = 0,03$ — коэффициент водоотдачи [5];

$k_m = 0,2$ — коэффициент фильтрации намытых хвостов, м/сут;

$t = 24$ ч — время суток, в течение которого пляж смачивается водой. Технологический процесс не предусматривает остановку подачи пульпы;

$I = 0,024$ — интенсивность намыва (рост отложений по высоте), м/сут (по натурным данным).

2. Удельный расход фильтрации из прудковой зоны:

$$q_n = k_n \cdot I \cdot L_n, \text{ м}^2/\text{сут}, \quad (3)$$

где $k_n = 0,2$ — коэффициент фильтрации прудковой зоны, м/сут;

$I = 1,0$ — уклон потока при инфильтрации.

Суммарный фильтрационный расход в сооружении равен:

$$Q = q \cdot L_{cp}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (4)$$

где $L_{cp} = 361,48$ — средняя длина дамбы, м.

Результаты расчетов приводятся в сводной табл. 3.

Таблица 3. Расчет суммарного фильтрационного расхода

Параметры	Количество одновременно работающих пульповыпусков, шт.		
	5	3	2
Ширина прудка L_n , м	250	150	100
Удельный расход, приходящийся на участок инфильтрации, включая водоотдачу $q_i + q_v$, м ² /сут	1,68	1,01	0,67
Удельный расход фильтрации из прудковой зоны q_n , м ² /сут	50,0	30,0	20,0
Суммарный удельный фильтрационный расход q , м ² /сут	51,68	31,01	20,67
Суммарный фильтрационный расход Q , м ³ /сут	18681,23	11209,49	7471,79

Средний удельный расход фильтрации при односторонней схеме намыва может быть вычислен по формуле:

$$q_{cp} = \frac{Q_v - Q_{cb}}{L_\phi}, \text{ м}^2/\text{сут}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{в}}$ — объем воды, подаваемый на откос в течение суток; $Q_{\text{сб}} = 0$ — расход, сбрасываемый через какие-либо сбросные сооружения (водосбросные сооружения отсутствуют, насосная станция не работает); $L_{\phi} = 186,5$ — длина прудка в пределах фронта намыва, м.

Средний расход фильтрации при односторонней схеме намыва может быть вычислен по формуле:

$$Q_{\text{ср}} = q_{\text{ср}} \cdot L_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (6)$$

Расчеты производятся для двух случаев — при заглушенном торцевом сосредоточенном сбросе и при открытом. Результаты расчетов приводятся в сводной табл. 4.

Таблица 4. Расчет расхода фильтрации с учетом технологии намыва

Расчетный случай	Объем воды, подаваемый на откос $Q_{\text{в}}$, $\text{м}^3/\text{сут}$	Средний удельный расход фильтрации $q_{\text{ср}}$, $\text{м}^2/\text{сут}$	Средний расход фильтрации при односторонней схеме намыва $Q_{\text{ср}}$, $\text{м}^3/\text{сут}$
При заглушенном торцевом сбросе	4548,96	24,39	8816,81
При открытом торцевом сбросе	3032,64	16,26	5877,66

Для сравнения результатов вычислим фильтрационный расход из прудка, как при фильтрации из канала [6], который вычисляется для полупрофиля прудка по формуле:

$$Q_{\text{k}} = \frac{k_{\text{n}} \cdot L_{\text{ср}} (L_{\phi} + 2h)}{2}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (7)$$

где $h = 1,01$ — средняя глубина прудка в пределах фронта намыва, м;

$$Q_{\text{k}} = \frac{0,2 \cdot 361,48 \cdot (186,5 + 2 \cdot 1,01)}{2} = 6814,62, \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Выводы. 1. Результаты расчетов показали, что наибольшие фильтрационные потери из хвостохранилища с ограждающей дамбой, имеющей противофильтрационные элементы на каждом ярусе, происходят при работе пяти пульповыпусков (при отсутствии намыва из торца трубы). Рекомендуемые режимы работы: два пульповыпуска и торцевой сброс или три пульповыпуска и отсутствие торцевого сброса.

2. Способ расчета фильтрационного расхода из хвостохранилища при рассматриваемой конструкции ограждающей дамбы, учитывающий технологические факторы намыва, наиболее соответствует имеющимся натурным данным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Дзюбенко, Л.Ф. Особенности формирования фильтрационного режима хвостохранилищ на мерзлом трещиноватом основании [Текст] / Л.Ф. Дзюбенко, А.М. Сухно // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 7. — С. 52–58.
- Дзюбенко, Л.Ф. Расчет устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища [Текст] / Л.Ф. Дзюбенко, Ю.А. Кузнецова, А.М. Сухно, А.П. Яненко // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 3. — С. 28–38.
- Жараспаев, М.Т. Анализ риска гидродинамических аварий и оценка возможных чрезвычайных ситуаций [Текст] / М.Т. Жараспаев, Р.А. Куканов. — Алматы, 2010 / <http://vestnik.kazntu.kz/files/newspapers/29/698/698.pdf>

4. Рассказов, Л.Н. Гидroteхнические сооружения: учеб. пособие [Текст] / Л.Н. Рассказов, В.Г. Орехов, Ю.П. Правдивец, Г.А. Воробьев и др. — М. : Стройиздат, 2011. — Ч. 1. — 581 с.
5. Мелентьев, В.А. Намывные гидroteхнические сооружения [Текст] / В.А. Мелентьев, Н.П. Колпашников, Б.А. Волнин. — М. : Энергия, 1973. — 246 с.
6. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / под ред. П.Г. Киселева. — М. : Энергия, 1972. — 312 с.

*ДЗЮБЕНКО Любовь Федоровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ludzju@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*КОЖЕВНИКОВ Александр Андреевич, инж.
ООО «Ресурсы Албазино»*

Получено 24.06.14

Dzyubenko Lyubov Fedorovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ludzju@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Kozhevnikov Aleksandr Andreevich, engineer, LLC «Albazino Resources», Russia

SEEPAGE CONDITIONS ESTIMATION OF A TAILINGS DAM DURING ITS FILLING

The authors dwell upon the formation of seeping conditions of a tailing dam when topping the bund wall. The article provides estimation of seeping conditions under the original dam and the topped dam which is dumped on the unconsolidated foundation.

Key words: a tailings dam, a topped dam, unconsolidated foundation, seeping.

REFERENCES

1. Dzyubenko, L.F. Peculiarities of the formation of seeping conditions of tailings dams on the cracked frozen foundation [Text] / L.F. Dzyubenko, A.M. Sukhno // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 7. — P. 52–58.
2. Dzyubenko, L.F. Stability design of a tailings dam bund wall [Text] / L.F. Dzyubenko, Yu.A. Kuznetsova, A.M. Sukhno, A.P. Yanenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 3. — P. 28–38.
3. Zharaspaev, M.T. Hydrodynamic accidents risk analysis and estimation of potential emergency [Text] / M.T. Zharaspaev, R.A. Kukanov. — Almaty, 2010 / <http://vestnik.kazntu.kz/files/newspapers/29/698/698.pdf>
4. Rasskazov, L.N. Hydro-technical utilities: learning guide [Text] / L.N. Rasskazov, V.G. Orekhov, Yu.P. Pravdivets, G.A. Vorobyev. — M. : Stroyizdat, 2011. — Part I. — 581 p.
5. Melentiev, V.A. Alluvial hydro-technical utilities [Text] / V.A. Melentev, N.P. Kolpashnikov, B.A. Volnin. — M. : Energiya, 1973. — 246 p.
6. Hydraulic calculation handbook [Text] / ed. by P.G. Kiselev. — M., Energiya, 1972. — 312 p.

УДК 626.4

А.А. АТАВИН, А.П. ЯНЕНКО

О СКОРОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В КАМЕРЕ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА ПРИ РАСЧЕТЕ ЕГО ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Работа посвящена вопросам расчета грузопропускной способности шлюзов при их проектировании. Авторы статьи, взяв за основу нормативные документы по проектированию шлюзов, отмечают, что в них значения рекомендуемых скоростей движения судна в камере шлюза указаны без учета гидродинамических процессов, возникающих при этом. Используя систему уравнений связанных колебаний воды и судна в камере шлюза, авторы с помощью метода характеристик получили аналитические зависимости для определения максимальной и критической скоростей движения судна в камере шлюза, которые должны быть основой при проектировании. В заключении сделан вывод о том, что случай вывода судна из камеры шлюза должен быть расчетным при определении глубины воды на его пороге.

Ключевые слова: судоходный шлюз, проектирование шлюзов, пропускная способность шлюза, скорости движения судна в камере шлюза, расчетный случай при расчете глубины воды на пороге шлюза.

При проектировании судопропускных сооружений одним из основных вопросов, наряду с определением габаритных размеров камер шлюза, является вопрос о его грузопропускной способности, так как именно от него зависит принятие решения о числе ниток будущего шлюза, в связи с тем, что проектируемый шлюз должен удовлетворять всем требованиям технических условий, выдаваемых заказчиком перед проектированием судопропускного сооружения. В этих технических условиях в качестве обязательного присутствует и величина необходимой грузопропускной способности, которую должен будет обеспечивать проектируемый шлюз.

Известно, что основой для проектирования судопропускных сооружений в настоящий момент времени служит актуализированная редакция СНиП 2.06.07–87, именуемая как «Свод правил. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения...» [1], которые были представлены специалистам в этой редакции в январе 2013 г.

В этом нормативном документе для предварительных расчетов грузопропускной способности проектируемого шлюза, в таблице В.1, указаны средние значения скоростей движения судна в камере судопропускного сооружения, которые рекомендуются принимать в следующих величинах: для входа самоходного судна в камеру — 1,0 м/с, для выхода судна из камеры шлюза — 1,4 м/с. В случае, когда мы имеем многокамерный шлюз, скорость перехода самоходного судна из камеры в камеру рекомендуется принимать равной 0,75 м/с.

Однако необходимо отметить, что данные многочисленных натурных наблюдений [2, 3] говорят о том, что реальные значения скоростей движения судов в камерах судопропускных сооружений намного ниже рекомендуемых значений и в связи с этим реальная пропускная способность шлюзов оказывается ниже расчетных величин. Это происходит, потому что все рекомендуемые значения скоростей движения судна в камерах судопропускных сооружений взяты без учета гидродинамических процессов, происходящих в них.

В свое время вопросы гидродинамических процессов в камерах судопропускных сооружений как при наличии, так и при отсутствии в них судна были детально рассмотрены в Институте гидродинамики СО РАН, где была разработана основательная теоретическая база для их расчетов. А к рассмотрению отдельных проблем, касающихся уже конкретных вопросов проектирования как шлюзов, так и судоподъемников, подключались сотрудники Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), на базе которого проводились не только серьезные экспериментальные работы, но и осуществлялись теоретические исследования, направленные на решение конкретных практических вопросов, таких как определение, допустим, габаритных размеров камер судопропускных сооружений, реальных скоростей движения в них судна и другие важные для практики расчеты.

В качестве основы всех теоретических разработок связанных колебаний воды и судна в камере или канале судопропускного сооружения использовалась полученная А.А. Атавиным под руководством академика РАН О.Ф. Васильева система интегродифференциальных уравнений, включающая в себя два уравнения движения жидкости и три уравнения движения судна, которые записываются в следующем виде [4–7]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_b, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_2}{\omega} \right) + g' \omega \frac{\partial \zeta}{\partial x} + j_x \omega = 0, \quad (2)$$

$$M_c \frac{d^2 \eta_c}{dt^2} + \gamma'_B S_c \eta_c + \gamma'_B S l_c \Psi_c = \gamma'_B \int_{x_1(t)}^{x_2(t)} b_c(x - x_c) \zeta(x, t) dx + F_u, \quad (3)$$

$$I_c \frac{d^2 \Psi_c}{dt^2} + \gamma'_B W_c R_c \Psi_c + \gamma'_B S l_c \eta_c = \gamma'_B \int_{x_1(t)}^{x_2(t)} (x - x_c) b_c(x - x_c) \zeta(x, t) dx + N_u, \quad (4)$$

$$M_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} = F_{np} - M_c j_x - \gamma'_B \int_{x_1(t)}^{x_2(t)} \Omega_c(x - x_c) \frac{\partial \zeta}{\partial x}(x, t) dx. \quad (5)$$

Здесь $\omega(x, t)$ — площадь поперечного сечения жидкости;

$Q(x, t)$ — расход жидкости;

q_b — расход бокового притока (за счет работы распределительной системы питания шлюза, бокового притока (перелива) в камере или подходном канале);

$\zeta(x, t)$ — ордината свободной поверхности воды;

$g' = g + j_z$, g — ускорение свободного падения, j_z — вертикальная составляющая ускорения движения судовозной камеры судоподъемника (для шлюзов и подходных каналов $j_z = 0$);

$\gamma'_v = \rho_v g'$, ρ_v — плотность воды;

$x_2(t)$ и $x_1(t)$ — продольные координаты носа и кормы судна;

M_c — масса судна;

S_c — площадь плоскости плавания судна;

W_c — объемное водоизмещение судна;

R_c — продольный метацентрический радиус судна;

I_c — момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси;

F_i , N_i — вертикальная составляющая и центрально-поперечный момент сил инерционного воздействия воды на судно соответственно.

Неизвестными величинами в этих уравнениях являются

$\zeta(x, t)$ — ордината свободной поверхности воды, которая отсчитывается по вертикали от ее невозмущенной поверхности;

$Q(x, t)$ — расход жидкости;

$x_c(t)$ — продольная координата центра тяжести судна;

$\eta_c(t)$ — вертикальное смещение центра тяжести судна относительно положения покоя;

$\psi_c(t)$ — угловое наклонение судна.

И задача по определению неизвестных величин сводится к решению данной системы уравнений.

Для ее однозначного решения основные неизвестные, удовлетворяя уравнениям (1)–(5), должны удовлетворять и некоторым дополнительным требованиям, а именно: начальным (при $t = 0$) и граничным (при $x = 0$ и $x = l$), а также условиям сопряжения во внутренних граничных точках.

Течение воды в каналах и камерах судопропускных сооружений обычно характеризуется спокойным состоянием потока. В этом случае, как следует из общей теории квазилинейных дифференциальных уравнений, на границах (при $x = 0$ и $x = l$) следует ставить по одному граничному условию, а во внутренних граничных точках — по два условия сопряжения.

В качестве граничного условия в голове шлюза задается изменение во времени поступающего в камеру шлюза расхода $Q = Q(t)$, а у торцевых стенок камеры ставится условие непротекания $Q = 0$.

При выходе подходного канала в большую акваторию может быть задано условие постоянства уровня $\zeta = \text{const}$.

В качестве начальных условий были приняты

$$\zeta(x, 0) = 0; \quad Q(x, 0) = 0, \quad \frac{d\eta_c}{dt}(0) = 0, \quad \psi_c(0) = 0, \quad x_c = 0.$$

Эта задача в полной ее постановке может быть решена, по-видимому, только численно. Однако многие важные выводы могут быть сделаны на основе приближенного аналитического решения, для получения которого следует ряд упрощений.

Во-первых, судно было заменено эквивалентным параллелепипедом того же водоизмещения.

Во-вторых, пренебрегали инерцией судна. В этом случае интегродифференциальные уравнения (3), (4) выпадают из основной системы уравнений и служат лишь для приближенного определения вертикальных и продольно угловых колебаний судна.

В-третьих, задача решалась в линейной постановке, приняв в качестве малого параметра величину

$$\varepsilon = \frac{\Omega_c v_c}{B_k h_k C_k},$$

где v_c — характерная скорость судна;

C_k — скорость распространения малых возмущений в камере без судна.

И кроме этого задача рассматривалась в предположении, что закон движения судна задан. В этом случае уравнение (5) также выпадает из основной системы уравнений и обращается в формулу для определения величины силы тяги, необходимой для реализации заданного закона движения судна:

$$F_{\text{пп}} = M_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + \gamma \Omega_c (\zeta(x_{2,t}) - \zeta(x_{1,t})). \quad (6)$$

После перехода к безразмерным переменным в исходных уравнениях и условиях сопряжения с помощью метода характеристик рассматривались волновые явления, возникающие при выводе судна на начальной стадии процесса до тех пор, пока к левой оконечности судна не подойдет первое возмущение, образованное у его правой оконечности. В итоге было получено рекуррентное соотношение, которое при переходе к исходным переменным дает нам формулу для определения величины максимального понижения уровня в камере судопропускного сооружения Δh , при выводе из нее судна

$$\Delta h = \frac{\Omega_c v_c}{\sqrt{g B_k (B_k h_k - \Omega_c)}}. \quad (7)$$

В силу того, что уровень воды в камере за кормой судна понизился на величину Δh , крма судна также начинает понижаться и при этом возникает угроза посадки судна на дно камеры. Для того чтобы избежать этого, судоводитель будет вынужден двигаться со скоростью v_c , которая не приведет к касанию кормы судна дна камеры.

Рассматривая более подробно этот вопрос (с учетом того, что при выводе судна из камеры за его кормой образуется не только волна понижения уровня Δh , но и у носа судна волна повышения, которая равна $\varepsilon_* h$, минимальная величина понижения кормы судна составит $\frac{4}{3} \Delta h$), было

введено понятие критической скорости вывода судна, которая на основе относительно небольших математических преобразований формулы (7) и допущений превращается в формулу

$$V_c^{\text{kp}} = \frac{3}{8} \frac{h_k - T_c}{\Omega_c} \sqrt{g B_k (B_k h_k - \Omega_c)}. \quad (8)$$

Эта приближенная формула хорошо подтверждается результатами экспериментальных исследований [8], проведенных в гидротехнической лаборатории НГАСУ (Сибстрин). С другой стороны, скорость движения судна ограничена полезной тягой, которую развивают движители судна. Обозначив ее величину через F_{\max} , нами было получено выражение для оценки максимальной величины скорости, которую может развивать судно при выводе из камеры шлюза в подходной канал

$$V_c^{\max} = (1 + \varepsilon_*) \frac{F_{\max}}{\gamma_b \Omega_c^2} \sqrt{g B_k (B_k h_k - \Omega_c)}, \quad (9)$$

где h_k — глубина воды в камере шлюза;

T_c — осадка судна;

Ω_c — площадь судна по миделю;

B_k — ширина камеры шлюза;

$$\varepsilon_* = \frac{\mu_*}{\mu_* + \mu_c};$$

$$\mu_* = \frac{B_{pk} C_{pk}}{B_k C_k};$$

$$\mu_c = \sqrt{1 - \sigma_c};$$

$$\sigma_c = \frac{\Omega_c}{B_k h_k};$$

C — скорость распространения малых возмущений в подходном канале или камере с соответствующими индексами «пк» или «к», $C = \sqrt{g \frac{\omega}{B}}$;

ω — площадь камеры или канала с соответствующими индексами;

B — ширина камеры или канала поверху также с соответствующими индексами.

Выводы. Скорости движения судна в камере судопропускного сооружения ограничены как ее критической, так и максимальной величиной, определяемой формулами (8), (9). Кроме этого вывод судна из камеры шлюза должен быть расчетным при определении глубины воды на ее пороге. И эти выводы следует обязательно учитывать при расчете пропускной способности проектируемого шлюза, принятия решения о количестве ниток в нем, а также определении глубины воды на пороге шлюза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.03.07-87 [Текст] / ОАО «Институт Гидропроект». — Санкт-Петербург, 2012.
2. Кирьяков, С.С. Допустимые скорости движения судов в шлюзах [Текст] / С.С. Кирьяков, В.И. Тимошина, Т. Белякова // Речной транспорт. — 1975. — № 8. — С. 44–45.
3. Клюев, В. Ускорение пропуска судов через шлюзы [Текст] / В. Клюев, А. Гапеев // Речной транспорт. — 1980. — № 11. — С. 38–39.

4. А т а в и н, А.А. О колебаниях уровня воды при выводе судна из камеры судопропускного сооружения [Текст] / А.А. Атавин, А.П. Яненко // Динамика сплошной среды. — Новосибирск, 1977. — Вып. 30. — С. 35–52.
5. А т а в и н, А.А. Гидродинамические процессы в судопропускных сооружениях [Текст] / А.А. Атавин, О.Ф. Васильев, А.П. Яненко. — Новосибирск : Наука, 1993.
6. А т а в и н, А.А. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: монография [Текст] / А.А. Атавин, В.И. Букреев, О.Ф. Васильев, В.В. Дегтярев, А.П. Яненко. — Новосибирск, 2009.
7. А т а в и н, А.А. Оценка возможных последствий аварий на судоходном шлюзе, связанных с разрушением его камер [Текст] / А.А. Атавин, О.Ф. Васильев // Гидравлические и гидродинамические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений: Тез. докл. междунар. симп. — СПб. : Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники, 2002.
8. Р о м а н о в, Е.М. О некоторых результатах экспериментального исследования условий ввода судна большой грузоподъемности в камеру судопропускного сооружения [Текст] / Е.М. Романов, А.П. Яненко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1975. — № 10. — С. 101–104.

АТАВИН Аркадий Анатольевич, канд. техн. наук, директор Новосибирского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН

ЯНЕНКО Аркадий Петрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 10.06.14

Atavin Arkadiy Anatolievich, candidate of technical sciences, director of Novosibirsk Branch of Institute for Water and Ecological Problems of SB RAS, Russia

Yanenko Arkadiy Petrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

ABOUT SPEEDS OF MOVEMENT OF A VESSEL IN THE CAMERA OF A NAVIGABLE LOCK AT CALCULATION OF ITS CAPACITY

Work is devoted to questions of calculation of cargo throughput of locks at their design. Authors of article, having taken as a basis normative documents on design of locks, note that in them values of recommended speeds of movement of a vessel in the camera of a lock are specified without the hydrodynamic processes arising thus. Using system of the equations of the connected fluctuations of water and a vessel in the lock camera, authors by means of a method of characteristics received analytical dependences for determination of the maximum and critical speeds of movement of a vessel in the lock camera which have to be a basis at design. In the conclusion that the case of a conclusion of a vessel from the camera of a lock has to be settlement at determination of depth of water on its threshold is drawn.

Key words: navigable lock, design of locks, throughput of a lock, speed of the movement of the vessel in the lock camera, a settlement case at calculation of depth of water on a lock threshold.

REFERENCES

1. Set of Rules 101.13330.2012. Retaining walls, navigation locks, skipping fish and fish protection structures. The updated edition of SNIP 2.03.07-87 [Text] / JSC «Institut Hydroproject». — St. Petersburg, 2012.
2. Kiryakov, S.S. Admissible speeds of the movement of vessels in locks [Text] / S.S. Kiryakov, V.I. Timoshina, T. Belyakova // River transport. — 1975. — N 8. — P. 44–45.

3. Klyuev, V. Accelerating the passage of ships through the locks [Text] / V. Klyuev, A. Gapeev // River transport. — 1980. — N 11. — P. 38–39.
4. Atavin, A.A. About fluctuations of water level at a vessel conclusion from the camera shipping building [Text] / A.A. Atavin, A.P. Yanenko // Dynamics of the continuous environment. — Novosibirsk, 1977. — Edit. 30. — P. 35–52.
5. Atavin, A.A. Hydrodynamic processes in shipping facilities [Text] / A.A. Atavin, O.F. Vasiliev, A.P. Yanenko. — Novosibirsk : Nauka, 1993.
6. Atavin, A.A. Hydrodynamic aspects supernumerary and emergencies on hydraulic engineering constructions: monograph [Text] / A.A. Atavin, V.I. Bukreev, O.F. Vasilev, V.V. Degtyarev, A.P. Yanenko. — Novosibirsk, 2009.
7. Atavin, A.A. Evaluation of possible consequences of accidents on navigable gateway associated with the destruction of its cameras [Text] / A.A. Atavin, O.F. Vasiliev // Hydraulic and hydrodynamic aspects of the reliability and safety of hydraulic structures: Proceedings of the International Symposium. — St. Petersburg : All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering, 2002.
8. Romanov, E.M. About some results of experimental studies of conditions of an entrance of the vessel with big loading capacity, in the camera of navigation pass [Text] / E.M. Romanov, A.P. Yanenko // News of Higher Education Institutions. Construction and Architecture. — 1975. — N 10. — P. 101–104.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.921.2

Е.Э. БАЙМАЧЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ЭКСЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ И ЕСТЕСТВЕННУЮ ВЕНТИЛЯЦИЮ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Предлагаемый в качестве объективного показатель для оценки термодинамической эффективности работы системы отопления и вентиляции жилых зданий, основанный на отношении минимально необходимых (теоретических) и фактических затрат энергии на их функционирование, не учитывает особенностей совместной работы систем отопления и естественной вентиляции жилых зданий. Предложен идеализированный аналог работы систем отопления и естественной вентиляции с целью определения численных значений минимально необходимых затрат энергии и эксергии для этих систем.

Ключевые слова: отопление, естественная вентиляция, энергоэффективность, эксергия.

Для определения эффективности использования энергии систем поддержания микроклимата в зданиях и сооружениях удобно пользоваться коэффициентами полезного действия таких систем, соотнося фактическое потребление энергии/эксергии с их минимально необходимыми затратами. При этом минимальные затраты энергии на нужды отопления, как расход энергии на нагрев воздуха, Вт·ч, подаваемого в здание по санитарным требованиям, можно найти по выражению [1]:

$$Q_{\text{от}}^{\min} = (1 - \gamma) \bar{c}_v V_{\text{cb}}^* \int_{t_h}^{t_k} (t_v - t_h) dt, \quad (1)$$

где γ — коэффициент рекуперации энергии в утилизационной установке;

\bar{c}_v — удельная объемная теплоемкость воздуха, Вт · ч/($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$);

V_{cb}^* — нормативный объем свежего воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

t_h , t_k — время начала и окончания отопительного периода, ч;

t_v — приведенная расчетная температура воздуха внутри здания, $^\circ\text{C}$.

Помимо $Q_{\text{от}}^{\min}$ обязательным слагаемым в тепловом баланс будут являться явные теплопоступления от людей, Вт, учитывающие интенсивность работы и теплозащитные свойства одежды, вычисляемые по выражению [2]:

$$Q_{\text{л}} = \beta_i \beta_{\text{од}} (2,5 + 10,36 \sqrt{v_v}) (35 - t_v), \quad (2)$$

где β_i — коэффициент учета интенсивности работы;

$\beta_{\text{од}}$ — коэффициент учета теплозащитных свойств одежды;

v_v — подвижность движения воздуха в здании, м/с.

Таким образом, минимально необходимые теплопоступления в жилое здание за отопительный период, Вт · ч, могут быть определены как

$$Q_{\text{пост}} = (1 - \gamma) \bar{C}_{\text{в}} V_{\text{св}}^* \sum_{i=1}^n (t_{\text{в}} - t_{\text{н}_i}) \Delta t_i + \\ + \sum_{i=1}^n (\beta_{\text{и}} \beta_{\text{од}} (2,5 + 10,36 \sqrt{v_{\text{в}}}) (35 - t_{\text{в}})) \Delta t_i, \quad (3)$$

где n — число временных интервалов;

Δt_i — продолжительность i -го периода, ч.

В жилых зданиях, оборудованных системой естественной вытяжной вентиляции, эти теплопоступления служат не только для поддержания заданной температуры внутреннего воздуха, но и для создания разницы давлений воздуха внутри и снаружи здания для обеспечения работы системы естественной вытяжной вентиляции.

В работе В.С. Степанова [3] затраты энергии на перемещение воздуха в системе естественной вентиляции приравнены к нулю. Согласиться с этим нельзя, так как на осуществление данного процесса тратится энергия, поданная в здание системой отопления, и при наличии дефлектора энергия ветра, увеличивающая разницу давлений внутри и снаружи здания. Поскольку скорость ветра является вариативной величиной, ее влияние на величину воздухообмена можно не учитывать, а использовать в расчетах только гравитационную составляющую. Также в этой работе не учтены тепловыделения от людей, находящихся в здании. На наш взгляд, их учет необходим, так как в случае определения минимально необходимых затрат энергии / эксергии, их доля в тепловом балансе здания имеет значительный вес.

Для формирования идеализированного аналога системы естественной вентиляции необходимо произвести выделение энергетических затрат на транспортировку воздуха из минимально необходимых теплопоступлений в жилое здание. Подобное разделение затрат энергии возможно выполнить с помощью различных способов. Нам представляется провести его распределение, оценивая потери эксергии каждого процесса в суммарной величине эксергии [8].

Согласно [4] системы естественной вентиляции для жилых зданий рассчитываются на разность плотностей наружного воздуха при температуре 5 °C и внутреннего воздуха при температуре в холодный период года. Очевидно, что при понижении наружной температуры ниже 5 °C происходит увеличение воздухообмена в здании, а при увеличении ее уменьшение. Подобному подходу, вызывающему нестабильность в работе системы естественной вентиляции, присущи и другие недостатки [5, 6].

Потери давления на трение и местные сопротивления в сети естественной вентиляции не должны превышать располагаемое давление, p , Па [7]:

$$h(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}})g \geq p = \sum (Rl + z), \quad (4)$$

где h — высота воздушного столба — среднее расстояние от центра вытяжной решетки до устья вытяжной шахты, м;

$\rho_{\text{н}}$ — плотность наружного воздуха при $t = 5$ °C, кг / м³;

ρ_b — плотность внутреннего воздуха, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

R — удельные потери давления на трение на расчетном участке, Па/м;

l — длина участка, м;

z — потери давления на местные сопротивления на расчетном участке, Па.

Потери эксергии с вентиляционным воздухом можно оценить как сумму мощностей:

— на преодоление потерь давления N (5), Вт [9, 10]:

$$E_t = \frac{V_{cb}^* p}{\eta_b \eta_h}, \quad (5)$$

где η_b , η_h — коэффициенты полезного действия вентилятора в рабочей точке характеристики и передачи соответственно (так как при естественной вентиляции отсутствует вентилятор, η_b и η_h в целях идеализации необходимо приравнять к единице);

— на потери эксергии в окружающую среду, Вт:

$$E_{o.c} = Q_{пост} \left(1 - \frac{T_h}{T_b} \right). \quad (6)$$

Таким образом, минимальные суммарные потери эксергии жилым домом с естественной вытяжной вентиляцией равняются:

$$E_t = V_{cb}^* h g (\rho_h - \rho_b) + \left(1 - \frac{T_h}{T_b} \right) \times \\ \times ((1 - \gamma) \bar{c}_b V_{cb}^* (T_b - T_h) + (\beta_i \beta_{од} (2,5 + 10,36 \sqrt{v_b}) (35 - t_b))). \quad (7)$$

С целью идеализировать процесс потерь эксергии можно принять: $\gamma = 0,5$ [1]; β_i — 1,0 (легкая работа); $\beta_{од}$ — 0,65 (обычная одежда); $v_b = 0,2$ м/с (минимальная подвижность воздуха в помещении) [11]; $\rho_h = \frac{353}{T_h}$, $\rho_b = \frac{353}{T_b}$ [9]; $V_{cb}^* = 2$ м³/ч (минимально необходимый воздухообмен для дыхания человека) [1]; $\bar{c}_b = 1,2949$ кДж/(м³ · °C) = = 4,66164 Вт · ч/(м³ · °C) [12] (при этом необходимо заметить, что теплоемкость воздуха имеет выраженную зависимость от температуры и давления [13], опущенную в данном исследовании). В этом случае уравнение (7) можно представить как:

$$E_t = 19,62 h \left(\frac{353}{T_h} - \frac{353}{T_b} \right) + \left(1 - \frac{T_h}{T_b} \right) \times \\ \times (4,66164 (T_b - T_h) + (7,133 (308 - T_b))). \quad (8)$$

Расчеты минимальных затрат эксергии на работу систем вентиляции для различных условий эксплуатации приведены в табл. 1. Зависимость минимальных потерь эксергии на отопление и работу системы естественной вентиляции, приведенных на одного человека при температуре внутреннего воздуха, равной 18 °C, в зависимости от температуры наружного

Таблица 1. Зависимость минимальных потерь эксергии, Вт, на работу системы естественной вентиляции, приведенных на одного человека при $t_b = 18^{\circ}\text{C}$, в зависимости от температуры наружного воздуха и расстояния от центра вытяжной решетки до устья вытяжной шахты

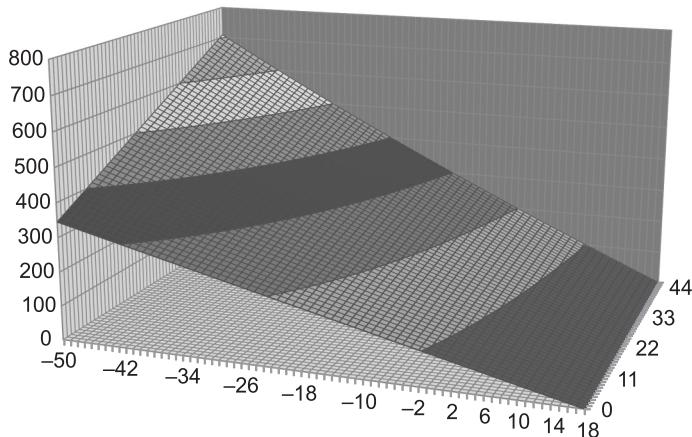
		Расстояние от вытяжной решетки до устья вытяжной шахты, м										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-50	0	36	72	108	145	181	217	254	290	326	362
	-45	0	32	65	98	131	164	197	230	263	295	328
	-40	0	29	59	88	118	148	177	207	236	266	296
	-35	0	26	53	79	106	132	159	185	212	238	265
	-30	0	23	47	70	94	117	141	164	188	211	235
	-25	0	20	41	61	82	103	123	144	165	185	206
	-20	0	17	35	53	71	89	107	125	142	160	178
	-15	0	15	30	45	60	76	91	106	121	136	152
	-10	0	12	25	38	50	63	76	88	101	114	126
	-5	0	10	20	30	40	51	61	71	81	91	102
	0	0	7	15	23	31	39	47	54	62	70	78
	5	0	5	11	16	22	27	33	38	44	50	55
	10	0	3	5	10	13	16	20	23	26	30	33
	15	0	1	2	3	4	6	7	8	9	11	12

воздуха и расстояния от центра вытяжной решетки до устья вытяжной шахты, приведена в табл. 2 и проиллюстрирована на рисунке.

Приравнивая минимальные затраты эксергии на работу системы естественной вентиляции к значению, полученному по уравнению (5), и вы-

Таблица 2. Зависимость минимальных потерь эксергии, Вт, на отопление и работу системы естественной вентиляции, приведенных на одного человека при $t_b = 18^{\circ}\text{C}$, в зависимости от температуры наружного воздуха и расстояния от центра вытяжной решетки до устья вытяжной шахты

		Расстояние от вытяжной решетки до устья вытяжной шахты, м										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-50	345	381	417	454	490	526	563	599	635	671	708
	-45	319	352	385	418	451	484	517	550	582	615	648
	-40	294	324	353	383	413	442	472	501	531	561	590
	-35	269	295	322	348	375	401	428	454	481	507	534
	-30	243	267	290	314	337	361	384	408	431	455	478
	-25	218	239	259	280	300	321	342	362	383	404	424
	-20	192	210	228	246	264	282	300	318	335	353	371
	-15	167	182	198	213	228	243	258	274	289	304	319
	-10	142	154	167	180	192	205	218	230	243	256	268
	-5	116	127	137	147	157	167	178	188	198	208	218
	0	91	99	107	114	122	130	138	146	154	162	169
	5	66	71	77	82	88	93	99	104	110	116	121
	10	40	43	47	50	54	57	60	64	67	70	74
	15	15	16	17	18	20	21	22	23	25	26	27



Зависимость минимальных потерь эксергии, Вт, на отопление и работу системы естественной вентиляции, приведенных на одного человека при $t_b = 18$ °С, в зависимости от температуры наружного воздуха и расстояния от центра вытяжной решетки до устья вытяжной шахты

читая их, а также теплопоступления от людей из уравнения (8), получим минимально необходимые затраты энергии, Вт, (9) и эксергии, Вт, (10) на работу системы отопления, приведенные к одному человеку:

$$Q_{\text{от}}^{\min} = (4,66164(T_b - T_h) - 7,133(308 - T_b)) - 19,62h \left(\frac{353}{T_h} - \frac{353}{T_b} \right), \quad (9)$$

$$E_{\text{от}}^{\min} = (4,66164(T_b - T_h) - (7,133(308 - T_b))) \times \\ \times \left(1 - \frac{T_h}{T_b} \right) - 19,62h \left(\frac{353}{T_h} - \frac{353}{T_b} \right). \quad (10)$$

Используя для вычисления относительных КПД систем отопления и естественной вентиляции в жилых зданиях предложенный идеализированный аналог, появляется возможность объективной оценки использования энергии / эксергии в указанных системах. Сравнивая с помощью данного метода различные проектные решения, появляется возможность дать объективную, основанную только на термодинамических параметрах оценку эффективности использования в них энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов, В.С. Эффективность использования энергии [Текст] / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова. — Новосибирск : Наука, 1994. — 257 с.
2. Богословский, В.Н. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч. I. Отопление: справочник проектировщика [Текст] / В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Сканави и др.; под ред. И.Г. Староверова, Ю.И. Шиллера. — 4 изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1990. — 344 с.: ил.
3. Степанов, В.С. Методы оценки термодинамической эффективности систем поддержания микроклимата [Текст] / В.С. Степанов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 10. — С. 46–54.
4. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 [Текст]. — М. : Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012.

5. Выгонец, А.В. Недостатки инженерных методик при расчете естественной вентиляции [Текст] / А.В. Выгонец // Вестн. ИрГТУ. — 2005. — № 1. — С. 173.
6. Сизенко, О.А. Исследование влияния температуры воздуха в чердачном помещении на работу систем естественной вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками [Текст] / О.А. Сизенко, М.Н. Кучеренко // Науч. вестн. Воронеж. гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. — 2009. — № 4. — С. 40–45.
7. Баркалов, Б.В. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч. III. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2: справочник проектировщика [Текст] / Б.В. Баркалов, Н.Н. Павлов, С.С. Амирджанов и др.; под ред. Н.Н. Павлова, Ю.И. Шиллера. — 4 изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1992. — 416 с.: ил.
8. Степанов, В.С. Показатель термодинамической (энергетической) эффективности систем когенерации и его определение [Текст] / В.С. Степанов, К.В. Суслов, Т.В. Сокольникова // Системы. Методы. Технологии. — 2013. — № 2. — С. 45–49.
9. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем [Текст] / под ред. А.С. Юрьева. — СПб. : АНО НПО «Мир и семья», 2001. — 1154 с.: ил.
10. Бродянский, В.М. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие [Текст] / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивер, Я.Я. Карчев и др.; под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. АН УССР. Ин-т технической теплофизики. — Киев : Наук. Думка, 1991. — 360 с.
11. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2013.
12. Бурцев, С.И. Влажный воздух. Состав и свойства: учеб. пособие [Текст] / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков. — СПб. : СПбГАХПТ, 1998. — 146 с.
13. Бесков, С.Д. Техно-химические расчеты [Текст] / С.Д. Бесков. — Изд. 3-е, испр. — М. : Высш. шк., 1962. — 468 с.

*БАЙМАЧЕВ Евгений Эдуардович, канд. техн. наук
Иркутский государственный технический университет*

Получено 24.06.14

Baimachev Evgeniy Eduardovich, candidate of technical sciences, Irkutsk State Technical University, Russia

DEFINITION OF THE MINIMUM EXPENSES OF THE EXERGY ON HEATING AND NATURAL VENTILATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Offered as objective, the indicator for an assessment of thermodynamic overall performance of systems of heating and ventilation of the residential buildings, based on the relation of minimum necessary (theoretical) and actual expenses of energy on their functioning doesn't consider features of collaboration of systems of heating and natural ventilation of residential buildings. The idealized analog of work of systems of heating and natural ventilation for the purpose of determination of numerical values of minimum necessary expenses of energy and exergy for these systems is offered.

Key words: heating, natural ventilation, energy efficiency, exergy.

REFERENCES

1. Stepanov, V.S. Efficiency of use of energy [Text] / V.S. Stepanov, T.B. Stepanova. — Novosibirsk : Nauka, 1994. — 257 p.
2. Bogoslovskiy, V.N. Internal sanitary devices. In 3 parts. Part. I. Heating: reference book [Text] / V.N. Bogoslovskiy, B.A. Krupnov, A.N. Skanavi and other; under ed. I.G. Staroverov, Yu.I. Shiller. — 4th ed., proc. and add. — M. : Stroyizdat, 1990. — 344 p.: ill.

3. Stepanov, V.S. Methods of an assessment of thermodynamic efficiency of systems of maintenance of a microclimate [Text] / V.S. Stepanov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 10. — P. 46–54.
4. SP 60.13330.2012. Heating, ventilation and air conditioning. Set of rules. Actualize edition SNIП 41-01-2003 [Text]. — M. : Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2012.
5. Vygonets, A.V. Shortcomings of engineering techniques at calculation of natural ventilation [Text] / A.V. Vygonets // Vestn. IrGTU. — 2005. — N 1. — P. 173.
6. Sizenko, O.A. Research of influence of air temperature in a garret for work of systems of natural ventilation in residential buildings with warm attics [Text] / O.A. Sizenko, M.N. Kucherenko // Nauch. vestn. Voronezh. gos. arhit.-stroit. un-ta. Stroitelstvo i arhitektura. — 2009. — N 4. — P. 40–45.
7. Barkalov, B.V. Internal sanitary devices. In 3 parts. Part. III. Ventilation and air conditioning. Book 2: reference book [Text] / B.V. Barkalov, N.N. Pavlov, S.S. Amirdzhanov and other; under ed. N.N. Pavlov, Yu.I. Shiller. — 4th ed., proc. and add. — M. : Stroyizdat, 1992. — 416 p.: ill.
8. Stepanov, V.S. Indicator of thermodynamic (power) efficiency of systems of a cogeneration and its definition [Text] / V.S. Stepanov, K.V. Suslov, T.V. Sokolnikova // Sistemy. Metody. Tehnologii. — 2013. — N 2. — P. 45–49.
9. Reference book on calculations of hydraulic and ventilating systems [Text] / under ed. A.S. Iurev. — SPb. : ANO NPO «Mir i semia», 2001. — 1154 p.: ill.
10. Brodianskiy, V.M. Exergetical calculations of technical systems: handbook [Text] / V.M. Brodianskiy, G.P. Verkhiver, Ia.Ia. Karchev and other.; under ed. A.A. Dolinskiy, V.M. Brodianskiy. AN UkrSSR. Institute of technical thermophysics. — Kiev : Nauk. Dumka, 1991. — 360 p.
11. GOST 30494–2011. Buildings inhabited and public. Microclimate parameters in rooms [Text]. — M. : Standartinform, 2013.
12. Burtsev, S.I. Damp air. Structure and properties: manual [Text] / S.I. Burtsev, Yu.N. Tsvetkov. — SPb. : SPbGAHPT, 1998. — 146 p.
13. Beskov, S.D. Technical and chemical calculations [Text] / S.D. Beskov. — 3rd ed., corr. — M. : Vysshiaia shkola, 1962. — 468 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.524.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ, Е.И. КРУТИКОВ,
Д.А. ПОПОВ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ УДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ С МНОГОКАНАЛЬНОЙ ТРУБКОЙ И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассмотрена оригинальная принципиальная схема пневматического механизма с перепуском сжатого воздуха между камерами рабочего и холостого ходов и выпуском только из камеры холостого хода.

Ключевые слова: пневматический ударный механизм, камера рабочего хода, камера холостого хода, камера сетевого воздуха, управляющая воздухораспределительная трубка.

Введение. Предмет рассмотрения связан с поиском принципиальной схемы пневматического ударного механизма с дроссельным воздухораспределением и выпуском отработавшего воздуха только из одной камеры, чем достигается снижение расхода воздуха из сети путем исключения непроизводительного расхода, характерного для дроссельных систем впуска.

Поиск осуществлялся с применением известных признаков классификации¹.

Аналитический обзор пневматических ударных механизмов с дроссельным воздухораспределением выявил аналоги, наиболее подходящие для применения их положительных свойств при синтезе механизма с другими качествами.

Например, в механизмах²⁻⁴ представляют интерес для синтеза: процесс перепуска^{2, 3} и применение многоканальной трубы⁴ подвода и отвода воздуха для рабочих камер.

Так, механизм² содержит (рис. 1): корпус, продольные и радиальные каналы, камеры рабочего и холостого ходов, ударник, некоторое воздухораспределительное устройство, дополнительный продольный канал в стенке корпуса, сообщающий камеры рабочего и холостого ходов посредством радиальных каналов между собой в зависимости от положения ударника. Однако наличие дополнительного продольного канала с радиальными выходами — входами, расположенными один над другим на рас-

¹ Абраменков Э.А., Абраменков Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия: справочное издание. Новосибирск: НГУ, 1993. 430 с.

² А.с. 514092 СССР. Пневматическое устройство ударного действия / Э.А. Абраменков, А.А. Иванютенко, Н.А. Клушин, Д.Г. Суворов, Г.Ф. Тимофеев. Опубл. 1976, Бюл. № 18.

³ А.с. 1158341 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.В. Пичужков. Опубл. 1985, Бюл. № 20.

⁴ А.с. 1061982 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов. Опубл. 1983, Бюл. № 47.

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Попов Д.А., 2014

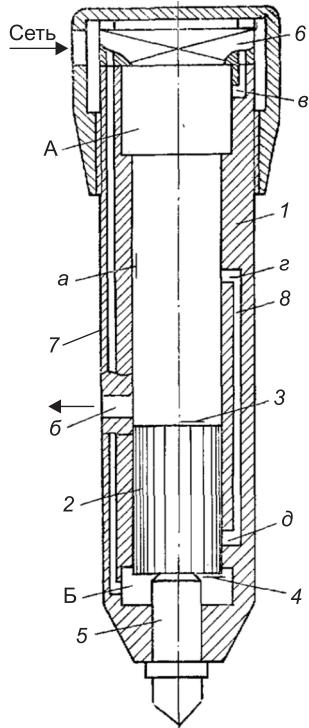


Рис. 1. Пневмоударный механизм с перепуском
 А — камера рабочего хода, Б — камера холостого хода, а — центральный канал, б-д — каналы, 1 — корпус, 2 — ударник, 3, 4 — верхний и нижний торец ударника, 5 — рабочий инструмент, 6 — воздухораспределительное устройство, 7 — канал впуска в камеру холостого хода, 8 — канал перепуска

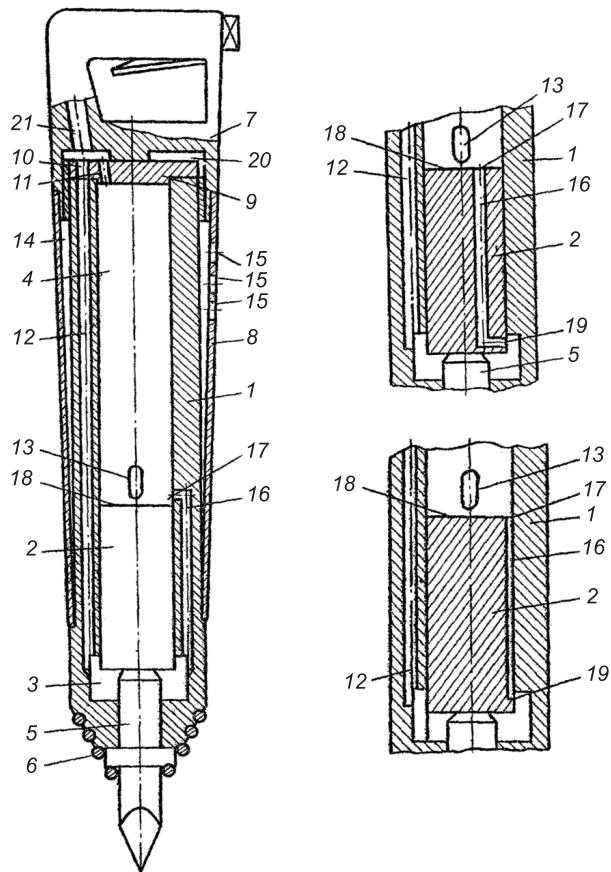


Рис. 2. Пневмоударный механизм с вытеснением
 1 — корпус, 2 — ударник, 3, 4 — камеры холостого и рабочего ходов соответственно, 5 — рабочий инструмент, 6 — концевая пружина, 7 — рукоятка, 8 — кожух, 9 — крышка, 10, 11 — впускные каналы, 12 — канал, 13 — выпускные каналы, 14 — камера, 15 — выпускные отверстия, 16 — канал, 17 — выход канала, 18 — торец ударника, 19 — вход канала, 20 — предварительная камера, 21 — канал

стоянии, не большем двойной длины ударника, приводит к перепуску только части воздуха из камеры рабочего хода в камеру холостого хода перед его выпуском в атмосферу, как правило, с низким давлением воздуха, что при его выпуске из обеих рабочих камер не обеспечивает ощущимой экономии воздуха, отбираемого из сети.

Также механизм³ содержит (рис. 2): корпус с выпускными каналами, размещенный в нем ударник, разделяющий полость ударника на камеры рабочего и холостого ходов, периодически сообщающиеся между собой посредством канала перепуска, выполненного в ударнике. Выход канала перепуска воздуха расположен на поверхности корпуса или ударника на участке между выпускными каналами и торцом ударника в момент контакта ударника с рабочим инструментом.

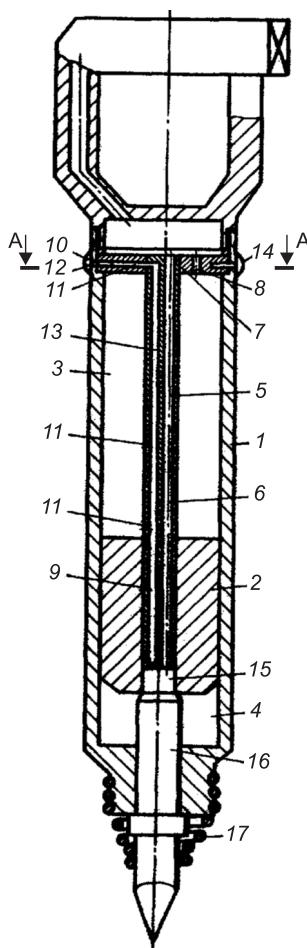
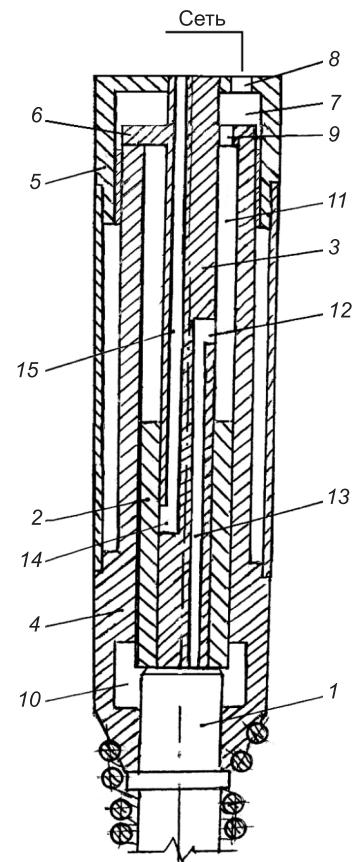


Рис. 3. Пневмоударный механизм с многоканальной трубкой

1 — цилиндрический корпус, 2 — ударник, 3, 4 — камеры рабочего и холостого ходов соответственно, 5 — осевое отверстие, 6 — многоканальная трубка, 7 — крышка, 8 — впускной канал, 9 — выпускной канал, 10 — выпускные дроссели, 11 — радиальные каналы, 12 — выточки, 13 — выпускное отверстие, 14 — ограждение, 15 — осевой канал, 16 — рабочий инструмент, 17 — концевая пружина

Рис. 4. Конструктивная схема пневматического ударного механизма с многоканальной трубкой



При таком техническом решении в рабочем цикле камеры холостого хода используются повторно только часть воздуха камеры рабочего хода перед его выпуском в атмосферу. Это обуславливает при резком перепуске воздуха в цикле камеры холостого хода увеличение противодавления непосредственно перед соударением ударника с хвостовиком рабочего инструмента, что вызывает резкое торможение ударника и снижение его предударной скорости и как следствие снижение частоты и энергии удара. Наличие выпускных каналов воздухопроводов в камере холостого хода, выполненных в стенке корпуса, приводит к увеличению диаметра корпуса и его массы.

Механизм⁴ содержит (рис. 3): цилиндрический корпус, размещенный в нем ударник со сквозным осевым отверстием, разделяющий полость корпуса на камеры рабочего и холостого ходов, крышку с осевой многоканальной трубкой, служащей для впуска сжатого воздуха в камеры, рабочий инструмент и систему выпускных дросселей, периодически сообщающих камеры с атмосферой, причем система выпускных дросселей выполнена в трубке и крышке.

В рабочем процессе упомянутого механизма⁴ выпуск воздуха из сети в каждую из камер и выпуск отработавшего воздуха осуществляется тоже из каждой камеры. Это приводит к значительному непроизводительному расходу воздуха, что снижает экономичность рабочего цикла.

Целесообразность применения трубок в системе воздухораспределения пневматических ударных механизмов, их многообразие и классификация приведены в статье А.А. Кутумова и др.⁵

Отмеченные недостатки механизмов²⁻⁴ исключаются полностью или частично, если применить многоканальную трубку для подвода и отвода воздуха из рабочих камер. При этом впуск воздуха из сети осуществляется только в камеру рабочего хода с последующим перепуском в камеру холостого хода, из которой происходит выпуск в атмосферу. Для этого канал перепуска периодически сообщает камеры рабочего и холостого ходов между собой только при перекрытом боковой поверхностью ударника канале выпуска из камеры холостого хода. Такое техническое решение исключает прямое сообщение камеры рабочего хода с атмосферой.

Рабочий процесс пневматического ударного механизма с многоканальной трубкой заключается в следующем.

В исходном положении (рис. 4) механизм рабочим инструментом 1 упирается в обрабатываемую среду, а ударник 2 находится в положении контакта с рабочим инструментом, который удерживается относительно корпуса 4 концевой пружиной.

После включения механизма сжатый воздух из сети по каналу 8 в стакане 5 поступает в предкамеру 7, оттуда по впускному каналу 9 в крышке 6 в камеру 11 рабочего хода и одновременно по радиальному впусканому каналу 12 и его продолжению в виде продольного канала 13 воздух поступает в камеру 10 холостого хода.

Давление воздуха в камере рабочего хода устанавливается по величине меньшим сетевого, но достаточным для наполнения камеры холостого хода воздухом с одинаковым давлением, что обеспечивается проходным сечением перепускного канала и продольного канала перепуска воздуха из камеры рабочего хода в камеру холостого хода. Давление воздуха в камере холостого хода является расчетным и достаточным по величине для образования силового импульса в ней для преодоления противодавления со стороны камеры рабочего хода, которая обладает функциями проточной камеры с меньшим давлением воздуха, нежели камера холостого хода, обладающая функциями непроточной камеры с повышающимся давлением воздуха.

Под действием импульса сил давления воздуха со стороны камеры холостого хода ударник начнет свое движение в сторону крышки, совершая холостой ход.

Перемещаясь в сторону крышки, ударник закрывает радиальный перепускной канал и перепуск воздуха из камеры рабочего хода в камеру холостого хода прекращается, вследствие чего в камере рабочего хода начинается сжатие отсеченного в ней воздуха и воздуха, поступающего через впускной канал из предкамеры.

При дальнейшем перемещении ударник откроет выпускной (радиальный) канал 14 в стенке многоканальной трубы 3 и отработавший воздух выпускается из камеры холостого хода через продольный

⁵ Кутумов А.А., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Ладнов В.Э. Классификация признаков пневматического ударного механизма // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 3. С. 91–94.

канал 15 в атмосферу, вследствие чего давление воздуха в камере холостого хода устанавливается близким по величине атмосферному давлению.

Преодолевая противодавление воздуха со стороны камеры рабочего хода от сжатия имевшегося и поступающего через впускной канал воздуха из предкамеры, ударник, исчерпав импульс холостого хода и достигнув расчетного положения, останавливается. Сразу же (после остановки) под действием давления воздуха со стороны камеры рабочего хода ударник начинает ускоренное движение в сторону камеры холостого хода, совершая рабочий ход.

Перемещаясь в сторону рабочего инструмента, ударник последовательно перекрывает радиальный перепускной канал, затем радиальный выпускной канал и открывает радиальный перепускной канал.

Перемещение ударника приводит к увеличению объема камеры рабочего хода, давление воздуха в которой существенно не снижается, так как с понижением давления воздуха в камере рабочего хода увеличивается его поступление из предкамеры через впускной канал в крышке, что позволяет поддерживать в камере рабочего хода расчетное давление воздуха, а следовательно, обеспечивать ударнику необходимую величину импульса силы давления воздуха при рабочем ходе.

После открытия ударником радиального перепускного канала воздух из камеры рабочего хода поступает в продольный впускной канал и в объем камеры холостого хода. Давление воздуха в камере холостого хода будет незначительным, так как ударником сжимается только отсеченный в камере воздух, что обуславливает противодавление воздуха в камере холостого хода, существенно не влияющее на торможение ударника.

Преодолевая противодавление сжатого воздуха и вновь поступающее по каналу 9 в камеру 11 и далее по каналу 13 в камеру холостого хода, ударник наносит удар по хвостовику рабочего инструмента, в результате чего ему передается кинетическая энергия удара, приобретенная им за период рабочего хода.

Последующий холостой ход будет осуществляться за счет импульса силы давления воздуха со стороны камеры холостого хода и импульса отскока ударника от рабочего инструмента. Далее ударный импульс от рабочего инструмента будет передан обрабатываемой среде, и рабочий цикл будет повторяться.

Согласно расчетной схеме (рис. 5) введены обозначения, имеющие физический смысл:

V_c , V_p , V_x — соответственно объемы камер сетевой, рабочего и холостого ходов;

p_c , p_p , p_x , p_o , p_a — соответственно давление воздуха в камерах V_c , V_p , V_x сети и атмосфере;

θ_c , θ_p , θ_x , θ_o , θ_a — соответственно температура в камерах V_c , V_p , V_x сети и атмосфере;

ω_c , ω_p , ω_x — площади дросселей впуска воздуха в камеры с объемами V_c , V_p , V_x ;

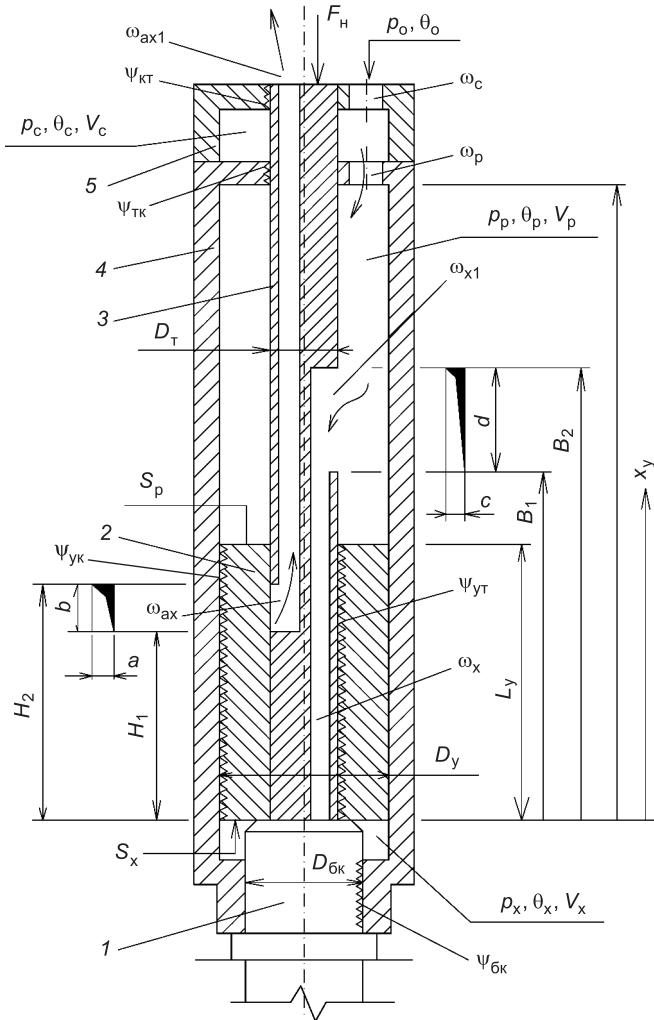


Рис. 5. Расчетная схема пневматического ударного механизма с многоканальной трубкой

1 — хвостовик инструмента, 2 — ударник, 3 — трубка, 4 — крышка, 5 — стакан

ω_{ax} — площадь геометрического сечения канала выпуска в атмосферу из камеры холостого хода;

Ψ_{tc} , Ψ_{tk} , Ψ_{yt} , Ψ_{yk} , Ψ_{bk} — соответственно возможные площади перетечек воздуха между камерами посредством зазоров в подвижных парах: трубка — корпус стакана, трубка — крышка корпуса, трубка — ударник, ударник — корпус, хвостовик инструмента — букса корпуса.

Введем обозначения функций процессов впуска, выпуска и перетечек воздуха:

Φ_c , Φ_p , Φ_x , Φ_{ax} , Φ_{tc} , Φ_{tk} , Φ_{yt} , Φ_{yk} , Φ_{bk} — соответственно площадей впуска ω_c , ω_p , ω_x и выпуска ω_{ax} , площадей перепуска Ψ_{tc} , Ψ_{tk} , Ψ_{yt} , Ψ_{yk} , Ψ_{bk} :

Ω_c , Ω_p , Ω_x , Ω_{ax} , Ω_{tc} , Ω_{tk} , Ω_{yt} , Ω_{yk} , Ω_{bk} — соответственно впуска воздуха в камеры сетевого воздуха, рабочего и холостого ходов выпуска из камеры холостого хода и перетечек во взаимосвязи с функциями Φ_c , Φ_p , Φ_x , Φ_{ax} , Φ_{tc} , Φ_{tk} , Φ_{yt} , Φ_{yk} , Φ_{bk} .

Параметры перетечек, впуска и выпуска воздуха подчиняются закономерностям Сен-Венана — Ванцеля в виде:

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

где индексы ij и ji обозначают направление течения воздуха: при i — откуда и j — куда.

Ограничения для термодинамических функций Ω_i в соответствии с зависимостью от функций φ_i записываются в следующем виде:

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{cases} \varphi_{ij} > 0 & k-1, \\ \varphi_{ij} \leq 0 & k-(\theta_i / \theta_j), \\ \varphi_{ji} > 0 & k-1, \\ \varphi_{ji} \leq 0 & k-(\theta_j / \theta_i). \end{cases} \quad (2)$$

Следуя изменениям направлений течения воздуха, будут учитыватьсья φ_{ij} и Ω_{ij} или φ_{ji} и Ω_{ji} .

Ограничения для перемещения ударника и корпуса механизма:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_0 &= -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \\ \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_0 &= -k_k \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_k \leq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно расчетной схеме (см. рис. 5) описание физико-математической модели пневматического ударного механизма представим в виде дифференциальных уравнений, описывающих изменение давления (4) и температуры (5) в камерах механизма, а также движение ударника и корпуса (6). В (4) и (5) площади ω_i целесообразно принять с коэффициентами расходов $\mu_c = \mu_p = \mu_x = \mu_{ax} = 1$, что существенно упростит расчеты. Уточнение μ_i осуществляется после конструирования конкретной физической модели или посредством продувки конкретного воздухоподводящего тракта в реальной конструкции.

$$\begin{cases} dp_c/dt = k/V_c [W(\omega_c \varphi_c - \omega_p \varphi_p - \psi_{tk} \varphi_{tk} - \psi_{tc} \varphi_{tc})], \\ dp_p/dt = k/(V_p - x_y S_p) [W(\omega_p \varphi_p + \psi_{tk} \varphi_{tk} - \omega_x(x_y) \varphi_x - \psi_{yk} \varphi_{yk} - \psi_{yt} \varphi_{yt}) + p_p (dx_y/dt) S_p], \\ dp_x/dt = k/(V_x + x_y S_x) [W(\omega_x(x_y) \varphi_x + \psi_{yk} \varphi_{yk} + \psi_{yt} \varphi_{yt} - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} - \psi_{bk} \varphi_{bk}) - p_x (dx_y/dt) S_x]; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} d\theta_c/dt = \theta_c/(p_c V_c) [W(\omega_c \varphi_c \Omega_c - \omega_p \varphi_p \Omega_p - \\ - \psi_{tk} \varphi_{tk} \Omega_{tk} - \psi_{tc} \varphi_{tc} \Omega_{tc})], \\ d\theta_p/dt = \theta_p/(p_p (V_p - x_y S_p)) [W(\omega_p \varphi_p \Omega_p + \psi_{tk} \varphi_{tk} \Omega_{tk} - \\ - \omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x - \psi_{yk} \varphi_{yk} \Omega_{yk} - \psi_{yt} \varphi_{yt} \Omega_{yt}) + (k-1)(dx_y/dt) S_p], \\ d\theta_x/dt = \theta_x/(p_x (V_x + x_y S_x)) [W(\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x + \psi_{yk} \varphi_{yk} \Omega_{yk} + \\ + \psi_{yt} \varphi_{yt} \Omega_{yt} - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} \Omega_{ax} - \psi_{bk} \varphi_{bk} \Omega_{bk}) - (k-1)(dx_y/dt) S_x]; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} d^2 x_y/dt^2 = [p_x S_x - p_p S_p - F_{yt} - F_{yk}] / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y/dt)_o = -k_y(dx_y/dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2 x_k/dt^2 = [p_x S_x - p_p S_p - F_{yt} - F_{yk} - F_h] / m_k & \text{при } x_k > 0, \\ (dx_k/dt)_o = -k_y(dx_k/dt)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

В уравнениях физико-математического описания (4)–(6) кроме указанных на расчетной схеме принятые и другие обозначения:

x_y, x_k — перемещения ударника и корпуса;

m_y, m_k — массы ударника и корпуса;

t — текущее время;

S_p, S_x — рабочие площади ударника со стороны камер с объемами V_p, V_x ;

S_y, S_t — диаметральные площади сечений ударника и трубки;

k_y, k_k — коэффициенты отскока ударника от хвостовика инструмента, корпуса от буртика инструмента;

F_h — сила нажатия на корпус;

F_{yk}, F_{yt} — силы трения при перемещении ударника относительно корпуса и трубки;

$$W = (2kR/(k-1))^{1/2},$$

где k — показатель баро- и термодинамического процесса;

R — газовая постоянная.

Ограничения на площадь сечения ω_i каналов впуска и выпуска воздуха в зависимости от положения ударника:

$$\omega_c = \text{const}, \omega_p = \text{const}, \omega_x = \text{const}, \omega_{ax} = \text{const};$$

$$\omega_x(x_y) = \begin{cases} \omega_x = \max \omega_x = c \cdot d & \text{при } (x_y + L_y) \leq B_1, \\ \omega_x = \min \omega_x = c \cdot d \cdot 0,5 & \text{при } 0,5(B_2 - B_1) < (x_y + L_y) < B_2, \\ \omega_x = 0 & \text{при } B_2 \leq (x_y + L_y); \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} \omega_{ax} = 0 & \text{при } x_y \leq H_1, \\ \omega_{ax} = \max \omega_{ax} = a \cdot b & \text{при } H_2 \leq x_y, \\ \omega_{ax} = a \cdot b \cdot 0,5 & \text{при } H_1 < x_y \leq (H_2 - H_1) \cdot 0,5. \end{cases} \quad (8)$$

При предварительном исследовании модели рабочего процесса пневмоударного механизма целесообразно с целью упрощения расчетов опустить в (4)–(6) учет возможности перетечек:

$\Psi_{kt}\Phi_{kt}$ и $\Psi_{kt}\Phi_{kt}\Omega_{kt}$; $\Psi_{tk}\Phi_{tk}$ и $\Psi_{tk}\Phi_{tk}\Omega_{tk}$; $\Psi_{yk}\Phi_{yk}$ и $\Psi_{yk}\Phi_{yk}\Omega_{yk}$; $\Psi_{yt}\Phi_{yt}$ и $\Psi_{yt}\Phi_{yt}\Omega_{yt}$; $\Psi_{bk}\Phi_{bk}$ и $\Psi_{bk}\Phi_{bk}\Omega_{bk}$; F_{yk} и F_{yt} .

Также принять проходные площади сечений каналов впуска $\omega_{x1} > \omega_x$ и выпуска $\omega_{ax1} > \omega_{ax}$ и расчет вести по минимальным ω_x и ω_{ax} .

Выводы. Синтезированный пневматический ударный механизм с многоканальной трубкой позволяет увеличить импульс силы давления воздуха при разгоне ударника за время рабочего хода и как следствие уменьшить расход воздуха, увеличить скорость соударения, частоту и энергию удара при отсутствии поступления в камеру холостого хода сжатого воздуха непосредственно из сети.

Рассмотренный пневматический механизм позволяет создавать широкий типоразмерный ряд машин ударного действия для строительства и горной промышленности.

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

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

КРУТИКОВ Евгений Игоревич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ПОПОВ Денис Александрович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 16.06.14

Abramenkov Dmitriy Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

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

Dedov Alexey Sergeevich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Krutikov Eugene Igorevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Popov Denis Alexandrovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PNEUMATIC PERCUSSION MECHANISM WITH MULTI-CHANNEL RECEIVER AND PHYSICAL MATHEMATICAL DESCRIPTION

An original schematic diagram of the pneumatic mechanism with compressed air bypass between the working chambers and idle strokes and only release from the chamber idling.

Key words: pneumatic hammer mechanism, the chamber stroke, the camera idle, air network camera, the control of air distribution tube.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 502.34

И.М. ЕВГРАФОВА, Е.В. ШУБИНА, А.А. ЛАВРУСЕВИЧ

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ

Вопрос определения ущерба окружающей среде на сегодняшний день при проектировании и эксплуатации объектов хозяйственной деятельности является актуальным, так как существующие методики не позволяют в полной мере оценить вред. Цель работы — сравнение результатов определения запроектированного и действительного ущерба для промышленного объекта. В статье нашли отражение вопросы экологического нормирования, экономики природопользования и управления качеством окружающей среды. Анализируются существующие эколого-экономические подходы для оценки хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: ущерб окружающей среде, экономика природопользования, экологические нормативы, экологический вред, компенсационные выплаты.

В соответствии с государственной политикой в области экологического развития России до 2030 г. одним из основных механизмов по снижению негативного воздействия на окружающую среду является замена практики взимания платы за сверхлимитное загрязнение окружающей среды на практику возмещения причиненного вреда при одновременном отказе от временно согласованных нормативов.

Тем не менее при осуществлении проектирования и ведении хозяйственной деятельности не разработаны методологические подходы для решения поставленных задач. В связи с чем исследования, посвященные вопросам эколого-экономической оценки хозяйственной деятельности, являются весьма актуальными.

Анализ действующих нормативно-правовых источников выявил следующие проблемы:

1. Термины «вред и ущерб» используются как синонимы.
2. Отсутствует экосистемный подход при определении вреда окружающей среде.
3. Широко применяются временно согласованные нормативы, которые являются преградой для экономического стимулирования сокращения экологической нагрузки [1, 3].

Существует неопределенность трактовки терминов «вред и ущерб». Так, в соответствии с ГОСТ Р 22.10.01–2001 дано определение различным видам ущербов, которые далеко не все используются в экологической деятельности. Термин же «вред» нашел свое отражение в Гражданском кодексе РФ и в ФЗ «Об охране окружающей среды». Экологический

вред понимается как любое ухудшение состояния окружающей среды, произошедшее вследствие правовых экологических требований [2].

Оценка экологического вреда не учитывает экосистемные связи, поэтому невозможно произвести достоверную оценку даже по укрупненным показателям в денежной форме. По своему содержанию ущерб как количественная и качественная оценка окружающей среды и убыток как экономически невыгодные для природопользователя потери являются формами экологического вреда, т. е. любым неблагоприятным последствием, вызванным нарушением экологического законодательства [4].

В качестве примера рассмотрим исследования, проведенные на мясокомбинате в с. Глинищево Брянского района, предназначенный для производства мяса и мясных полуфабрикатов с объемом выпуска 37 830 т/год. Санитарно-защитная зона согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 п.7.1.8 составляет 1000 м. Площадка свободна от застройки и насаждений, представляет собой пашню. Поверхностный сток затрудненный, что обусловлено рельефом местности.

Объект включает комплекс производственных и вспомогательных объектов, действующих на окружающую среду. Результаты воздействия приведены в табл. 1.

Таблица 1. Воздействие объекта на окружающую среду

Компоненты окружающей среды	Виды воздействия	
	Период строительства	Период эксплуатации
Воздух	Выбросы загрязняющих веществ от работы строительной техники, окрасочных и сварочных работ	Выбросы загрязняющих веществ от производственного корпуса, стоянки грузового и легкового транспорта, котельной и других процессов
Поверхностные воды	Забор воды из поверхностных источников не предусматривается	Забор воды из поверхностных источников не предусматривается Водопровод от точки подключения прокладывается по территории проектируемого объекта и разводится по территории предприятия
Подземные воды	Земляные работы на участках с высоким стоянием грунтовых вод	Нет воздействия. Предусмотрено устройство ливневой канализации с очисткой ливневых стоков
Почва	Производство работ ведется на территории, занятой пашней. Почвенно-растительный слой, согласно инженерно-геологическим изысканиям, составляет 0,3-1,3 м, предусмотрено снятие плодородно-растительного слоя на территории застройки	Предусмотрено устройство проходов и проездов с твердым покрытием
Социальная сфера	Шумовое воздействие от работающей техники	Шумовое воздействие от работающего оборудования, систем вентиляции, компрессорного оборудования, трансформаторной подстанции и пр.

В состав выбросов входят загрязняющие вещества, перечень которых представлен в табл. 2. Расчеты платы за ущерб, связанный с выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, произведен на основании Постановления Правительства РФ от 12 июня 2003 г. № 344, Постановления Правительства РФ от 01.07.2005 г. № 410 и Федерального Закона от 30 ноября 2011 года N 371-ФЗ.

Негативное воздействие на поверхностные и подземные воды в период производства работ может произойти под влиянием следующих факторов:

- земляные работы вблизи и на участках с высоким стоянием грунтовых вод;
- передвижение строительной техники;

Таблица 2. Плата за выбросы в атмосферу

Наименование загрязняющего вещества	Объем выброса, т	Норматив платы, руб./т	Размер оплаты, руб./год
Дижелезо триоксид (железа оксид) (в пересчете на железо)	0,096676	52	15,95
Марганец и его соединения (в пересчете на марганца (IV) оксид)	0,008320	2050	66,43
Азота диоксид (азот (IV) оксид)	8,293196	52	1679,70
Азот (II) оксид (азота оксид)	1,345438	35	183,42
Углерод (сажа)	1,019829	80	258,87
Сера диоксид	1,106224	21	73,71
Углерод оксид	8,916517	0,6	20,84
Фтористые газообразные соединения — гидрофторид, кремний тетрафторид [фтористые соединения газообразные (фтористый водород, четырехфтористый кремний)] (в пересчете на фтор)	0,006783	410	10,83
Фториды неорганические плохо растворимые — (алюминия фторид, кальция фторид, натрия гексафторалюминат) [фтористые соединения: плохо растворимые неорганические фториды (фторид алюминия, фторид кальция, гексафторалюминат натрия)] (в пересчете на фтор)	0,029844	68	7,90
Диметилбензол (ксилол) (смесь изомеров о-, м-, п-)	1,470154	513	2937,57
Бенз / а / пирен	0,000013878	2049801	110,80
Метилбензол (толуол)	0,855400	3,7	12,33
Формальдегид	0,140778	683	374,51
Пропан-2-он (ацетон)	0,183300	6,2	4,43
Бензин (нефтяной, малосернистый) (в пересчете на углерод)	0,008426	41	1,35
Керосин	4,207286	2,5	40,97
Уайт-спирит	0,882686	2,5	8,60
Взвешенные вещества	0,534438	13,7	28,52
Пыль неорганическая: 70–20 % двуокиси кремния	0,143298	21	11,72
Пыль неорганическая: ниже 20 % двуокиси кремния	0,069100	13,7	3,69
<i>Итого</i>	29,31771	—	5852,13

- образование строительных и бытовых отходов;
- заправка техники ГСМ.

В связи с тем, что забор и сброс воды в поверхностные водные объекты не осуществляется, расчет платы за пользование водными объектами не производится.

Ливневые и талые стоки собираются внутриплощадочной сетью дождевой канализации в аккумулирующую емкость, а затем попадают на очистные сооружения ливневых сточных вод. Очищенные сточные воды после очистных сооружений насосом перекачиваются в овраг, расположенный вблизи проектируемого объекта, затем в ручей и далее самотеком в реку Госомка. Расчет платы за загрязнение окружающей среды также не производится.

Проектные решения предполагают отведение для хозяйственной деятельности 8,52 га земель сельскохозяйственного назначения без исчисления компенсационных платежей. Отходы, образующиеся на объекте, представлены в основном IV и V классами опасности (табл. 3).

Таблица 3. Плата за размещение отходов

Наименование отходов	Количество, т	Базовый норматив платы, руб./т	Плата, руб.
Отходы IV класса опасности	397,119	248,4	323553,50
Отходы V класса опасности	153,63	8,0	3284,00
<i>Итого</i>			326837,50

Шумовое воздействие осуществляется за счет работы строительной техники в период строительно-монтажных работ и при работе производственного оборудования. По результатам расчетов уровень звукового воздействия не превышает санитарно-гигиенических нормативов. Плата за физические факторы воздействия не взимается.

Таким образом, ущерб исчисляется только для атмосферного воздуха и отходов и составляет 332689,63 руб. Тем не менее, используя методику исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды (приказ МПР от 08.07.2010 № 238), ущерб территории составит 2 047 047 руб.

Выводы. 1. Неоднозначность терминологической основы и методических подходов при определении ущербов окружающей среде не дает возможности их адекватной оценки.

2. Перспективным направлением для оптимизации работы в рассматриваемой сфере является пересмотр системы производственного нормирования с отменой временно согласованных нормативов.

3. Проектные решения не содержат информации о вреде, ущербе и компенсационных выплатах в процессе эксплуатации объекта, а отражают вопросы, возникающие исключительно в период строительно-монтажных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рукавишникова, И.В. К вопросу о необходимости формирования нового подхода к оценке экологического ущерба [Текст] / И.В. Рукавишникова, М.В. Березюк, Д.Н. Макарова // Экология и промышленность России. — 2013. — № 4. — С. 62–64.

2. Ильчева, М.В. Методы оценки экономического ущерба от негативного влияния загрязненной среды [Текст] / М.В. Ильчева // Изв. Челябин. науч. центра УрО РАН. — 2005. — № 3. — С. 111–115.
3. Кисуленко, Б.В. Нормирование выбросов вредных веществ [Текст] / Б.В. Кисуленко, С.А. Аникеев // Стандарты и качество. — 2014. — № 2. — С. 32–35.
4. Шелухина, Е.А. Применение экономических инструментов для нейтрализации экологического ущерба в региональном аспекте [Текст] / Е.А. Шелухина // Региональная экономика: теория и практика. — 2013. — № 37. — С. 34–43.

*ЕВГРАФОВА Ирина Михайловна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: irina-sen811@yandex.ru
Московский государственный строительный университет
ШУБИНА Елена Васильевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: helena@inbox.ru
Московский государственный строительный университет
ЛАВРУСЕВИЧ Андрей Александрович, д-р геол.-мин. наук, доц.; E-mail:
lavrusevich@yandex.ru
Московский государственный строительный университет*

Получено 10.06.14

Evgrafova Irina Mikhaylovna, doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: irina-sen811@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Shubina Elena Vasilevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: helena@inbox.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Lavrusevich Andrey Alexandrovich, doctor of geological and mineralogical sciences, assistant professor; E-mail: lavrusevich@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF ECONOMIC ACTIVITY. PRACTICE AND PROSPECTS

The question of determining the environmental damage to date in the design and operation of economic activity is relevant because existing techniques do not allow to fully appreciate the harm. Purpose — to determine the results of a comparison of projected and actual damage to an industrial facility. The article reflects the issues of environmental regulation, environmental economics and environmental management. Analyzes the current environmental and economic approaches to assess economic activity.

Key words: environmental damage, environmental economics, environmental regulations, environmental damage, compensation.

REFERENCES

1. Rukavishnikova, I.V. The question of the need for a new approach to the assessment of environmental damage [Text] / I.V. Rukavishnikova, M.V. Berezyuk, D.N. Makarova // Ecology and Industry of Russia. — 2013. — N 4. — P. 62–64.
2. Il'icheva, M.V. Methods for assessing the economic impact of the negative impact of polluted environment [Text] / M.V. Il'icheva // Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center RAS. — 2005. — N 3. — P. 111–115.
3. Kisulenka, B.V. Rationing emissions [Text] / B.V. Kisulenka, S.A. Anikeyev // Standards and Quality. — 2014. — N 2. — P. 32–35.
4. Shelukhina, E.A. Application of economic instruments to neutralize the environmental damage in the regional aspect [Text] / E.A. Shelukhina // Regional Economy: Theory and Practice. — 2013. — N 37. — P. 34–43.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 69.003:519.2

Ю.Б. КАЛУГИН

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Изложены теоретические предпосылки моделирования воздействия дестабилизирующих факторов, имеющих вероятностную природу, на технологический процесс. Модель основана на пошаговой реализации всех возможных вариантов на «графе исходов». Установлены зависимости, позволяющие определить совместное воздействие дестабилизирующих факторов на производительность технологического процесса.

Ключевые слова: производительность технологического комплекса, дестабилизирующие факторы, «граф исходов».

Известно, что точность и достоверность календарного планирования зависят в первую очередь от точности определения параметров соответствующих технологических процессов (производительности).

Выполненное статистическое моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс укладки пути [1] позволило установить характер и законы распределения производительности технологического процесса в зависимости от состояния техники, природно-климатических условий, поставки материалов, квалификации исполнителей.

Установлено, что в условиях воздействия n дестабилизирующих факторов средняя производительность технологического процесса будет определяться следующим выражением:

$$\Pi = \prod_{j=1}^n k_j \times \Pi^r, \quad (1)$$

где Π^r — производительность процесса в идеальных условиях в соответствии с технологической картой;

$$k_j = \frac{\Pi_j}{\Pi^r}, \quad (2)$$

где k_j — коэффициент учета влияния j -го фактора;

Π_j — производительность технологического процесса в условиях воздействия j -го фактора.

Для теоретического обоснования полученной зависимости может быть использован следующий подход.

Пусть идеальные условия работы технологического комплекса, при которых в каждую единицу времени выполняется объем работ в соответ-

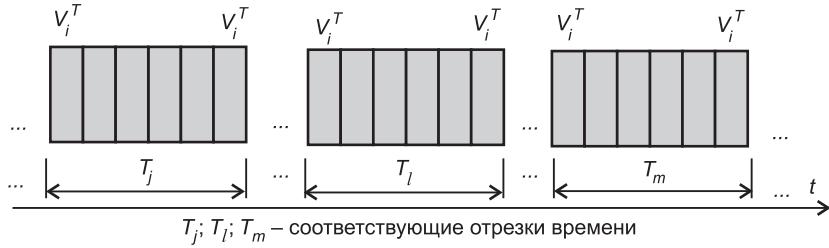


Рис. 1. Идеальные условия работы технологического комплекса

T_j , T_l , T_m — соответствующие отрезки времени

ствии с технологической картой V_i^T , характеризуются схемой, приведенной на рис. 1.

В условиях отдельного влияния дестабилизирующего фактора в идеальной схеме возникают отказы и она приобретает вид, показанный на рис. 2.

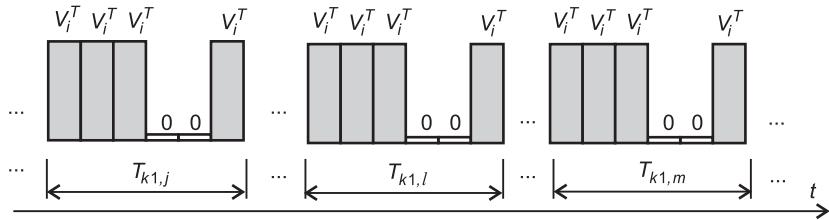


Рис. 2. Результаты отдельного воздействия 1-го дестабилизирующего фактора на технологический процесс

Соответствующие зависимости для каждого отрезка времени $T_{k1,j}$; $T_{k1,l}$; $T_{k1,m}$ установлены.

Пусть в случае отдельного воздействия второго дестабилизирующего фактора на технологический процесс идеальная схема выглядит следующим образом (рис. 3).

Соответствующие зависимости для каждого отрезка времени $T_{k2,j}$; $T_{k2,l}$; $T_{k2,m}$ также установлены.

Представленные данные позволяют построить график исходов воздействия двух факторов, имеющих вероятностную природу (рис. 4).

Анализ графика исходов показывает следующее. На первом уровне графа (в результате воздействия 1-го фактора) в соответствии с рис. 2 реализуются четыре положительных исхода (с объемами работ V_i^T) и два отрицательных исхода (с объемами выполненных работ — 0).

На втором уровне графа (в результате воздействия 2-го фактора) в соответствии с рис. 3 — половина положительных исходов и половина отрицательных.

На третьем уровне графа (в результате совместного воздействия двух факторов) из 12 возможных исходов — 4 положительных и 8 отрицательных.

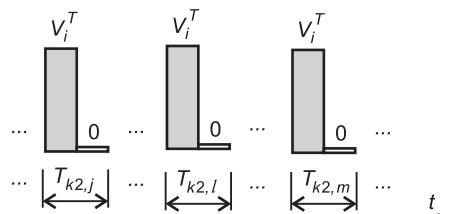


Рис. 3. Результаты отдельного воздействия 2-го дестабилизирующего фактора на технологический процесс

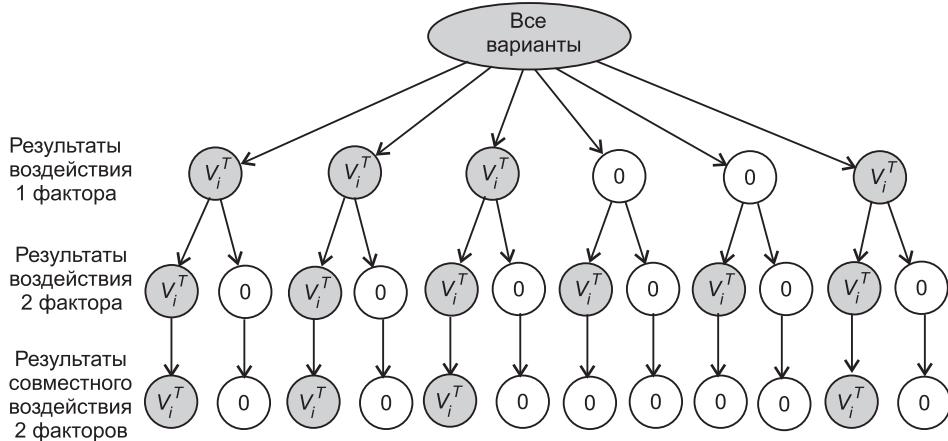


Рис. 4. Граф исходов воздействия двух дестабилизирующих факторов

Пусть N_j — общее число исходов в результате воздействия j -го дестабилизирующего фактора; N_j^p — число положительных исходов; N_j^0 — число отрицательных исходов.

Число положительных исходов в результате воздействия n дестабилизирующих факторов определится следующей зависимостью:

$$N^p = N_1^p \times \dots \times N_j^p \times \dots \times N_n^p, \quad (3)$$

при общем числе исходов

$$N = N_1 \times \dots \times N_j \times \dots \times N_n. \quad (4)$$

Вероятность положительного исхода составит

$$P(V^t) = \frac{N^p}{N} = \frac{N_1^p \times \dots \times N_j^p \times \dots \times N_n^p}{N_1 \times \dots \times N_j \times \dots \times N_n}. \quad (5)$$

Выражение (5) может быть записано в следующем виде:

$$P(V^t) = \frac{N^p}{N} = \frac{N_1^p}{N_1} \times \dots \times \frac{N_j^p}{N_j} \times \dots \times \frac{N_n^p}{N_n}. \quad (6)$$

В результате умножения числителя и знаменателя выражения (6) на величину V_i^t :

$$P(V^t) = \frac{N^p \times V_i^t}{N \times V_i^t} = \frac{N_1^p \times V_i^t}{N_1 \times V_i^t} \times \dots \times \frac{N_j^p \times V_i^t}{N_j \times V_i^t} \times \dots \times \frac{N_n^p \times V_i^t}{N_n \times V_i^t}. \quad (7)$$

Очевидно, что

$$N_j \times V_i^t = \Pi^t \times t_j, \quad (8)$$

$$N_j^p \times V_i^t = \Pi_j \times t_j. \quad (9)$$

Здесь Π_j — производительность технологического комплекса в условиях воздействия j -го дестабилизирующего фактора;
 t_j — соответствующий отрезок времени.

Кроме того,

$$N \times V^t = \Pi^t \times t; \quad (10)$$

$$N^p \times V_i^t = \Pi \times t, \quad (11)$$

где Π — производительность технологического комплекса в условиях воздействия всех дестабилизирующих факторов;
 t — соответствующий отрезок времени ($t \supseteq t_j$).

С учетом вышеизложенного выражение (7) приобретет следующий вид:

$$P(V^t) = \frac{\Pi}{\Pi^t} = \frac{\Pi_1}{\Pi^t} \times \dots \times \frac{\Pi_j}{\Pi^t} \times \dots \times \frac{\Pi_n}{\Pi^t}. \quad (12)$$

С учетом (2)

$$P(V^t) = \frac{\Pi}{\Pi^t} = k_1 \times \dots \times k_j \times \dots \times k_n \quad (13)$$

или

$$\Pi = (k_1 \times \dots \times k_j \times \dots \times k_n) \times \Pi^t = \prod_{j=1}^n k_j \times \Pi^t, \quad (14)$$

что полностью соответствует выражению (1).

Выражение (6) может быть представлено в следующем виде:

$$1 - P(0) = P_1(V^t) \times \dots \times P_j(V^t) \times \dots \times P_n(V^t). \quad (15)$$

Здесь $P(0)$ — вероятность итогового отрицательного исхода;
 $P_j(V^t)$ — вероятность положительного исхода в результате воздействия j -го дестабилизирующего фактора

или

$$P(0) = 1 - P_1(V^t) \times \dots \times P_j(V^t) \times \dots \times P_n(V^t). \quad (16)$$

С учетом (12) значение $P(0)$ представляет собой потери (снижение) технической производительности комплекса вследствие действия ряда дестабилизирующих факторов ($\Delta\Pi^t$), т.е.

$$\Delta\Pi^t = 1 - \prod_{j=1}^n k_j \times \Pi^t. \quad (17)$$

Для упрощения расчетов схема, иллюстрирующая результаты воздействия отдельного дестабилизирующего фактора на технологический процесс (см. рис. 2, 3), может трансформироваться в усредненные значения производительности комплекса в течение укрупненного временного периода. Так, если схема положительных и отрицательных исходов выглядит как на рис. 5, то она может быть представлена следующим соответствующим рядом значений производительности процесса 100, 90, 80, 70 % от технической [1].

Очевидно, что все результаты, представленные выше, правомерны и для укрупненной схемы.

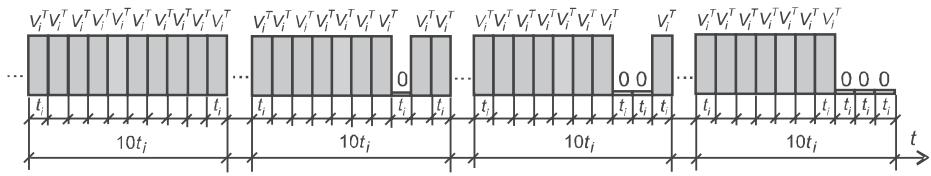


Рис. 5. Схема исходов в результате воздействия дестабилизирующего фактора в течение 4 дней

Полученные результаты могут быть интерпретированы следующим образом.

Если известна производительность комплекса в условиях воздействия каждого дестабилизирующего фактора (в долях от технической производительности), то итоговая производительность определится произведением этих долей, что соответствует выражениям (1) и (14).

Так, если при воздействии одного дестабилизирующего фактора производительность составляет 0,9 технической производительности, при воздействии другого фактора — 0,8, то при воздействии двух факторов итоговая производительность составит 0,72 технической производительности комплекса. Снижение производительности технологического процесса в этих условиях в соответствии с (17) составит 0,28 его технической производительности.

Выводы. 1. Идеальные условия функционирования технологического комплекса, отраженные в соответствующих технологических картах, характеризуются его технической производительностью. Реальная производительность процесса существенно зависит от воздействия различных дестабилизирующих факторов.

2. На основе вероятностного подхода с использованием положительных исходов выполнения процесса (с соответствующей технической производительностью комплекса) и отрицательных исходов (с нулевой производительностью вследствие отказов) реализован график исходов воздействия нескольких дестабилизирующих факторов, имеющих вероятностную природу.

3. Установлено, что если известна производительность комплекса в условиях воздействия каждого дестабилизирующего фактора (в долях от технической производительности), то итоговая производительность определится произведением этих долей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин, Ю.Б. Моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 7. — С. 93–102.

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

Получено 18.06.14

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

THEORETICAL PREREQUISITES OF MODELLING OF INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS ON TECHNOLOGICAL PROCESS

Theoretical prerequisites of modeling of influence of the destabilizing factors having the probabilistic nature, on technological process are stated. The model is based on step-by-step realization of all possible options on «the column of outcomes». The dependences, allowing to define joint impact of destabilizing factors on productivity of technological process are established.

Key words: productivity of the technological complex, destabilizing factors, «the count of outcomes».

REFERENCES

1. Kalugin, Yu.B. Modeling of destabilizing factors of the technological complex [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 7. — P. 93–102.
-

УДК 539.3

В.Д. КУРГУЗОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛКИ-СТЕНКИ*

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния балки-стенки методом конечных элементов, учитывающий точные условия крепления балки к опорам: жесткая заделка, шарнир, свободное опирание с возможным проскальзыванием (контактная задача). Получены эпюры напряжений в опасных сечениях балки-стенки и эпюры смещений на границе расчетной области. Исследованы различные варианты граничных условий на опорах и проанализировано их влияние на процесс деформирования. Проведено сравнение полученных результатов с известными приближенными решениями.

Ключевые слова: балка-стенка, плоская задача теории упругости, метод конечных элементов, контактная задача.

Под балкой-стенкой понимается многопролетная балка, расположенная на ряде равноотстоящих опор, высота которой h соизмерима с длиной пролета $2l$ (рис. 1, а). Предполагается, что балка-стенка нагружена равномерно распределенной нагрузкой q по верхней грани. Известно классическое решение [1], полученное более полувека назад, однако в последнее время появились работы [2, 3], которые уточняют и подправляют известное решение [1]. Уточнения в основном связаны с аппроксимацией граничных условий на опорах.

Постановка задачи. Предполагается, что за исключением крайних пролетов все остальные находятся в одинаковых условиях, т. е. в соответствующих точках всех пролетов напряженно-деформированное состояние одинаково. Таким образом, для исследования напряженно-деформированного состояния всей балки достаточно использовать решение плоской задачи теории упругости для одного пролета балки-стенки. Примем на прямоугольном контуре пролета следующие условия. В сечениях $x=0$, $x=2l$ поставим условия симметрии $u=0$, $\tau_{xy}=0$. Так как верхняя грань балки несет нормальную сжимающую нагрузку интенсивностью q , то при $y=h$ можно записать следующие два условия: $\sigma_y=-q$, $\tau_{xy}=0$. Нижняя грань балки свободна от напряжений во всех точках, кроме тех, которые опираются на колонны, поэтому при $y=0$ касательные напряжения также равны нулю $\tau_{xy}=0$. Представим реакцию опор (и величину σ_y на нижней грани балки) ступенчатой функцией

$$\sigma_y(x, 0) = \begin{cases} q_0, & 0 \leq x < l_0, \\ 0, & l_0 < x \leq l, \end{cases} \quad (1)$$

график которой изображен на рис. 1, б. Из условия равенства нулю суммы проекций всех сил на ось Oy получим $q_0 = ql / l_0$.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 14-08-00113.

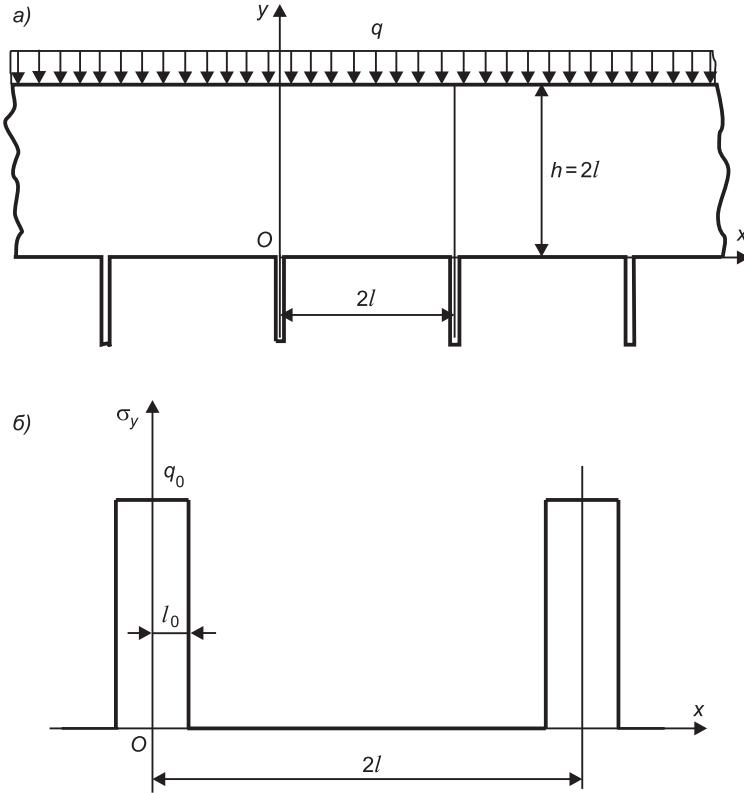


Рис. 1. Равномерно нагруженная неразрезная балка-стенка (а), нормальная нагрузка на нижней грани балки-стенки (б)

Решение этой задачи в виде тригонометрических рядов, полученное в [2], имеет вид:

$$\sigma_x = \frac{2q}{l_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha l_0}{\alpha} (\alpha y - 1) e^{-\alpha y} \cos \alpha x - \nu q, \quad (2)$$

$$\sigma_y = -\frac{2q}{l_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha l_0}{\alpha} (\alpha y + 1) e^{-\alpha y} \cos \alpha x - q, \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2q}{l_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \alpha l_0 \cdot y e^{-\alpha y} \sin \alpha x. \quad (4)$$

Здесь $\alpha = n\pi / l$, ν — коэффициент Пуассона.

Следует заметить, что выражение для σ_x , полученное в [2], не содержит слагаемое $-\nu q$ (формула (2)). Как следует из формул (19)–(21) работы [2], опоры при деформации раздвигаются на величину $2\nu ql / E$, где E — модуль Юнга. Вся балка-стенка удлиняется в горизонтальном направлении, при этом опорные стойки изгибаются от середины длины (сечение $x = l$). Полученный результат является следствием того, что в [1, 2] предполагалась равной нулю сумму нормальных напряжений по любому вертикальному сечению $x = \text{const}$, а это совместимо только с подвижными опорами.

Результаты компьютерного моделирования. Проведем анализ напряженно-деформированного состояния балки-стенки методом конечных элементов. Рассмотрим один пролет балки-стенки. Направим ось Oy

вдоль оси колонны, а ось Ox — вдоль нижней кромки балки, в сечениях $x = 0$, $x = l$ поставим условия симметрии $u = 0$, т.е. ограничимся половиной пролета. Примем $h = 2l = 12$ м, материал балки — бетон с модулем Юнга $E = 30\,000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,15$, равномерно распределенная нагрузка $q = 1$ МПа. Пусть балка опирается на опоры шириной $l_0 = 480$ мм. На участке границы $y = 0$, $0 \leq x \leq l_0$ поставим условие закрепления балки в вертикальном направлении $v = 0$, допуская возможность скольжения балки без трения в горизонтальном направлении, что соответствует условию $\tau_{xy} = 0$ в решении [2]. Покроем расчетную область сеткой 4-узловых прямоугольных элементов с линейной аппроксимацией смещений, размер ребра элемента 12 мм, общее число элементов 500 000. Расчет произведем в линейно-упругой постановке с использованием пакета конечно-элементного анализа MSC.Marc 2012. На рис. 2, 3 приведены эпюры напряжений в некоторых сечениях балки-стенки: штриховые линии — аналитическое решение, построенное по формулам

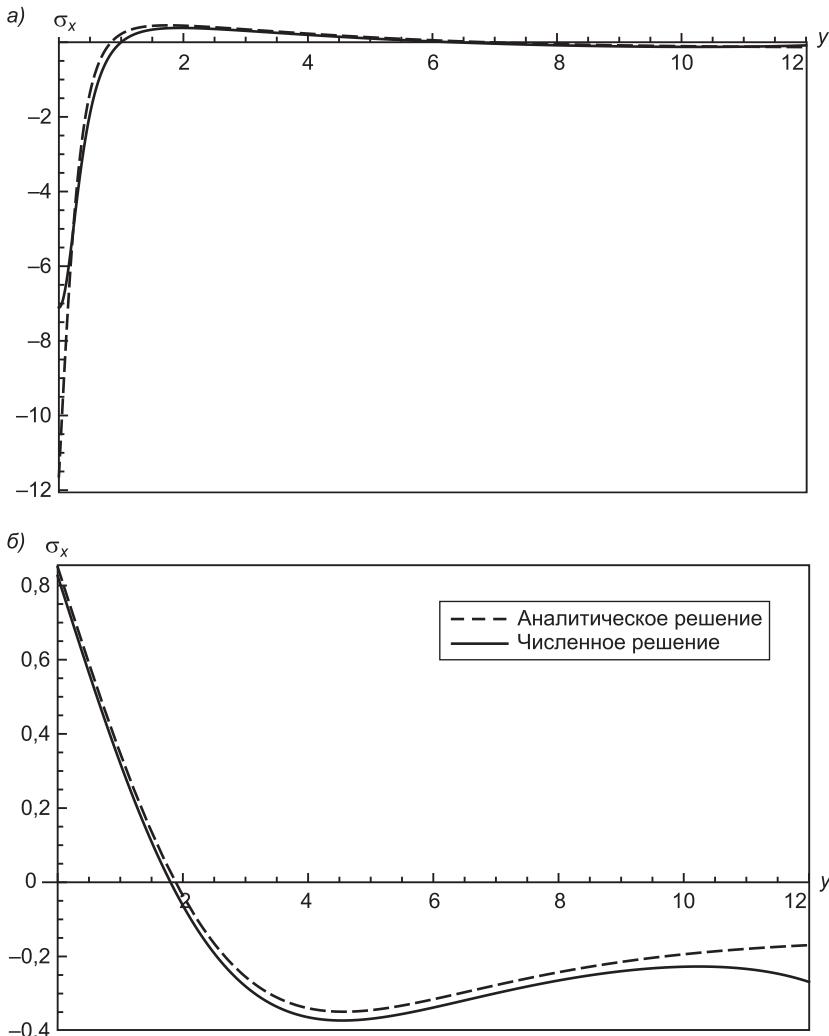


Рис. 2. Распределение напряжений σ_x
а — в сечении $x = 0$; б — в сечении $x = l$

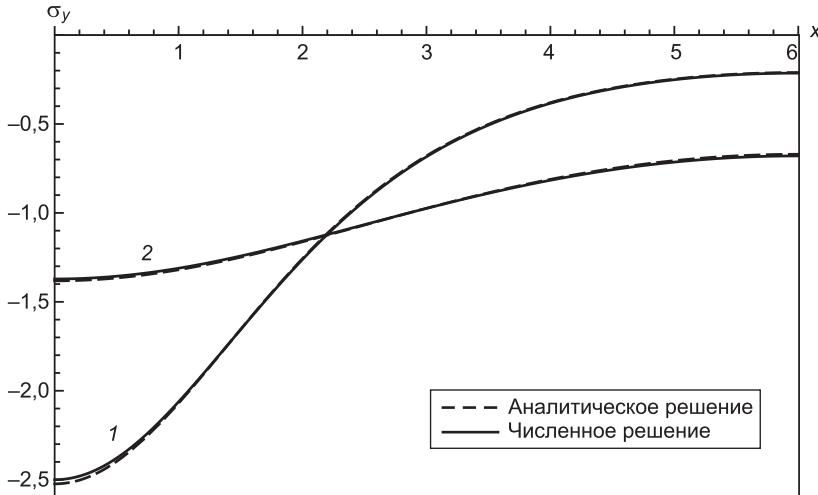


Рис. 3. Распределение напряжений σ_y
1 — в сечении $y = h/4$, 2 — в сечении $y = h/2$

(2), (3), сплошные линии — численное решение, полученное методом конечных элементов.

Эпюры напряжений σ_x , σ_y , построенные по формулам (2), (3), практически не отличаются от эпюр, полученных методом конечных элементов, за исключением некоторой окрестности на верхней кромке балки для σ_x (рис. 2, б). Это объясняется тем, что в численном решении опоры неподвижны. Поскольку метод конечных элементов для линейно-упругих задач дает «точное» решение, с точностью до размера конечного элемента, расчет на последовательности сгущающихся сеток с размерами элементов 48, 24 и 12 мм обнаруживает очень быструю сходимость к точному решению.

Существенное различие аналитического и численного решений наблюдается на нижней кромке балки вблизи опор, что демонстрируют эпюры напряжений σ_y , показанные на рис. 4. Ряд (3) обнаруживает

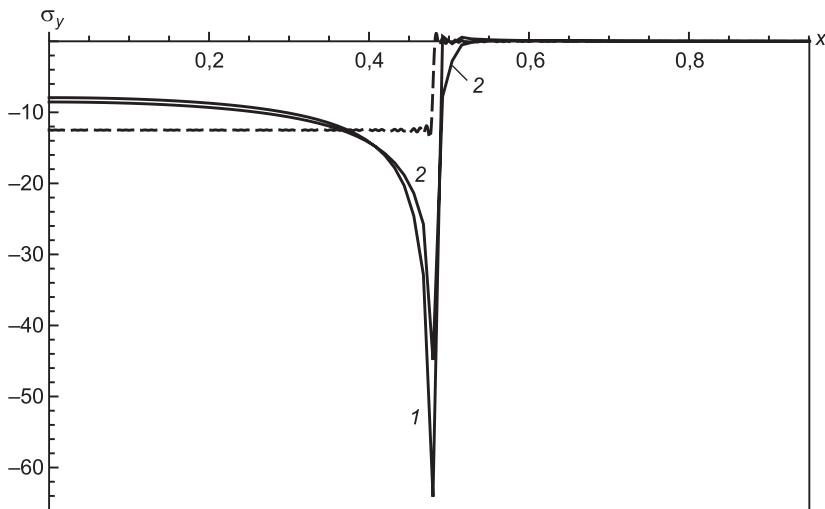


Рис. 4. Распределение напряжений σ_y в сечении $y = 0$
штриховая кривая — нормальные напряжения (1), 1 — опирание
с проскальзыванием, 2 — жесткое крепление

плохую сходимость при $y = 0$ к функции (1), где $q_0 = 12,5$ МПа (суммировалось 1500 членов ряда). Осцилляции напряжений аналитического решения с граничными условиями (1) (штриховая кривая) объясняются эффектом Гиббса, возникающим при аппроксимации ступенчатой функции рядами Фурье. Как видно из представленных эпюр, опирание балки на опору с проскальзыванием (кривая 1) и задание граничных условий в виде (1) приводят к совершенно разному распределению напряжений на нижней грани балки в районе опоры. Задание граничных условий в виде $v = 0$ при $y = 0$, $0 \leq x \leq l_0$ приводит к задаче, эквивалентной задаче о вдавливании жесткого штампа в упругую полуплоскость [4, с. 353] (опора — жесткий штамп, балка — упругая полуплоскость). Распределение давления на штамп описывается функцией вида $\sigma_y = C / \sqrt{l_0^2 - x^2}$, где $C = \text{const}$, график которой качественно совпадает с кривой 1 на рис. 4. Кривая 2 соответствует жесткому креплению балки на опоре: $u = 0$, $v = 0$ при $y = 0$, $0 \leq x \leq l_0$. Как видно, более реальное условие опирания балки на опору — жесткая заделка — приводит к заметному уменьшению пика напряжений. Бесконечно большие напряжения, возникающие в задаче о штампе, объясняются выбором модели идеального линейно-упругого материала, в реальных материалах напряжения всегда ограничены пределом текучести.

Выбор способа закрепления балки на опорах оказывает влияние на напряженное состояние только в небольшой окрестности закрепленных узлов. Расчеты показывают, что уже на расстоянии $h/4$ от нижней кромки балки эпюры напряжений σ_y для различных случаев закрепления (опирание в точке, на колонны шириной $l_0 = 120, 240, 480$ мм, с проскальзыванием или жестким креплением) практически не отличаются друг от друга. Следует признать, что граничные условия, использованные в работах [2, 3], весьма далеки от реальных условий опирания балки на опору, наблюдавшихся в строительных конструкциях.

Распределение смещений по граням балки-стенки в линейно-упругой задаче при $q = 1$ МПа, ширина опоры $l_0 = 480$ мм, показано на рис. 5. Следует отметить, что в работе [3, рис. 2, а, 3 $\leq t \leq 4$] получены неверные горизонтальные смещения u на нижней кромке балки (ср. с кривой 1 на рис. 5, а).

Решение контактной задачи. Рассмотрим ту же самую задачу в геометрически нелинейной постановке с использованием общих уравнений механики деформируемого твердого тела¹. Материал тела подчиняется закону Гука, в качестве мер напряжений и деформаций принимаются тензор напряжений Коши–Грина и тензор конечных деформаций Грина–Лагранжа. Пусть балка опирается либо на цилиндрическую радиусом $R = 480$ мм, либо на прямоугольную шириной $l_0 = 480$ мм (см. рис. 1, а) жесткие опоры. Узел над опорой закрепим, а на границе балка — опора поставим условия контакта без трения деформируемого тела (балка) и жесткого тела (опора), т.е. решим контактную задачу механики деформи-

¹ Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

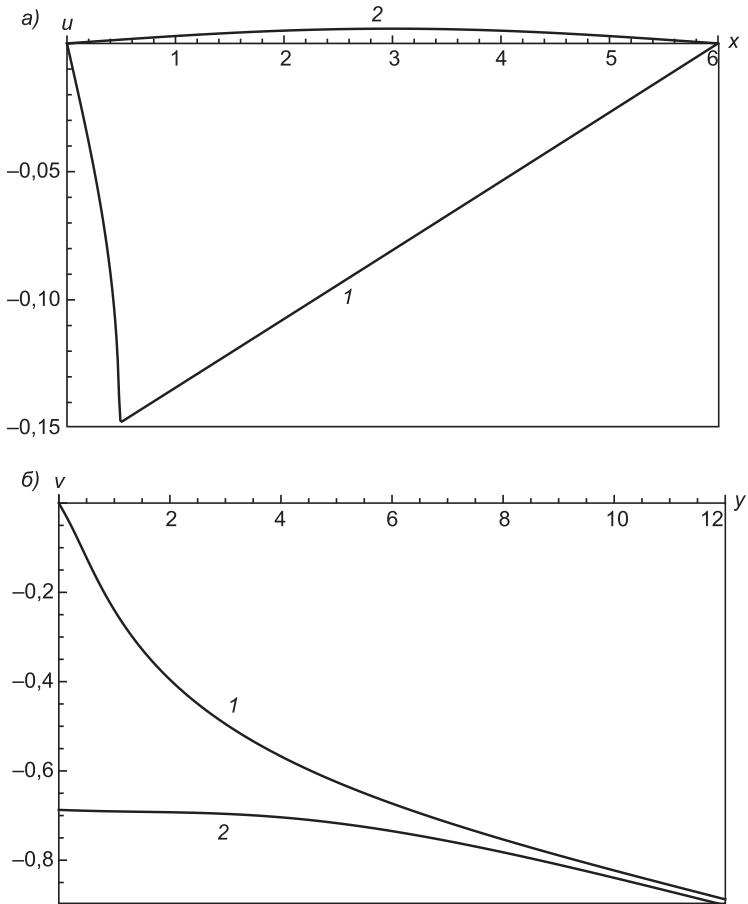


Рис. 5. Эпюры смещений

а — горизонтальные смещения u ; 1 — на нижней кромке балки, 2 — на верхней кромке балки; б — вертикальные смещения v ; 1 — на левой границе, 2 — на правой границе

руемого твердого тела. Расчетная область разбивалась на 500 000 8-узловых четырехугольных элементов с квадратичной аппроксимацией смещений с длиной ребра 12 мм. Распределенная по верхней кромке нагрузка $q = 1$ МПа. Поскольку деформации небольшие, значительных искажений сетки конечных элементов не наблюдалось и перестройка сетки в процессе решения не производилась.

Распределение нормальных напряжений σ_y на нижней кромке балки в некоторой окрестности левого узла представлено на рис. 6, а (кривая 1 — цилиндрическая опора, кривая 2 — прямоугольная). Для цилиндрической опоры профиль напряжений совпадает с решением задачи о вдавливании жесткого цилиндра в упругое основание. Распределение давления на цилиндр описывается функцией вида $\sigma_y = C\sqrt{a^2 - x^2}$, где a — размер области контакта. Пик напряжений для прямоугольной опоры оказался более острым в сравнении с опорой шириной $l_0 = 480$ мм в линейной задаче (см. рис. 4, кривая 1). Как видно из представленных результатов, учет геометрической нелинейности не оказал существенно-

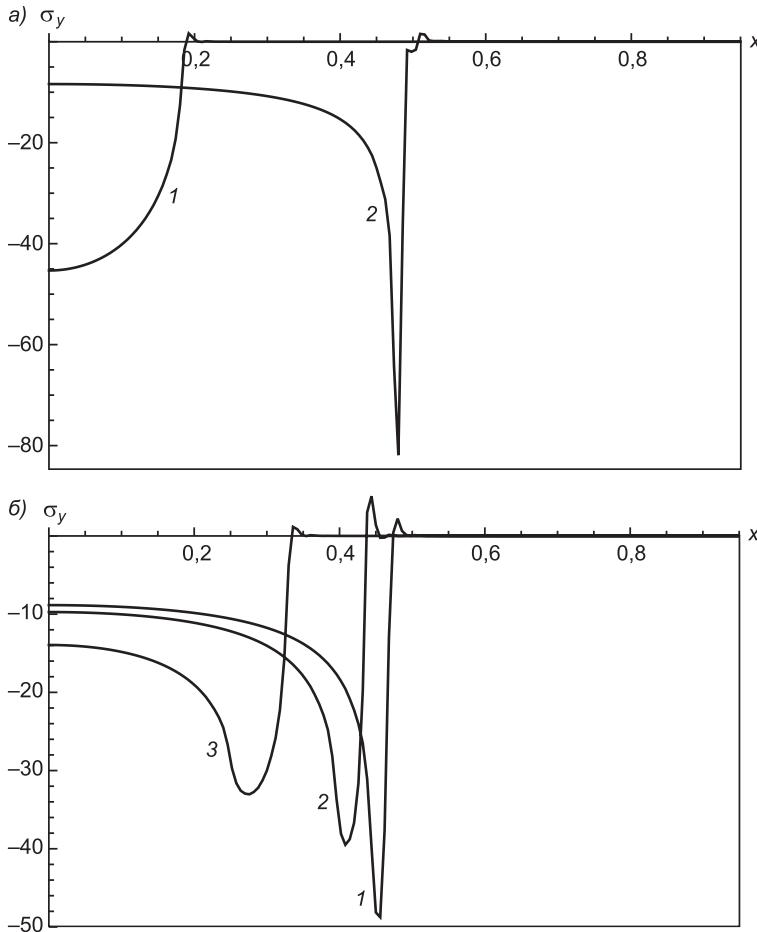


Рис. 6. Эпюры напряжений σ_y на нижней кромке балки в геометрически нелинейной задаче

1 — цилиндрическая опора, 2 — прямоугольная опора (а); б — опора с закруглением: 1 — $R = 48$ мм, 2 — $R = 96$ мм, 3 — $R = 240$ мм

го влияния на поле напряжений в окрестности угловой точки прямоугольной опоры.

Попробуем уменьшить пик напряжений за счет сглаживания угла прямоугольной опоры. Пусть балка опирается на прямоугольную опору с закруглением радиуса $R = 48, 96, 240$. Как показывают расчеты, во всех случаях концентрация напряжений наблюдается в окрестности точки примыкания прямолинейного участка опоры к криволинейному. Эпюры нормальных напряжений σ_y на нижней кромке балки над опорой представлены на рис. 6, б (кривая 1 — закругление $R = 48$ мм, кривая 2 — закругление $R = 96$ мм, кривая 3 — закругление $R = 240$ мм). Как видно из представленных результатов, закругление острого угла позволило уменьшить и размазать пик нормальных напряжений, однако полностью избавиться от концентрации напряжений не удалось.

При увеличении внешней нагрузки в два раза $q = 2$ МПа площадь контакта балки с закругленным участком опоры увеличивается. Концентрация напряжений по-прежнему наблюдается в окрестности точки при-

мыкания прямолинейного участка опоры к криволинейному. Как показывают результаты расчетов, увеличение площади контакта приводит к сглаживанию пика напряжений.

Выводы. 1. В работе [1] балка-стенка опирается на точечные опоры, что приводит к возникновению сосредоточенных реакций опор. Сосредоточенная сила приводит к бесконечным напряжениям в точке приложения, при которых должен разрушиться любой реальный материал. Поэтому при решении практических задач сосредоточенные силы необходимо заменять распределенными нагрузками.

2. В работах [2, 3] реакции опор моделируются постоянной распределенной нагрузкой в виде трапеции либо ступенчатой функцией. Ни то ни другое не соответствует реальным условиям крепления балки к опоре. Как показывают расчеты, контактные напряжения распределены неравномерно с максимумом в крайней точке опоры.

3. Проведенный анализ показал, что выбор типа закрепления балки-стенки в опорах оказывает слабое влияние на распределение напряжений в опасных сечениях балки. Уточнения решений [1], полученные в работах [2, 3], связаны в основном с аппроксимацией граничных условий на опорах. Метод конечных элементов даже на крупной сетке позволяет получить пригодное для практики поле напряжений, хорошо согласующееся с известными аналитическими решениями вне области контакта на расстояниях, больших ширины опоры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жемочкин, Б.Н. Теория упругости [Текст] / Б.Н. Жемочкин. — М. : Госстройиздат, 1957.
2. Адищев, В.В. Уточненное решение классической задачи расчета балки-стенки [Текст] / В.В. Адищев, Н.С. Астапов, В.В. Мальцев // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 6. — С. 97–104.
3. Шутов, В.А. К вопросу расчета балки-стенки [Текст] / В.А. Шутов, В.Е. Миренков, В.А. Полуэктов // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 2–3. — С. 116–120.
4. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю.Н. Работнов. — М. : Наука, 1988. — 712 с.

КУРГУЗОВ Владимир Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 16.06.14

Kurguzov Vladimir Dmitrievich, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

NUMERICAL MODELLING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE BEAM WALL

The analysis of the stress-strain state of the beam wall by a finite element method, considering exact conditions of beam fastening to support (rigid seal, the hinge, free support with possible slipping (a contact task)) is carried out. Stress diagrams in dangerous sections of a beam wall and displacement diagrams on border of computing area are received. Various options of

boundary conditions on support are investigated and their influence on deformation process is analysed. Comparison of received results with known approximate solutions is carried out.

Key words: beam wall, plane stress problem, finite element method, contact problem.

REFERENCES

1. Zhemochkin, B.N. Theory of elasticity [Text] / B.N. Zhemochkin. — M. : Gosstroyizdat, 1957.
 2. Adishchev, V.V. Solution refinement classical problem of calculating beam-wall [Text] / V.V. Adishchev, N.S. Astapov, V.V. Maltsev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 6. — P. 97–104.
 3. Shutov, V.A. On the analysis of a beam-wall [Text] / V.A. Shutov, V.E. Mirenkov, V.A. Poluektov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 2–3. — P. 116–120.
 4. Rabotnov, Yu.N. Mechanics of a deformable solid body [Text] / Yu.N. Rabotnov. — M. : Nauka, 1988. — 712 p.
-

УДК 693.54

Г.М. БАДЬИН, Б.С. МОСАКОВ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ВОЗВОДИМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассматривается всесторонняя оценка, существующая в современных условиях, качества возводимого сооружения, при формировании которого основным является организационно-технологический показатель.

Ключевые слова: качество строительной продукции, технологически организационные решения, виды и качество строительных процессов.

Основной результат в деятельности строительного комплекса — качество продукции, под которым подразумевают совокупность свойств, определяющих степень пригодности сооружения или его части для использования по назначению. Качество строительной продукции формируется на всех стадиях создания объекта. Оно характеризуется комплексом показателей, из которых, наряду с другими (художественно-эстетическим, социологическим, экономическим, правовым и пр.), важным является технологический, определяющий долговечность сооружения. Отсюда возникает проблема технологичности строительства и его оценка [1]. Под технологичностью строительства при этом следует подразумевать совокупность технических свойств объемно-конструктивных решений строительных объектов, определяющих оптимальные затраты при его изготовлении, строительстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества объекта.

Показателями технологичности строительства могут быть разнотипность, масса, разрезка и конфигурация конструкций, количественные и качественные показатели объемно-конструктивных решений зданий и сооружений. Эти показатели могут быть выражены через стоимость, материалоемкость, трудоемкость, продолжительность технологических процессов.

Качественные показатели технологичности (лучше, хуже, быстрее, удобнее и т.д.) определяются экспертными методами, основанными на определении количественной характеристики качества путем опроса экспертов-специалистов высокой квалификации и обработки их ответов с помощью современных математических методов и средств. Например, оценка комплексной технологичности проектов может быть выполнена по следующей схеме (рис. 1).

Показатели технологичности строительного объекта можно разделить на три группы: технологичность изготовления строительных материалов, деталей и конструкций; технологичность транспортирования; технологичность возведения объекта.

Основные из них представлены в табл. 1.

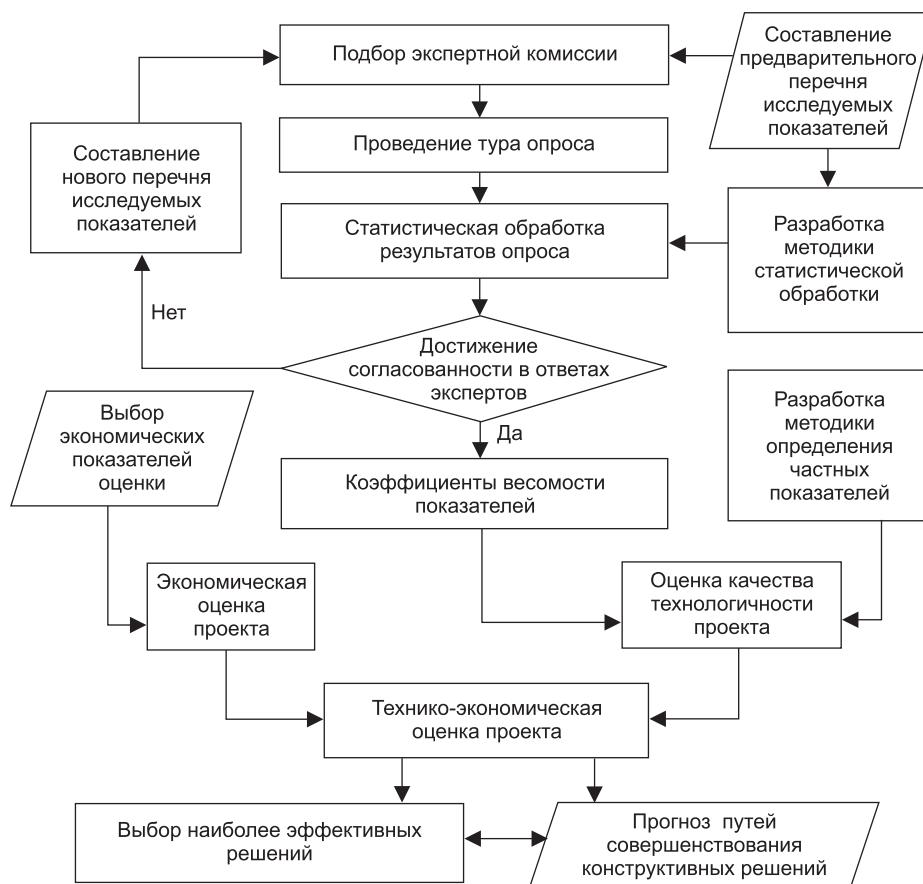


Рис. 1. Блок-схема оценки качества технологичности проектных решений

Таблица 1. Показатели технологичности сооружения

Наименование коэффициента	Расчетные формулы	Наименование показателей (значений) в форматах
Равномерность распределения материала в сооружении конструкции	$K_{р.к} = m_{ср}/m_{max} < 1$	$m_{ср}$ — средняя масса m_{max} — максимальная масса
Расчлененность на монтажные единицы	$K_p = n_y/n < 1$	n_y — кол-во сравниваемых монтажных единиц n — общее кол-во единиц
Укрупнение конструкций	$K_y = m_{сб}/n$	$m_{сб}$ — общая масса сборных элементов n — кол-во элементов
Блочность конструкций	$K_b = m_b/m_{сб} < 1$	m_b — масса конструкций, укрупненных в блоки $m_{сб}$ — общая масса
Заводская готовность	$T_{з.г} = T_з/(T_i + T_t + T_m)$	$T_з$ — трудоемкость изготовления в заводских условиях T_i — общая трудоемкость изготовления T_t — трудоемкость транспортирования T_m — трудоемкость монтажа
Технологичность монтажных стыков	$T_{м.с} = T_c / T_m$	T_c — трудоемкость устройства стыка

В свою очередь методы оценки качества СМР могут быть следующими:

1. Комплексная оценка качества выполнения работ в соответствии с СН 378–67 определяется как среднеарифметический показатель:

$$K_{\text{н}} = \frac{3 \cdot M_1 + 4 \cdot M_2 + 5 \cdot M_3}{M_1 + M_2 + M_3}, \quad (1)$$

где M_1, M_2, M_3 — количество видов работ, получивших оценки «удовлетворительно» (3), «хорошо» (4) и «отлично» (5) (с отклонениями в пределах максимальных, средних и минимальных допусков соответственно). Расценка стоимости работ также ставится в соответствии с количеством баллов.

2. Метод НИИСП Госстроя Украины оценивает работы по следующей балльной системе:

$$\Pi_o = \frac{\sum O_k \cdot K_3}{N} \pm \Pi_{\text{ест}}, \quad (2)$$

где O_k — показатель качества отдельных видов работ;

K_3 — коэффициент значимости видов работ;

N — общее количество видов работ;

$\Pi_{\text{ест}}$ — эстетический показатель.

В зависимости от численного значения показателя Π_o устанавливается оценка качества выполненных по объекту работ:

Отлично	$\Pi_o > 4,6$
Хорошо	$3,6 \leq \Pi_o \leq 4,6$
Удовлетворительно	$3,0 \leq \Pi_o < 3,6$
Плохо	$\Pi_o < 3,0$.

3. Показатель качества — соответствия нормам (СН 378–77):

$$K_{\text{нн}} = 1 - H_0 / H, \quad (3)$$

где H — общее количество контролируемых требований норм;

H_0 — количество нарушений требований норм.

4. Стоимостной метод предлагает оценивать качество СМР величиной

$$K_c = 1 - \frac{Z_d + \Delta Z_e}{C}, \quad (4)$$

где C — сметная стоимость СМР;

Z_d — затраты на ликвидацию допущенных дефектов;

ΔZ_e — увеличение эксплуатационных затрат, связанное с низким качеством.

5. Производственную весомость единичных показателей качества предлагается определять пропорционально затратам и потерям по устранению дефектов

$$D_i = P_i \cdot \tau_i / \sum_{i=1}^n P_i \cdot \tau_i, \quad (5)$$

где P_i — среднестатистическая частота образования дефектов i -го показателя;

τ_i — отраслевой норматив затрат на устранение i -го дефекта.

Затем вычисляется дефектность работ:

$$W_j = \sum_{i=1}^n P_{i,j} \cdot D_{i,j}, \quad (6)$$

где $j = 1, \dots, m$ — виды работ.

Описанный метод является усовершенствованием комплексного метода с коэффициентами весомости. Определяющим показателем является индекс качества:

$$I_j = 1 - W_j / W_j^{bp}, \quad (7)$$

где W_j^{bp} — браковочный уровень дефектности.

Статистический контроль качества СМР использует показатель точности технологических процессов

$$T_n = \delta_n / \sigma_{tex} \quad (8)$$

и показатель точности контроля

$$T_k = \delta_k / 2\delta_n, \quad (9)$$

где δ_n — нормативная предельная погрешность процесса СМР;

δ_k — предельная погрешность контрольных измерений;

σ_{tex} — стандартное отклонение технологического процесса.

Предлагается СМР оценивать удовлетворительно при $1 \leq T_n < 1,5$, хорошо при $1,5 \leq T_n \leq 2$ и отлично при $T_n > 2$.

Контроль качества по количественному признаку имеет ряд достоинств: дает больше информации, требует меньшего объема выборок, а при равном объеме выборки является более достоверным.

6. Единичные показатели качества по отдельным контролируемым параметрам оцениваются в виде коэффициента соответствия требованиям норм и проекта:

$$K_{ci} = (n - d) / n, \quad (10)$$

где n — общее количество наблюдений;

d — количество наблюдений, в которых обнаружено несоответствие.

Комплексный показатель качества по отдельным видам работ и далее по выполненным СМР вычисляется как среднее арифметическое:

$$K_{cp} = \Sigma K_{ci} / m, \quad (11)$$

где m — количество оцениваемых параметров для одного вида работ или видов СМР на объекте.

Свертка единичных показателей качества в комплексный показатель производится с учетом или без учета коэффициентов весомости. Естественно, что показатели, характеризующие конструктивную надежность, безопасность, экологичность, намного важнее, например, эстетических или эргономических показателей [2].

7. Нормативный метод (Руководство ВНИИС Р 454–81) — оценку каждого вида СМР определяют по показателю качества

$$P = 1 - \sum_{i=1}^m K_i / n \cdot m, \quad (12)$$

где m — число проверяемых единиц продукции, при которых не зафиксирован дефект;

n — число контролируемых параметров в единице продукции;

K_i — количество дефектов, выявленных в i -й единице продукции.

Показатель качества законченного строительством сооружения определяют как среднее арифметическое значение показателей качества, составляющих его конструктивных элементов с учетом оценок проекта, материалов, качества труда исполнителей.

Основными недостатками этой методики являются большая трудоемкость, особенно при оценке качества труда производственных отделов и ИТР, и необходимость контроля над контролерами для оценки качества их работы [3, 4].

8. Метод оценки бездефектного труда предусматривает расчет коэффициента качества труда

$$K_{\text{к.т}} = K_u - \sum_{i=1}^n K_{ci}, \quad K_{ci} = m_i \cdot Z_i, \quad (13)$$

где K_u — исходный коэффициент качества, принимаемый равным 1, 10 или 100;

K_{ci} — коэффициенты снижения, применяемые за несоблюдения i -го показателя качества труда;

Z_i — количество случаев невыполнения i -го задания;

m_i — норматив снижения за невыполнение i -го задания.

9. Экономический метод оценки качества — по формуле

$$K_s = 1 - \sum (F_i + Q_i T_i / T_{oi}) / \sum C_i, \quad (14)$$

где F_i — суммарные затраты на устранение нарушений нормативных требований;

Q_i — плановая прибыль;

T_i — расчетные затраты труда на устранение дефектов;

T_{oi} — нормативные затраты труда на возведение i -го участка объекта;

C_i — отпускная цена строительной продукции.

10. Методика комплексной оценки качества СМР (С.Г. Головнев и А.Х. Байбурин [2–4]).

Для экспертной системы принятия решения о качестве предлагается дерево оценки, отвечающее разработанной методике комплексной оценки качества (рис. 2).

В современной строительной практике наиболее значимыми являются показатели p_2 , D и r_2 (табл. 2). Другие определяются по известным методикам [1, 5–7].

Анализ причин дефектов и аварий в строительстве показал, что на долю критических дефектов, допущенных в процессе выполнения строи-



Рис. 2. Дерево оценки

тельно-монтажных работ, приходится примерно 50–60 % аварий. Уровень бездефектности процессов СМР один из самых низких среди других отраслей в РФ. Стратегия экспертной оценки СМР [5, 6] приведена на рис. 3.

В качестве примера может быть использована оценка применения наружных вентиляционных фасадов в пяти видах технологичности строительства объекта.

1. Технологичность изготовления элементов — характеристика подсистемы изготовления конструкций, отвечающая девяти критериям: разнотипность, общее количество элементов, материалоемкость, трудоемкость, деформации и напряжения, механизация технологических процессов, точность геометрических форм, крупность элементов, сборка и возможность демонтажа.

2. Транспортная технологичность — характеристика подсистемы транспортирования изделий, отвечающая таким критериям, как разнотипность, разновесность, стоимость транспорта, укрупнение отправочных элементов, загрузка подвижного состава транспортного средства, механизация погрузки и разгрузки.

3. Технологичность монтажных работ — характеристика подсистемы монтажа конструкций, отвечающая таким критериям, как трудозатраты,

Комплексная оценка технологичности возводимых зданий и сооружений

Таблица 2

<i>Точность технологических процессов p_2</i>		
Переменная	Характеристика	Показатель точности процессов
p_{21}	Разброс значений параметров строительно-монтажных работ. Корректность расчетов нормальная	Более 1,00
p_{22}	Рассеивание значений параметров строительно-монтажных работ и возведенных конструкций существенное. Точность удовлетворительная	От 0,67 до 1,00
p_{23}	Разброс значений параметров строительно-монтажных работ. Точность неудовлетворительная	Менее 0,67

<i>Оценка значимости дефектов D</i>		
Переменная	Характеристика	Индекс критичности дефектов
d_1	Допущены малозначительные дефекты, не влияющие на прочность, устойчивость, безопасность конструкций	Не более 40
d_2	Допущены значительные дефекты, снижающие эксплуатационные характеристики конструкций	Св. 40 до 100
d_3	Допущены критические дефекты, приводящие к функциональной непригодности конструкций	100 и более

<i>Уровень безопасности конструкций r_2</i>		
Переменная	Характеристика	Коэффициент снижения безопасности
r_{21}	Снижение уровня безопасности незначительное	Более 0,998
r_{22}	Снижение уровня безопасности существенное	От 0,994 до 0,998
r_{23}	Снижение уровня безопасности существенно влияет на риск аварии конструкций	Менее 0,994

выполнение мокрых процессов, деформации и напряжения, механизация процессов, скорость выполнения работ, однородность ячеек здания, однородность участков захваток и ярусов, однородность конструктивных элементов, удобство сборки сварки, учет допусков.

4. Эксплуатационная технологичность — характеристика в подсистеме эксплуатации с учетом требований удобства обслуживания, затрат по эксплуатации, экономии энергоресурсов и автоматизации, трудоемкости и минимизации затрат на отопление.

5. Технологичность модернизации и реконструкции — характеристика подсистемы с учетом показателей: улучшение технических свойств жилого дома, дальнейшее повышение теплозащиты стен при принятии новых норм, замена устаревшей конструкции на новые виды, объемно-планировочные изменения, применение инновационных технологий, новых механизмов и оборудования, соответствие современным требованиям безопасности и комфорта проживания людей.

Анализ литературных источников позволил выделить следующие группы свойств, которые находят отражение в показателях качества строительства:

- социальные, функциональные свойства, надежность, эстетические и региональные свойства местных условий строительства;



Рис. 3. Схема взаимосвязи факторов, влияющих на технологичность процесса применения поризованного бетона в малоэтажном строительстве

- долговечность, удобство эксплуатации, технологичность;
- ремонтопригодность, экологичность, экономические свойства.

Вывод. Комплексная оценка технологичности строительных решений может быть осуществлена только с учетом реальных факторов количественной и качественной оценки проектных, конструктивных, организационно-технологических, социально-экономических аспектов при реализации проектов строительной деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М осаков, Б.С. Технология возведения зданий и сооружений [Текст] / Б.С. М осаков, В.Л. Курбатов. — М. : Высшая школа, 2004. — 350 с.
2. Б айбури н, А.Х. Комплексная оценка качества возведения гражданских зданий с учетом факторов, влияющих на их безопасность [Текст]: автореф. ... докт. дис. / А.Х. Байбурин. — СПб. : СПбГАСУ, 2012. — 46 с.
3. К узнецова, Е.В. Модели и методы оценки технологичности объектов строительства [Текст]: автореф. ... канд. дис. / Е.В. Кузнецова. — СПб. : СПбГАСУ, 2000. — 26 с.
4. Справочник строителя [Текст]. — М. : АСВ, 2012. — 416 с.
5. Б адын, Г.М. Справочник технолога-строителя [Текст] / Г.М. Бадын. — СПб. : БХВ-Петербург, 2010. — 528 с.
6. М осаков, Б.С. Основы технологии монолитного строительства [Текст] / Б.С. М осаков. — Новосибирск : СГУПС, 2003. — 258 с.
7. М осаков, Б.С. Основы приготовления цементобетонных смесей и пути экономии цемента [Текст] / Б.С. М осаков. — М. : АСВ, 2009. — 387 с.

БАДЬИН Геннадий Михайлович, д-р техн. наук, проф.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

МОСАКОВ Борис Степанович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 22.06.14

Bad'in Gennadiy Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Mosakov Boris Stepanovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

INTEGRATED ASSESSMENT OF VERSATILITY WITH REGARDS TO BUILDING STRUCTURES

This article presents current integrated assessment, qualities of building structure with managerial technological index as key generated indicator.

Key words: quality of building structures, technological managerial solutions, types and quality of construction processes.

REFERENCES

1. Mosakov, B.S. Building production technology [Text] / B.S. Mosakov, V.L. Kyrbatov. — M. : Vysshaja shkola, 2004. — 350 p.
2. Baibyrin, A.Kh. Integrated assessment of civic building structures' quality with regards to its hazard resistance [Text]: author's abstract to PhD thesis / A.Kh. Baibyrin. — SPb. : SPSUACE, 2012. — 46 p.
3. Kyznetsova, E.V. Models and assessment procedures of versatility, buildings and structures [Text]: author's abstract to Master's thesis / E.V. Kyznetsova. — SPb. : SPSUACE, 2000. — 26 p.
4. Construction reference guide [Text]. — M. : ASV, 2012. — 416 p.
5. Bad'in, G.M. Constructability manager reference guide [Text] / G.M. Bad'in. — SPb. : BKHV-Petersburg, 2010. — 528 p.
6. Mosakov, B.S. Manufacturing science of monolithic construction [Text] / B.S. Mosakov. — Novosibirsk : STU, 2003. — 258 p.
7. Mosakov, B.S. Basics of cement concrete mixtures manufacture and cement economical saving methods [Text] / B.S. Mosakov. — M. : ASV, 2009. — 387 p.

ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

УДК 624.154

А.Е. САРГСЯН, А.С. ГРИШИН

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ СООРУЖЕНИЯ РО БАЛАКОВСКОЙ АЭС

В работе на примере сооружения реакторного отделения РО Балаковской АЭС блока 1 продемонстрирована целесообразность применения свайных фундаментов для повышения устойчивости и несущей способности оснований сооружений АС.

Сопоставление результатов расчетов вертикальных перемещений фундаментной конструкции сооружения РО-1 Балаковской АЭС на естественном и свайном основаниях показывает, что при реализации рассматриваемой схемы свайного фундамента осадка сооружения уменьшается более чем на порядок.

Ключевые слова: объемная расчетная модель, свайный фундамент, ростверк, сваи, геологическое строение.

Цель настоящей работы: по результатам натурных наблюдений обосновать достоверность разработанной модели свайного фундамента [1–4], а также продемонстрировать целесообразность применения свайных фундаментов для повышения устойчивости и несущей способности оснований сооружений АС на примере сооружения реакторного отделения (РО) Балаковской АЭС блока 1.

Схема расположения сооружения РО блока 1 Балаковской АЭС в геологической структуре естественного основания представлена на рис. 1.

С ноября 1987 г. на площадке размещения блока 1 ведутся регулярные наблюдения за кренами и осадками основных зданий и сооружений.

Возвведение РО блока 1 было начато в 1972 г. Наблюдения за осадками начаты в марте 1981 г. по 15 стенным осадочным маркам. В процессе эксплуатации марки уничтожались и восстанавливались. На начало 2009 г. существовали все осадочные марки. Средняя осадка сооружения носит стабильный во времени характер. Вертикальные смещения осадочных марок неравномерны по распространению. В период наблюдения максимальная суммарная осадка составляет минус 449,5 мм, минимальная — минус 386,0 мм. График средних суммарных вертикальных смещений реакторного отделения блока 1 представлен на рис. 2 [5]. Результаты натурных наблюдений наглядно показывают, что средняя осадка сооружения РО-1 превышает допустимую величину в соответствии с требованиями [4].

© Саргсян А.Е., Гришин А.С., 2014

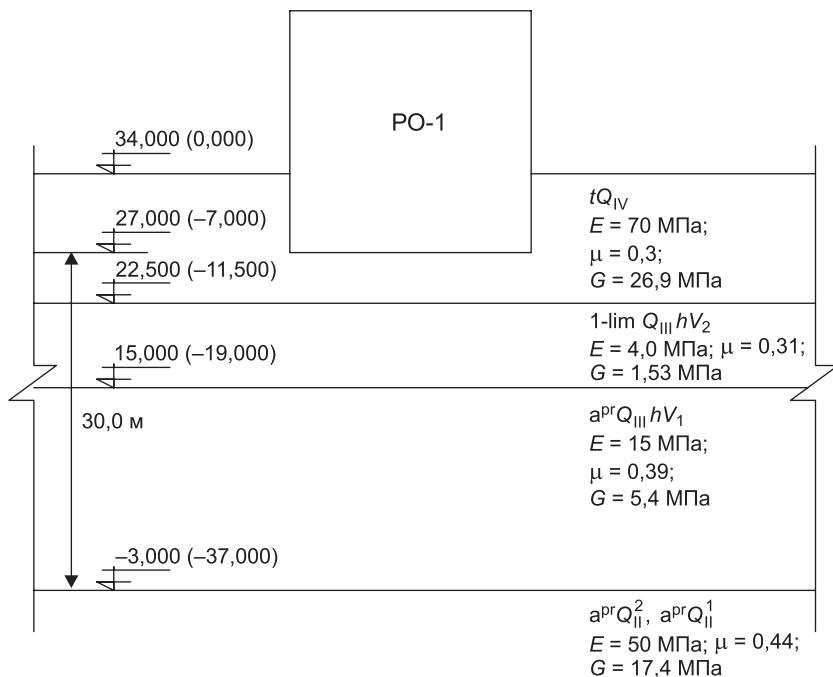


Рис. 1. Схема заглубления сооружения РО-1 в геологической структуре естественного основания

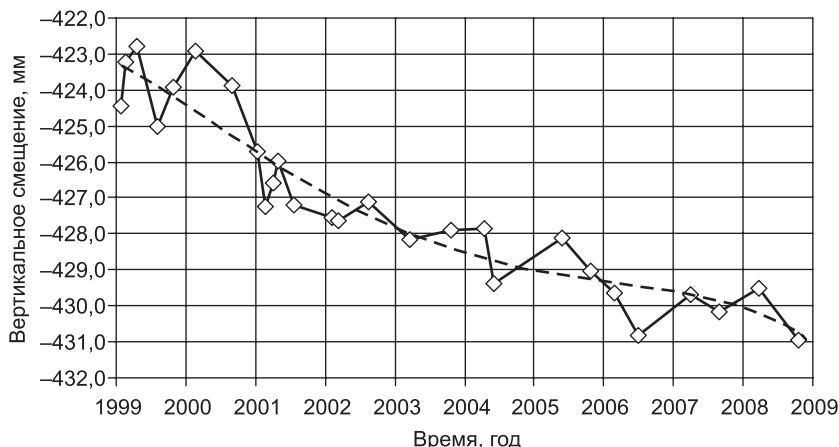


Рис. 2. График средних суммарных вертикальных смещений реакторного отделения РО блока 1

Расчетные параметры интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности подошвы ростверка определяются по выражениям, представленным в табл. 1 [1–4].

В табл. 1 введены следующие обозначения:

— μ — осредненное значение коэффициента Пуассона грунтов в активной зоне основания ростверка;

— $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$ — осредненное значение модуля сдвига грунтов в активной зоне основания ростверка;

Таблица 1. Выражения для определения эквивалентных интегральных статических жесткостей основания при перемещении ростверка прямоугольной формы в плане

Вид перемещения	Интегральная жесткость
Горизонтальное, по оси x	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$
Горизонтальное, по оси y	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$
Вертикальное, по оси z	$k_z = \frac{4G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)}$

— $A = L_x L_y$ — площадь подошвы ростверка прямоугольной формы в плане;

— $L_x, L_y (L_x \geq L_y)$ — длина и ширина ростверка (фундаментной плиты) в плане соответственно по координатным осям x и y .

Расчетные приведенные статические характеристики грунтов в активной зоне естественного основания:

— модуль деформации

$$E = \frac{\sum E_i h_i}{H_a} = \frac{70 \cdot 4,5 + 9 \cdot 7,5 + 15 \cdot 18 + 50 \cdot 40}{70} = 38 \text{ МПа};$$

— коэффициент Пуассона

$$\mu = \frac{\sum \mu_i h_i}{H_a} = \frac{0,3 \cdot 4,5 + 0,31 \cdot 7,5 + 0,39 \cdot 18 + 0,44 \cdot 40}{70} = 0,4;$$

— модуль сдвига

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = 13,57 \text{ МПа.}$$

Интегральные статические жесткости естественного основания на подошве фундаментной конструкции принимают значения [1, 2]:

$$k_x = k_y = \frac{31,1 \cdot (1-\mu) G \sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)} = 2,58 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$k_z = \frac{4G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)} = 3,64 \cdot 10^6 \text{ кН/м.}$$

Общий вид конечно-элементной модели сооружения РО блока 1 Балаковской АЭС (*a*) и с вырезом четверти (*b*) представлен на рис. 3.

В пространственной конечно-элементной модели системы сооружения РО с основанием использовались следующие типы конечных элементов:

— четырехузловые оболочечные элементы для моделирования плоских элементов (стен, перекрытий и диафрагм);

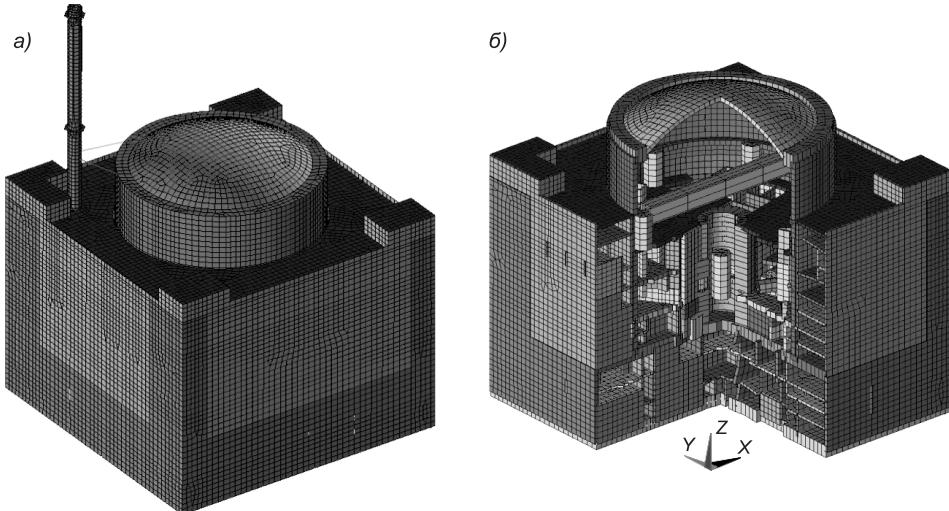


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели сооружения РО блока 1 (а) и с вырезом четверти (б)

- пространственные стержни (стойки и ригели);
- жесткие балки (для обеспечения передачи нагрузки с эксцентрикитетом);
- массивные элементы для моделирования нагрузок от оборудования, которые могут быть рассмотрены как сосредоточенные. Разработка модели системы сооружение — основание была реализована с применением вычислительного комплекса ANSYS.

Общее количество узлов в расчетной модели — 68 720, конечных элементов — 76 976.

Порядок системы линейных алгебраических уравнений — 358 512.

Общий вес сооружения РО с учетом веса технологического оборудования составляет $Q = 26,8 \cdot 10^5$ кН.

Масса сооружения РО — $M = 2,74 \cdot 10^5$ кН·с²/м.

Размеры фундаментной плиты сооружения на плане равны: $L_x = L_y = 67$ м.

Все соединения между элементами, моделирующими конструкции из монолитного железобетона, приняты жесткими.

Расчетные параметры интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной боковой поверхности и на подошве свай определяются по выражениям, представленным в табл. 2.

При формировании результирующей реакции грунтовой среды на контактной поверхности свай исходили из следующих предположений:

- на стенках боковой поверхности сваи при формировании растягивающих напряжений на контактной поверхности нарушается условие полного прилипания исходя из предположения, что грунт на растяжение не работает;

- при вертикальном перемещении вдоль продольной оси свай по контуру всей боковой поверхности сваи грунты испытывают чистый сдвиг, а на подошве сваи сжатие;

Таблица 2. Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения свай

Направление перемещения свай	Интегральная жесткость грунтовой среды	
	на боковой поверхности свай	на подошве свай
Горизонтальное, по оси x	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_{1x}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{A_{2x}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)R_s}$	$k_x = \frac{31,1(1-\mu_{sL})G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_{sL})R_s}$
Горизонтальное, по оси y	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_{1y}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{A_{2y}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)R_s}$	$k_y = \frac{31,1(1-\mu_{sL})G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_{sL})R_s}$
Вертикальное, по оси z	$k_z = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_z}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s}$	$k_z = \frac{4G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_{sL})R_s}$

— при перемещении свай с прямоугольным поперечным сечением в горизонтальном направлении в грунтовой среде в двух противоположных боковых поверхностях происходит сдвиг грунтов. В передней стенке боковой поверхности по направлению перемещения свай происходит сжатие, а на противоположной стенке — отрыв грунта от поверхности стенки свай;

— при перемещении свай в горизонтальном направлении на подошве свай грунты испытывают чистый сдвиг.

Эпюры контактных напряжений на боковой поверхности свай с круглым поперечным сечением при перемещении по направлениям координатных осей x , y , z представлены на рис. 4 [1, 3].

В табл. 2 введены следующие обозначения в зависимости от геометрической формы поперечных сечений свай:

— A_{1x} — площадь контактной боковой поверхности свай с грунтовой средой, испытывающей сдвиг при перемещении свай по направлению оси x ;

— A_{2x} — площадь контактной боковой поверхности свай с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении свай по направлению оси x ;

— A_{1y} — площадь контактной боковой поверхности свай с грунтовой средой, испытывающей сдвиг при перемещении свай по направлению оси y ;

— A_{2y} — площадь контактной боковой поверхности свай с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении свай по направлению оси y ;

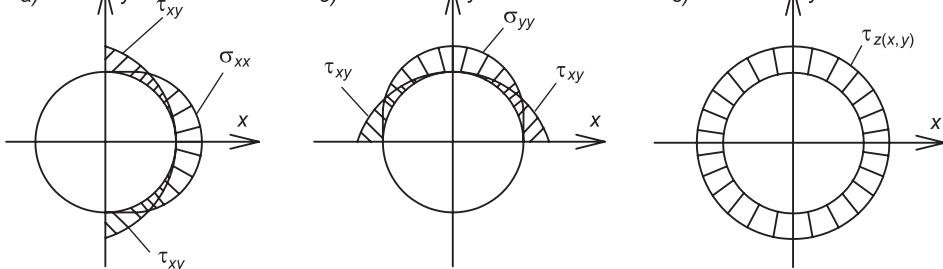


Рис. 4. Характер распределения контактных напряжений на боковой поверхности свай с круглым поперечным сечением при перемещении в грунтовой среде по направлениям координатных осей

а — по оси x ; б — по оси y ; в — по оси z

- A_{2y} — площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении сваи по направлению оси y ;
- A_z — площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой или площадь боковой поверхности сваи, испытывающей сдвиг при перемещении сваи в вертикальном направлении;
- A_L — площадь подошвы сваи.

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности сваи с круглым поперечным сечением обобщены в табл. 3.

Таблица 3. Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения сваи с круглым поперечным сечением

Направление перемещения сваи	Интегральная жесткость грунтовой среды	
	на боковой поверхности сваи	на подошве сваи
По горизонтальной оси x, y	$k_x = k_y = \frac{31,1(1 - \mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(7 - 8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(1 - \mu_s)R_s}$	$k_x = k_y = \frac{31,1(1 - \mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(7 - 8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(1 - \mu_s)R_s}$
По вертикальной оси z	$k_z = \frac{31,1(1 - \mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{(7 - 8\mu)R_s}$	$k_z = \frac{31,1(1 - \mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{(7 - 8\mu)R_s}$

Схема расположения свайного поля на плане показана на рис. 5.

Схема расположения сооружения со свайным фундаментом в геологической структуре основания сооружения РО блока 1 Балаковской АЭС представлена на рис. 6.

Диаметр свай с круглым поперечным сечением принят равным $d = 0,6$ м, а длина свай $h_c = 18,0$ м.

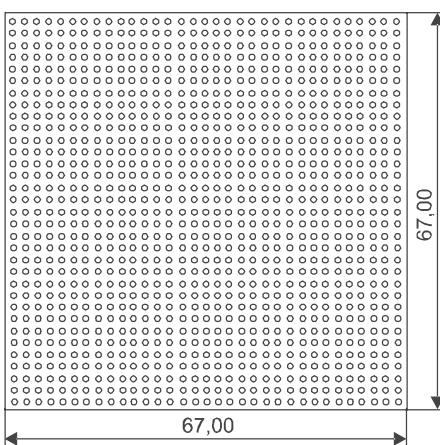


Рис. 5. Схема расположения свайного куста на плане

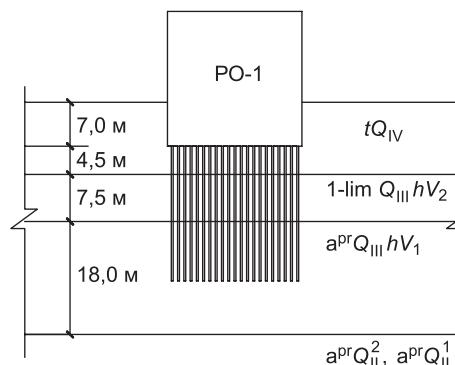


Рис. 6. Схема расположения РО блока 1 со свайным фундаментом в геологической структуре основания

С учетом требований СП 50-102-2003 [3] расстояние между осями забивных висячих свай принято равным $\Delta_{x,y} = 2,0$ м $\geq 3d = 1,8$ м, а расстояние от осей свай до края фундаментной плиты (ростверка) сооружения равно $\delta_{x,y} = 0,5$ м $= 0,5d + 0,2$ м.

При этом общее число свай в свайном кусте составляет 1089 штук.

В табл. 3 введены следующие дополнительные обозначения:

$$— G_s = \frac{\sum_{i=1}^n G_{s,i} h_i}{h_c} = 9,16 \text{ МПа}, \mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i h_i}{h_c} = 0,33 — \text{ приведенный}$$

статический модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов основания по высоте зоны расположения свайного поля соответственно;

— $G_{sL} = 5,4$ МПа, $\mu_{sL} = 0,39$ — модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов на уровне подошвы свай;

— $R_s = 4,2$ — корректирующий коэффициент, учитывающий эффекты взаимодействия свай в составе свайного куста [4, 6].

Расчетные значения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности свай с круглым поперечным сечением обобщены в табл. 4.

Расчетные значения интегральных статических жесткостей основания РО-1 от эффекта взаимодействия свайного куста с грунтовой средой представлены в табл. 5.

Таблица 4. Расчетные значения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения свай с круглым поперечным сечением

Направление перемещения свай	Интегральная жесткость грунтовой среды, 10^4 кН/м	
	на боковой поверхности свай	на подошве свай
По горизонтальной оси x, y	$k_x = k_y = 4,35$	$k_x = k_y = 0,33$
По вертикальной оси z	$k_z = 3,43$	$k_z = 0,23$

Таблица 5. Расчетные значения интегральных статических жесткостей основания РО-1 от эффекта взаимодействия свайного куста с грунтовой средой

Направление перемещения свайного куста	Интегральная жесткость грунтовой среды, 10^7 кН/м
По горизонтальной оси x, y	$k_x = k_y = 5,10$
По вертикальной оси z	$k_z = 3,40$

Суммарные интегральные статических жесткостей основания РО-1 с учетом эффектов взаимодействия ростверка и свайного куста с грунтовой средой принимают следующие значения:

$$k_x = k_y = (0,258 + 5,1) \cdot 10^7 \text{ кН/м} = 5,358 \cdot 10^7 \text{ кН/м};$$

$$k_z = (0,364 + 3,4) \cdot 10^7 \text{ кН/м} = 3,764 \cdot 10^7 \text{ кН/м}.$$

Таблица 6. Численные значения интегральных жесткостей основания сооружения РО Балаковской АЭС блока 1 на естественном основании и в случае применения свайного фундамента

Интегральные жесткости основания, 10^7 кН/м			
естественное основание		свайное основание	
$k_x = k_y$	k_z	$k_x = k_y$	k_z
0,258	0,364	5,358	3,764

Интегральные жесткости основания сооружения РО Балаковской АЭС блока 1 на естественном основании и в случае применения свайного фундамента обобщены и представлены в табл. 6. Судя по результатам, жесткость основания сооружения при реализации рассматриваемого варианта свайного фундамента более чем на порядок превышает жесткость естественного основания сооружения.

Изолинии вертикальных перемещений фундаментной плиты РО-1 для естественного и свайного оснований при нормальных условиях эксплуатации представлены на рис. 7, 8.

Расчетные значения осадок (рис. 7) в среднем примерно в 1,9 раза превышают величины осадок, полученных по результатам наблюдений (рис. 2). Данное обстоятельство согласуется с аналогичными результатами, представленными в [5]. Расхождение между данными натурных наблюдений и результатами расчетов обусловлено тем, что вычисленные осадки основания сооружения соответствуют всему периоду эксплуатации, включая период возведения сооружения, а результаты наблюдения относятся только к периоду эксплуатации, т.е. с 1985 г.

Сопоставление результатов расчетов вертикальных перемещений фундаментной конструкции сооружения РО-1 Балаковской АЭС на естественном основании (рис. 7) и на свайном (рис. 8) показывает, что при реализации рассматриваемой схемы свайного фундамента величина осадки сооружения уменьшается более чем на порядок. Данное

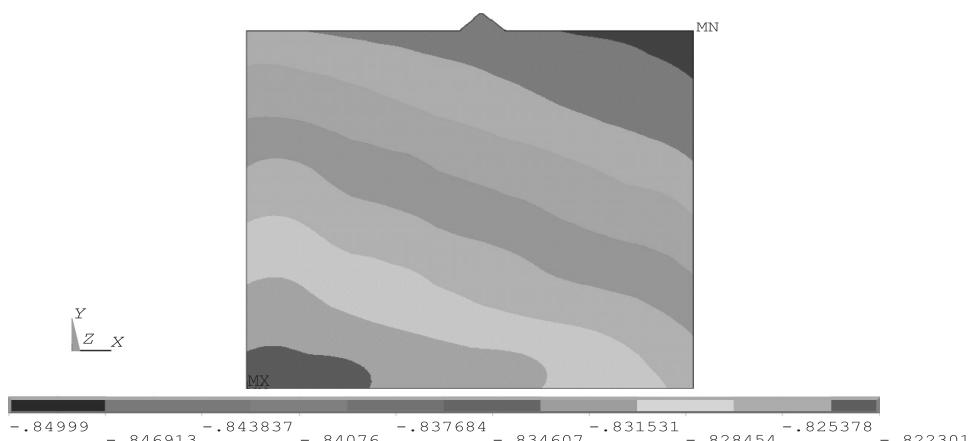


Рис. 7. Изолинии вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты РО-1 для естественного основания при нормальных условиях эксплуатации

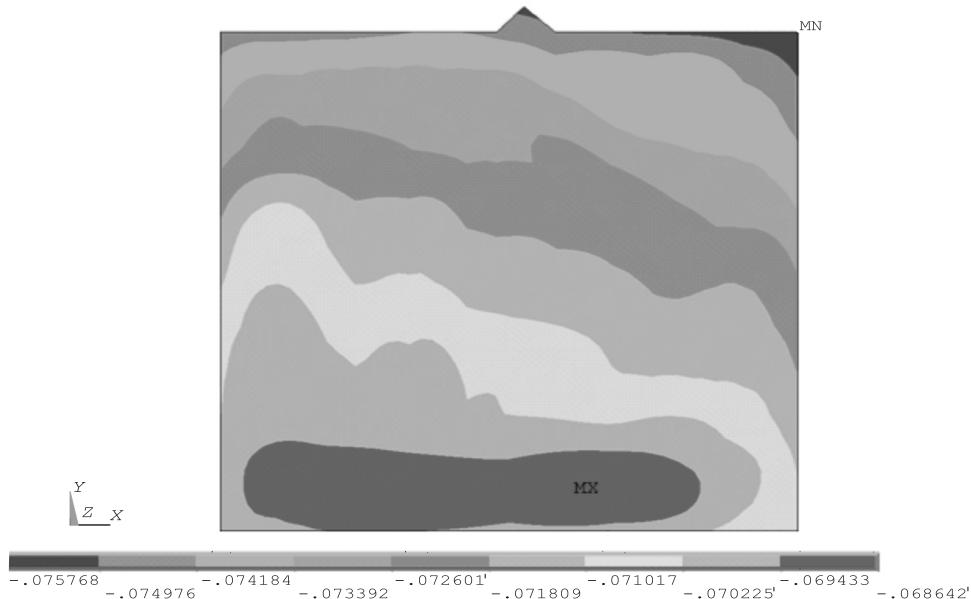


Рис. 8. Изолинии вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты РО-1 для свайного основания при нормальных условиях эксплуатации

обстоятельство подтверждает высокую эффективность реализации свайных фундаментов для возведения массивных сооружений на слабых грунтах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саргсян, А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций [Текст] / А.Е. Саргсян. — М.; Саров : РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2013. — 550 с.
2. Саргсян, А.Е. Разработка и обоснование механической и математической модели основания сооружений атомных станций в виде однородного инерционного полупространства. Исследования по теории сооружений [Текст] / А.Е. Саргсян, Е.Г. Гукова, А.С. Гришин // Вестн. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. — М., 2009. — № 1.
3. Саргсян, А.Е. Разработка статической и динамической модели свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой [Текст] / А.Е. Саргсян, В.С. Геращенко // Вестн. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. — М., 2010. — № 2.
4. МР 1.5.2.05.999.0026—2011. Нормы проектирования оснований сооружений атомных станций [Текст]. — М., 2011.
5. Глаговский, В.Б. Анализ осадок и кренов фундаментов реакторных отделений Балаковской АЭС. Основания, фундаменты и механика грунтов [Текст] / В.Б. Глаговский, А.Г. Зализский, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова, О.М. Финагенов. — М., 2005. — № 4. — С. 17–22.
6. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов [Текст]. — М., 2004.

*САРГСЯН Акоп Егишович, д-р техн. наук, проф., академик МАИ при ООН
ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва
ГРИШИН Андрей Сергеевич, канд. техн. наук
ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва*

Получено 19.06.14

Sargsyan Akop Egishovich, doctor of technical sciences, professor, Academician of IIAUN, JSC «Atomenergoprojekt», Moscow, Russia

Grishin Andrey Sergeevich, candidate of technical sciences, JSC «Atomenergoprojekt», Moscow, Russia

EFFICIENCY ESTIMATION OF PILE FOUNDATION BY THE EXAMPLE OF THE REACTOR BUILDING OF THE BALAKOVO NUCLEAR POWER PLANT

By the example of the reactor building it is demonstrated the appropriateness of pile foundation for the improvement of stability and bearing capacity of the structure foundation. In the article the authors examine two designs of the reactor building foundation, namely mat foundation with and without piles. By comparing the results of calculations it is shown that the settlement is around ten times less for the pile foundation.

Key words: spatial design model, pile foundation, soil, piles, settlement, geological structure of base.

REFERENCES

1. Sargsyan, A.E. Dynamic and Seismic Stability of the NPP Structures [Text] / A.E. Sargsyan. — M.; Sarov : RFNC-VNIIEF, 2013. — 550 p.
2. Sargsyan, A.E. Generation and proof for dynamic mechanical model of NPP structures foundation in the form of uniform inertial soil halfspace. The Investigations for Structural Analysis [Text] / A.E. Sargsyan, E.G. Gukova, A.S. Grishin // V.A. Kucherenko Institute Herald. — M., 2009. — N 1.
3. Sargsyan, A.E. Development of Static and Dynamic model of Pile Foundation Taking into Account the Effect of Soil-Structure Interaction. The Investigations for Structural Analysis [Text] / A.E. Sargsyan, V.S. Gerashchenko // V.A. Kucherenko Institute Herald. — M., 2010. — N 2.
4. MR 1.5.2.05.999.0026–2011. Standard of Design for NPP Structures Foundations [Text]. — M., 2011.
5. Glagovskiy, V.B. Settlement and Tilt Analysis of Reactor Buildings of the Balakovo Nuclear Power Plant. Structure Base, Foundation and Soil Mechanics [Text] / V.B. Glagovskiy, A.G. Zalizskiy, A.A. Kagan, N.F. Krivonogova, O.M. Finagenov. — M., 2005. — N 4. — P. 17–22.
6. Set of Rules 50-102–2003. Structural Design and Arrangement of Pile Foundations [Text]. — M., 2004.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ ТЕХНИЧЕСКИМ ГИПОХЛОРИТОМ НАТРИЯ

В НГАСУ (Сибстрин) разработана технология обеззараживания воды техническим гипохлоритом натрия (взамен жидкого хлора, который представляет опасность для обслуживающего персонала и населения, проживающего вблизи водоочистных станций: он токсичен и взрывоопасен).

Данная технология обеспечивает безопасность производства, повышает качество питьевой воды, сокращает эксплуатационные расходы на водоподготовительных сооружениях и в сетях.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРЕДЛОЖЕНИЯ:

- увеличивается срок службы водопроводных труб, благодаря снижению коррозии;
- снижается содержание галогенорганических соединений в очищенной воде;
- нормативные показатели воды, подготовленной по этой технологии, отвечают санитарным требованиям.

Использовать данную технологию могут практически все объекты водоснабжения и водоотведения как коммунальных, так и промышленных предприятий.



На рисунке показан общий вид установки, работающей по новой технологии.

Внедрение проекта осуществлено более чем на 10 объектах коммунального хозяйства Кемеровской области: г. Кемерово (п. Кедровка), г. Яшкино, г. Зеленогорский, п. Промышленная и др. и на водоподготовительных сооружениях СО РАН.

Разработчики: Сколубович Ю.Л., д. т. н., проф.;
Войтов Е.Л., д. т. н., доц.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).

E-mail: ntio@sibstrin.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел./факс: (383) 266-28-89

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
 - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов;

— название статьи на английском языке;

— аннотация на английском языке;

— ключевые слова на английском языке;

— библиографический список на английском языке.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстраций, в том числе фотографий, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2014 г. — из расчета 800 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2014 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции

Теория инженерных сооружений

Строительные материалы и изделия

Экономика и организация строительства

Автоматизация и технология строительного производства

Гидротехническое строительство

Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов

Строительные и дорожные машины

Научные проблемы архитектуры и экологии

Научно-методический

В лабораториях вузов

Внедрение научных достижений в производство

Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2700 р.

Цена отдельного номера — 450 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО
№ 7 (667) 2014

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*