



Научно-технический журнал
Издается с 2003 года.
Выходит шесть раз в год.

№2 (58) 2015
(март-апрель)

СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Редакционный совет:

Голенков В.А. д.т.н., проф., председатель
Радченко С.Ю. д.т.н., проф.,
зам. председателя
Борзенков М.И. к.т.н., доц., секретарь
Астафичев П.А. д.ю.н., проф.
Иванова Т.Н. д.т.н., проф.
Киричек А.В. д.т.н., проф.
Колчунов В.И. д.т.н., проф.
Константинов И.С. д.т.н., проф.
Новиков А.Н. д.т.н., проф.
Попова Л.В. д.э.н., проф.
Степанов Ю.С. д.т.н., проф.

Главный редактор:

Колчунов В.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.

Заместители главного редактора:

Данилевич Д.В. к.т.н., доц.
Колесникова Т.Н. д. арх., проф.
Коробко В.И. д.т.н., проф.

Редколлегия:

Бок Т. д.т.н., проф. (Германия)
Бондаренко В.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Гордон В.А. д.т.н., проф.
Емельянов С.Г. советник РААСН, д.т.н., проф.
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Клюева Н.В. советник РААСН, д.т.н., проф.
Коробко А.В. д.т.н., проф.
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.
Римшин В.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.
Сергейчук О.В. д.т.н., проф. (Украина)
Серник И.Н. д.т.н., проф.
Сикора З. д.т.н., проф. (Польша)
Тамразян А.Г. д.т.н., проф.
Тур В.В. д.т.н., проф. (Белоруссия)
Турков А.В. д.т.н., проф.
Федоров В.С. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Чернышов Е.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Шах Р. д.т.н., проф. (Германия)

Ответственный за выпуск:

Солопов С.В. к.т.н.

Адрес редакции:

302006, Россия, г. Орел,
ул. Московская, 77
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
www.gu-unpk.ru
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство:
ПИ № ФС77-47354 от 03 ноября 2011 г.

Подписной индекс **86294** по объединенному
каталогу «Пресса России»

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2015

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Бандурин Н.Г., Калашиков С.Ю.** Численный метод и программа для определения критического состояния упругого стержня переменной жесткости в общем случае закрепления его концов..... 4
- Игнатъев В.А., Игнатъев А.В.** Расчет плоских рам с большим перемещением узлов по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода..... 12
- Назаров Ю.П., Позняк Е.В.** Моделирование процесса распространения волн Рэлея в пространстве по заданной акселерограмме..... 20
- Сабодаш О.А.** Сравнительный анализ глобальных ледовых нагрузок на конструкции инженерных сооружений Сахалинского шельфа..... 27
- Соколов Б.С., Радайкин О.В.** К определению кривизны бетонных и железобетонных элементов вдоль пролёта с учетом совместного действия изгибающих моментов и перерезывающих сил..... 38
- Тур В.И., Тур А.В.** Изменение напряженно-деформированного состояния сетчатого купола при исключении из работы одного узлового соединения..... 42
- Турков А.В., Макаров А.А., Волобуева Е.С.** Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на треугольном плане в зависимости от схемы опирания. 46

Безопасность зданий и сооружений

- Белостоцкий А.М., Павлов А.С.** Численное моделирование процессов деформирования конструкций, подверженных аварийным воздействиям... 51
- Ерёмин К.И., Алексеева Е.Л.** Моделирование прогрессирующего обрушения зданий и сооружений на основе статистического анализа накопленной повреждаемости..... 57
- Меркулов С.И.** К вопросу обеспечения живучести железобетонных конструкций и конструктивных систем..... 63

Архитектура и градостроительство

- Булгаков А.Г., Бузало Н.С., Ермаченко П.А.** Параметрическая оптимизация фотобиологических архитектурных оболочек в условиях городской застройки..... 68

Строительные материалы и технологии

- Алексеев М.И., Фокичева Е.А.** Использование отходов производства при очистке сточных вод..... 76
- Белов В.В., Образцов И.В.** Компьютерное оптимизирование зерновых составов строительных композитов на основе цементно-минеральных смесей..... 83

Гагарин В.Г., Коркина Е.В., Шмаров И.А., Пастушков П.П. Исследование влияния мультифункционального покрытия стекла на спектральное пропускание света.....	90
Гусев Б.В., Файзусович А.С. Экспериментальные исследования процессов выщелачивания бетона при фильтрации.....	96
Еремкин А.И., Аверкин А.Г. Совершенствование методики расчетов контактных аппаратов для тепловлажностной обработки воздуха.....	105
Кальгин А.А. Системотехническое проектирование иерархических систем управления процессом производства бетонных смесей.....	115
Куприянов В.Н. Основные принципы конструирования наружных стен с ограничением конденсации в них парообразной влаги.....	120
Миронов В.А., Куляев П.В., Сухарев Ю.В. Влияние карбонатного микронаполнителя на прочностные и деформативные свойства бетонов.	128
Пыкин А.А., Лукутцова Н.П., Васюнина С.В., Устинов А.А., Мацаенко А.А., Мелешкевич В.И. Структура цементных и керамических материалов с устойчивыми нанодисперсными добавками на основе стабилизированных минеральных компонентов в водной дисперсионной среде.....	135
Резниченко В.С., Бель О.В. Информационная технология управления и определения стоимости крупномасштабных строек.....	145
Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мониторинг возводимых железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия.....	152
Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Геодезический купол из электростатического армированного бетона.....	161
Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры.....	167



Scientific and technical journal
The journal is published since 2003.
The journal is published 6 times a year.

№2 (58) 2015
(March-April)

BUILDING AND RECONSTRUCTION

The founder – federal state budgetary educational institution of the higher vocational training
«State University – Educational-Science-Production Complex»
(State University ESPC)

Editorial council:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenkov M.I. Candidat Sc. Tech.,
Assistant Prof.
Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.
Ivanova T.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichuk A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Popova L.V. Doc. Ec. Tech., Prof.
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief

Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief assistants:

Danilevich D.V. Candidat Sc. Tech., Assis-
tant Prof.
Kolesnikova T.N. Doc. Arc., Prof.
Korobko V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial committee

Bock T. Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)
Bondarenko V.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
Karpenko N.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kljueva N.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Korobko A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Korol E.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Rimshin V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Sergeychuk O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)
Serpik I.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Sikora Z. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)
Tamrazyan A.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
Tur V.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)
Turkov A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Fyodorov V.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Chernyshov E.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
Schach R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

Responsible for edition:

Solopov S.V. Candidat Sc. Tech

The edition address: 302006, Orel,
Street Moscow, 77
+7 (4862) 73-43-49
www.gu-unpk.ru
E-mail: oantc@ostu.ru

Journal is registered in Russian federal service
for monitoring communications, information
technology and mass communications
The certificate of registration:
ПИ № ФС77-47354 from 03.04.11 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»
86294

© State University ESPC, 2015

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Bandurin N., Kalashnikov S. Numerical method and an application for elastic bar ultimate state determination taking into account variable stiffness and common case of end supports.....	4
Ignatyev V., Ignatyev A. Analysis of plane frames with large nodal displacements by the finite element method in the form of classical mixed method..	12
Nazarov Yu., Pozniak E. Simulation of spatial propagation of Rayleigh waves in accordance with a given accelerogram.....	20
Sabodash O. Comparative analysis of global ice loads on the engineering structures Sakhalin offshore.....	27
Sokolov B., Radaikin O. To the definition of the concrete and reinforced concrete elements curvature along the span, taking into account the combined action of bending moments and shear forces.....	38
Tur V., Tur A. Changing the stress-strain state of the mesh dome in case of failure nodal connection.....	42
Turkov A., Makarov A., Volobueva E. Deflections and frequencies of own fluctuations of systems cross beams with various sizes of cells on the triangular plan depending on bearing scheme.....	46

Building and structure safety

Belostotsky A., Pavlov A. Numerical simulation for deformation of structures under actions beyond design bases.....	51
Eryomin K., Alekseeva E. Simulation of progressive failure of buildings and structures on the basis of statistical analysis of accumulated damage.....	57
Merkulov S. On the durability assurance of reinforced concrete structures.....	63

Architecture and town-planning

Bulgakov A., Buzalo, N. Ermachenko P. Parametric optimization of photobiological architectural shells in urban areas.....	68
--	----

Construction materials and technologies

Alekseev M., Fokicheva E. The use of waste when wastewater treatment....	76
Belov V., Obratcov I. Computer optimization of grain compositions building composites based on cement-mineral mixtures.....	83
Gagarin V., Korkina E., Shmarov I., Pastushkov P. Investigation of multifunctional coating on the glass on the spectral transmittance of light.....	90
Gusev B., Faivusovich A. Experimental research of processes of concrete leaching during filtration.....	96
Eremkin A., Averkin A. Calculation technique improvement contactors for steam curing air.....	105
Kalgin A. Systematic design hierarchical control systems process of production of concrete mixes.....	115
Kupriyanov V. General principles for design of external walls with limited condensation of moisture vapor in them.....	120
Mironov V., Kuljaev P., Sukharev Ju. The effect of carbonate micro-filler upon strength and strain properties of concretes.....	128
Pykin A., Lukutcova N., Vasyunina S., Ustinov A., Macaenko A., Meleshkevich V. The structure of cement and ceramic materials with steady nano-disperse additives on the basis of stabilized mineral components in the aquatic dispersion environment.....	135
Reznichenko V., Bel O. Inform texnologija management and cost definition large-scale constructions.....	145
Snezhkov D., Leonovich S. Monitoring of cast in place concrete construction by non destructive nesting: methods, criteria of conformity.....	152
Fedorov V., Kokojev M. Geodesic dome from the electrostatic reinforced concrete.	161
Chernyshov E., Korotkikh D.	167

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД И ПРОГРАММА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
УПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ
В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЕГО КОНЦОВ**

Описывается метод исследования напряженно-деформированного состояния упругого прямого стержня переменной жесткости с закреплениями концов общего вида при потере устойчивости 1-рода. Метод основан на численном решении соответствующего дифференциального уравнения с переменными коэффициентами с помощью разработанной авторами компьютерной программы, реализующей интерполяционную процедуру 8-го порядка точности. Приводятся результаты вычисления критической нагрузки для стержней постоянной и переменной жесткости с различными условиями закрепления концов.

***Ключевые слова:** устойчивость стержня, потеря устойчивости, численные методы.*

Известное решение задачи по определению критической силы для сжатого упругого стержня основано на предположении, что, наряду с прямолинейной формой равновесия, существует другая искривленная форма оси стержня [1, 2, 3]. При таком подходе, предложенном еще Эйлером, однородное уравнение изогнутой оси стержня постоянной жесткости решается аналитическим способом. Очевидно, что при условиях закрепления концов стержня, отличающихся от нескольких известных классических случаев, вычисление критической сжимающей силы может представить некоторые трудности. При расчете стержня переменной жесткости с закреплением концов общего вида возникает необходимость решать с высокой точностью краевую задачу для дифференциального уравнения 4-го порядка с переменными вдоль оси стержня коэффициентами и краевыми условиями, которые могут содержать производные функции прогиба до 3-го порядка. Широко известные коммерческие программные продукты в основном зарубежного производства (COLSYS, GMDO, SIGMA-FLOW, ANSYS FLUENT и др.), предназначенные для численного решения, в частности, дифференциальных уравнений, не позволяют оперативно решать подобные задачи.

В настоящей работе исследование напряженно-деформированного состояния сжато-изогнутого стержня основано на численном решении с помощью разработанной авторами программы «Стержень» в общем случае нелинейных дифференциальных уравнений, моделирующих это состояние. Используемый в программе численный метод решения дифференциальных уравнений имеет 8-й порядок точности [4], поэтому позволяет получить достаточно точное решение. В процессе расчета для любого значения сжимающей силы могут быть вычислены и выданы на печать перемещения, углы поворота и кривизны оси стержня, на основе которых можно вычислить напряжения в крайних волокнах поперечного сечения в любой точке оси. Предлагаемый здесь метод вычисления критической силы основывается на численном решении дифференциального уравнения устойчивости, но с учетом действия некоторого исчезающе малого возмущения, которое превращает однородное дифференциальное уравнение в неоднородное, а описываемый им сжатый стержень, строго говоря, – в сжато-изогнутый. Показывается, что при нарастании сжимающей нагрузки вплоть до ее некоторого пограничного значения прогибы увеличиваются незначительно и пропорционально приложенной сжимающей силе, а затем происходит интенсивное увеличение прогиба при практически постоянной силе, которая и является критической. Существенно заметить, что точность вычисления критической силы предлагаемым способом не зависит от вида упомянутого возмущения, необходимо лишь вызвать появление в стержне малых изгибающих моментов или начальных кривизн, обусловленных этим возмущением.

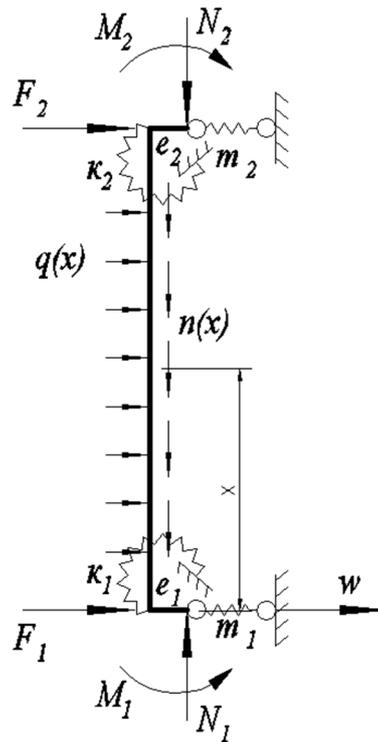


Рисунок 1 – Стержень с закреплениями общего вида и внешней нагрузкой

На рисунке 1 представлен стержень с закреплениями общего вида и внешней нагрузкой. Приняты обозначения: длина стержня ℓ , осевой момент инерции поперечного сечения I_x , модуль упругости материала E , площадь поперечного сечения A , максимальная координата поперечного сечения в плоскости изгиба b , коэффициенты жесткости угловых упругих связей в нижнем k_1 и верхнем k_2 сечениях стержня, внешние сосредоточенные моменты в нижнем M_1 и верхнем M_2 сечениях, эксцентриситеты приложения сжимающей силы в нижнем e_1 и верхнем e_2 сечениях стержня, интенсивность поперечной распределенной нагрузки $q(x)$, интенсивность продольной распределенной нагрузки $n(x)$, коэффициент жесткости постели упругой среды $p(x)$. Эти параметры могут быть заданы в любой комбинации. Величины, относящиеся к нижнему и верхнему сечениям стержня, здесь и далее помечаются индексами 1 и 2 соответственно. В случае шарнирных опор начальная погибь оси стержня задаётся функцией:

$$w_0(x) = w_0 \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right), \quad (1)$$

где w_0 – начальный прогиб в среднем сечении стержня.

Для консольного стержня:

$$w_0(x) = w_k \cos\left(\frac{\pi x}{2\ell}\right), \quad (2)$$

где w_k – начальный прогиб свободного конца стержня.

Запишем уравнение равновесия для сечения стержня с абсциссой x [1, 2]:

$$EI(x)(w'' - w_0'') = -M_x, \quad (3)$$

где M_x – изгибающий момент в этом сечении от внешних сил.

Для его определения рассмотрим условия равновесия малого элемента $a-b$ оси стержня, изображенного на рисунке 2. Этот малый элемент представляет часть стержня $A-B$, полная длина которого равна ℓ . Стержень по всей длине нагружен распределенной продольной силой n_0 . В верхнем сечении стержня (при $x = \ell$) может быть приложена сосредоточенная сила N_0 , которая равна сумме сил, приложенным к верхним этажам (участкам), если стержень имеет несколько участков.

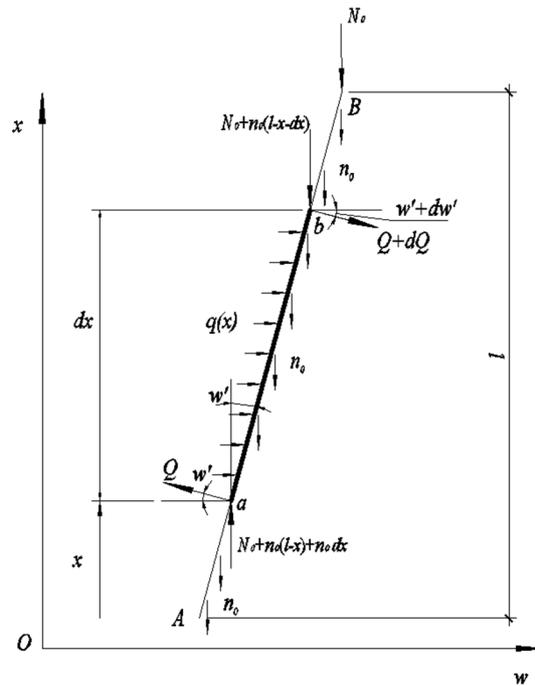


Рисунок 2 – Малый элемент a-b части (оси) стержня A-B

Запишем сумму проекций всех сил, действующих на элемент dx на направление, перпендикулярное к оси стержня:

$$-Q + (Q + dQ) + [N_0 + n_0(l-x) + n_0 dx]w' - [N_0 + n_0(l-x-dx)] \cdot (w' + dw') + q(x)dx - p(x)dx = 0. \quad (4)$$

Преобразуем это выражение:

$$dQ + [N_0 + n_0(l-x)]w' - [N_0 + n_0(l-x-dx)] \cdot w' - [N_0 + n_0(l-x-dx)]dw' + q(x)dx - p(x)w'dx = 0. \quad (5)$$

После удаления бесконечно малых слагаемых и упрощения получим:

$$dQ - [N_0 + n_0(l-x)]dw' + q(x)dx - p(x)w'dx = 0. \quad (6)$$

Величина $N_0 + n_0(l-x) = N$ – продольная сила, действующая на элемент dx , а $dw' / dx = w''$. С учетом этого, после деления последнего равенства на dx можно записать выражение для производной поперечной силы:

$$Q' = N \cdot w'' - q(x) + p(x)w. \quad (7)$$

Учитывая, что $Q' = M_x''$, можно получить разрешающее уравнение для исследования напряженно-деформированного состояния сжато-изогнутого стержня:

$$EI(x)(w'' - w_0'')'' + Nw'' + q(x) - p(x)w = 0. \quad (8)$$

Отметим некоторые особенности постановки краевых условий. При $x = 0$, если нижняя опора шарнирная, то должно выполняться краевое условие:

$$EI_1 w_1'' - M_1 - N_1 e_1 + k_1 w_1' = 0,$$

если нижняя опора имеет возможность смещаться в горизонтальном направлении, то должно быть:

$$EI_1 w_1''' - F_1 - m_1 w_1 = 0.$$

Для верхней опоры при $x = \ell$ имеем тоже два соответствующих условия:

$$EI_2 w_2'' + M_2 + N_2 e_2 - k_2 w_2' = 0;$$

$$EI_2 w_2''' + F_2 + m_2 w_2 = 0.$$

Очевидно, что в некоторых случаях закрепления стержня в опорах можно решать задачу на основе дифференциальных уравнений 3-го или 2-го порядка. Например, критическую силу для простого консольного стержня переменной жесткости можно определить на основе уравнения 3-го порядка с краевыми условиями в заделке $w = w' = 0$, а в верхнем сечении $w'' = 0$. Есть основания утверждать, что максимальную устойчивость вычислительного процесса имеет тот, который основан на дифференциальных уравнениях наименьшего порядка.

В приведенных ниже тестовых примерах показаны результаты использования разработанной программы для определения критической силы в стержнях с постоянной и переменной вдоль оси жесткостью. В первых трех примерах вычисляется критическая сила в стержне длиной $l = 100$ см постоянной жесткости $J_x = 30$ см⁴. Модуль упругости материала принят равным $E = 20000$ кН/см².

Пример 1. Определение критической силы для консольного стержня, возмущающими факторами для которого являются: внешняя поперечная сила в верхнем сечении $F = 10^{-4}$ кН, эксцентриситет $e = 5 \cdot 10^{-4}$ см, поперечная распределенная сила $q = 2 \cdot 10^{-6}$ кН/см, начальная погибь $w_0^m = 5 \cdot 10^{-5}$ см и внешний сосредоточенный момент в верхнем сечении $M = 5 \cdot 10^{-3}$ кН·см (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты определения критической силы для консольного стержня

$F = 10^{-4}$ кН $e = 5 \cdot 10^{-4}$ см $q = 2 \cdot 10^{-6}$ кН/см $M = 5 \cdot 10^{-3}$ кН·см					
	Перемещение верхнего конца стержня, см				
N , кН	0,00029	0,0027	0,0002	0,0002	0,00022
120	0,007	0,0011	0,00073	0,0009	0,0008
140	0,004	0,004	0,0029	0,0036	0,0031
146	0,008	0,009	0,0056	0,007	0,006
147	0,018	0,021	0,013	0,017	0,014
147,6	0,033	0,038	0,024	0,03	0,026
147,8	0,18	0,21	0,134	0,17	0,14
148	2	2,3	1,45	1,8	1,6
148,04	123	142	89	112	96
148,044	506	588	368	462	397
148,04405	1346	1565	978	1230	1057
148,04406	39555	459454	287178	360854	310349
$N_{кр} = \pi^2 EI / 4l^2$					
148,044067	-8275	-9622	-6014	-7557	-6499

Дифференциальное уравнение (6) для этих случаев имеет вид:

$$EIw^{(IV)} - q - w_0 \left(\frac{\pi}{2l}\right)^4 \sin\left(\frac{\pi x}{2l}\right) = 0.$$

Краевые условия:

$$w_0 = w'(0) = 0;$$

$$EIw''(l) - Ne = 0;$$

$$EIw'''(l) + F = 0.$$

Точное значение критической силы для этого стержня равно $N_{кр} = \pi^2 EI / 4l^2 \approx 148,044066$ кН. Содержание таблицы 1 показывает, что при возрастании

сжимающей силы N до значения 148 кН, то есть до 99,97% ее критического значения, перемещение верхнего конца стержня не превосходит 0,2% длины, в то время как догрузка остальных 0,03% увеличивает это перемещение в такой степени, что кривая «перемещение – сила» асимптотически приближается к горизонтальной прямой $N=N_{кр}$. При задании силы N значения выше критического функция перемещения меняет знак, уменьшается по абсолютному значению, что трактуется нами как переход к следующей форме равновесия. Для получения удовлетворительной точности решения оказалось достаточным принять сетку узлов на оси стержня, содержащую всего 11 узлов.

Пример 2. Определение критической силы для консольного стержня, имеющего на верхнем конце поперечную упругую связь с коэффициентом жесткости $m=10$ кН/см, возмущающими факторами для которого являются: поперечная распределенная сила $q=10^{-5}$ кН/см, эксцентриситет $e=10^{-5}$ см и внешний сосредоточенный момент $M=0,01$ кН·см в верхнем сечении (табл. 2).

Дифференциальное уравнение (8) преобразуется в $EIw^{(IV)} - q = 0$. Краевые условия:

$$w_0 = w'(0) = 0;$$

$$EIw''(l) - M = 0;$$

$$EIw'''(l) - mw(l) = 0.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 2. В последней колонке этой таблицы представлены результаты вычисления критической силы от совместного действия этих трех возмущающих факторов. Видно, что критическая сила для этого случая закрепления концов стержня находится в пределах $826,98458 < N_{кр} < 826,98500$.

Таблица 2 – Результаты вычислений критической силы для консольного стержня, имеющего на верхнем конце поперечную упругую связь

$m=10$ кН/см $e=10^{-5}$ см $q=10^{-5}$ кН/см $M=0,01$ кН·см					
	$N, \text{ кН}$	Перемещение верхнего конца стержня, см			
	400	0,00005	0,00006	0,00003	0,00006
	700	0,00011	0,0003	0,0009	0,0002
	800	0,0004	0,002	0,0045	0,0008
820	0,0014	0,007	0,0018	0,003	
825	0,005	0,026	0,006	0,01	
826,4	0,016	0,09	0,02	0,034	
826,9	0,11	0,61	0,15	0,23	
826,98	2,08	11,2	2,7	4,3	
826,984	15,4	83	20,1	32	
826,98458	225	1213	293	458	
826,98500	-25	-135	-33	-53	

Пример 3. Определяется критическая сила для стержня на двух шарнирных опорах. В качестве возмущающих факторов выбраны: поперечная распределенная нагрузка, сосредоточенный момент и погибь.

Дифференциальное уравнение (8) запишется в виде: $EIw^{(IV)} - q - w_0 \left(\frac{\pi}{l}\right)^4 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) = 0$.

Краевые условия:

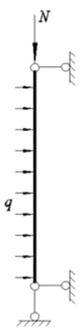
$$w_0 = w''(0) = 0;$$

$$w(l) = 0;$$

$$EIw''(l) - M = 0.$$

Критическая сила для этого стержня $N_{кр} = \pi^2 EI / l^2 \approx 592,17626407 \text{ кН}$. Результаты представлены в таблице 3. Видно, что вычисляемое значение критической силы совпадает с точным до 7-й значащей цифры.

Таблица 3 – Результаты определения критической силы для стержня на двух шарнирных опорах

$m=10 \text{ кН/см}$ $e=10^{-5} \text{ см}$ $q=10^{-5} \text{ кН/см}$ $M=0,01 \text{ кН}\cdot\text{см}$					
	Перемещение верхнего конца стержня, см				
	$N, \text{ кН}$				
	400	0,000064	0,000032	0,0003	0,00035
500	0,00016	0,000066	0,0006	0,0008	
580	0,001	0,00052	0,005	0,006	
592	0,073	0,036	0,32	0,42	
592,15	0,49	0,242	2,2	3,0	
592,17	2,05	1,01	9,0	11,9	
592,176	47,5	23,4	218	289	
592,1762	171	89	826	1095	
592,17626	1106	846	5077	6730	
$N_{кр} = \pi^2 EI / 4l^2$					
592,17628	-1472	-764	-7103	-9415	

Пример 4. Консольный стержень с равномерно распределенной продольной нагрузкой $n_0 = ?$ [7]. Исходные данные: длина 4 м, осевой момент инерции поперечного сечения $I=0,00025166 \text{ м}^4$, модуль упругости материала $E=2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

Заметим, что в [7] критическая нагрузка получена равной $N_{кр} = 6471760 \text{ Н/м}$, причем при использовании предлагаемого автором метода для ее вычисления требуется выполнять процедуру интегрирования. С помощью предлагаемого метода, основанного на численном решении с высокой точностью дифференциального уравнения устойчивости, для получения достаточно точного решения необходимо выполнить несколько прогонов программы, каждый из которых продолжается малые доли секунды. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты определения критической силы для консольного стержня с равномерно распределенной продольной нагрузкой

N	Перемещение
1000000	0,000004
6000000	0,00004
6400000	0,0003
6470000	0,011
6471762	22,8
6471762,68	105
6471762,80	290
6471762,90	-618

Пример 5. Консольный стержень круглого поперечного сечения, радиус которого линейно изменяется вдоль оси [7], нагружен сосредоточенной силой N , причем $r(l) = 1,2r(0)$. Длина стержня и модуль упругости материала имеют те же значения, что и в предыдущем примере.

Для решения используем дифференциальное уравнение 3-го порядка $EI(x)w''' + Nw' = 0$.

Конкретный вид функции жесткости $I(x)$ определяем на основе представленных исходных данных. Имеем: $I(x) = \pi[r(x)]^4 / 4 \text{ м}^4$; $I(0) = 0,00025166 \text{ м}^4$.

Вычисляем радиус в начале и в конце стержня:

$$r(0) = (4I(0) / \pi)^{1/4} = 0,13379229 \text{ м};$$

$$r(l) = 1,2r(0) = 0,16055075 \text{ м}.$$

Записываем дифференциальное уравнение:

$$(E\pi(0,133792291 + 0,006689615x) / 4)w''' + Nw' = 0.$$

Таблица 5 – Результаты определения критической силы для консольного стержня круглого поперечного сечения, радиус которого линейно изменяется вдоль оси, нагруженного сосредоточенной силой

N	Перемещение
5000000	0,000003
10000000	0,000008
13000000	0,00005
13560000	0,0081
13563000	0,055
13563500	2,3
13563510	12,2
13563512,2	212
13563512,3	903
13563512,4	-415

В таблице 5 представлены результаты вычисления критической нагрузки, значение которой лежит в пределах $13563512,3 \text{ Н} < N_{кр} < 13563512,4 \text{ Н}$. В работе [7] получено $N_{кр} = 1356350 \text{ Н}$.

В заключение отметим, что полученные выше результаты подтверждают достаточную степень точности и надежности предлагаемого метода определения критического состояния стержня как постоянной, так и переменной жесткости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко, С.П. Сопротивление материалов [Текст] / С.П. Тимошенко. – М.: Физматгиз. – Ч. 2. – 1965.
2. Вольмир, А.С. Устойчивость упругих систем [Текст] / А.С. Вольмир. – М. Физматгиз, 1963.
3. Зубчанинов, В.Г. Механика сплошных деформируемых сред [Текст] / В.Г. Зубчанинов. – Тверь: ТГТУ, 2000.
4. Бандурин, Н.Г. Новый численный метод порядка n для решения интегро-дифференциальных уравнений общего вида [Текст] / Н.Г. Бандурин // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7. – №2. – С. 3-10.
5. Бандурин, Н.Г. Метод и пакет программ для численного решения систем существенно нелинейных интегро-дифференциально-алгебраических уравнений (корректные по Адамару двумерные и трехмерные краевые задачи) [Текст] / Н.Г. Бандурин, С.Ю. Калашников // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – №5. – С. 3-11.
6. Бандурин, Н.Г. Численный метод 9-го порядка точности для решения одномерных существенно нелинейных дифференциальных уравнений [Текст] / Н.Г. Бандурин, С.Ю. Калашников // Вестник ВолгГАСУ, 2014. – выпуск 36. – С. 86-90.
7. Качо М. Точная постановка задачи об устойчивости стержневых систем и прямой метод численного решения [Текст] / М. Качо, П.М. Лопес-Рейес, А. Лоренцана // Изв. РАН. – 2014. – №3. – С. 114-123.

Н.Г. Бандурин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика»
Тел.: +7 (8442) 96-98-17
E-mail: bandurin_ng@mail.ru

С.Ю. Калашников

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград
Доктор технических наук, профессор, ректор
Тел.: +7 (442) 96-98-03
E-mail: postmaster@vgasu.ru

N. BANDURIN, S. KALASHNIKOV

**NUMERICAL METHOD AND AN APPLICATION FOR ELASTIC
BAR ULTIMATE STATE DETERMINATION TAKING INTO ACCOUNT
VARIABLE STIFFNESS AND COMMON CASE OF END SUPPORTS**

The paper describes a method for studying the stress-strain state of straight elastic rod of variable stiffness with general fixing at the ends in the case of stability loss of the 1st type. The method is based on the numerical solution of the corresponding differential equation with variable coefficients applying the computer program developed by the authors, which realizes the interpolation procedure of the 9th order of accuracy. The paper gives the calculation results of the critical load to the rods of permanent and variable stiffness with various conditions of the ends fixing.

Keywords: *the stability of the rod; loss of stability; numerical methods.*

BIBLIOGRAPHY

1. Timoshenko, S.P. Soprotivlenie materialov [Tekst] / S.P. Timoshenko. – M.: Fizmatgiz. – Ch. 2. – 1965.
2. Vol'mir, A.S. Ustojchivost' uprugih sistem [Tekst] / A.S. Vol'mir. – M. Fizmatgiz, 1963.
3. Zubchaninov, V.G. Mehanika sploshnyh deformiruemyh sred [Tekst] / V.G. Zubchaninov. – Tver': TGTU, 2000.
4. Bandurin, N.G. Novyj chislennyj metod porjadka n dlja reshenija integro-differencial'nyh uravnenij obshhego vida [Tekst] / N.G. Bandurin // Vychislitel'nye tehnologii. – 2002. – T. 7. – №2. – S. 3-10.
5. Bandurin, N.G. Metod i paket programm dlja chislennogo reshenija sistem sushhestvenno nelinejnyh integro-differencial'no-algebraicheskikh uravnenij (korrektnye po Adamaru dvumernye i trehmernye kraevye zadachi) [Tekst] / N.G. Bandurin, S.Ju. Kalashnikov // Vychislitel'nye tehnologii. – 2014. – T. 19. – №5. – S. 3-11.
6. Bandurin, N.G. Chislennyj metod 9-go porjadka tochnosti dlja reshenija odnomernyh sushhestvenno nelinejnyh differencial'nyh uravnenij [Tekst] / N.G. Bandurin, S.Ju. Kalashnikov // Vestnik VolgGASU, 2014. – vypusk 36. – S. 86-90.
7. Kacho M. Tochnaja postanovka zadachi ob ustojchivosti sterzhnevnyh sistem i prjamoj metod chislennogo reshenija [Tekst] / M. Kacho, P.M. Lopes-Rejes, A. Lorecana // Izv. RAN. – 2014. – №3. – S. 114-123.

N. Bandurin

Volgograd state university of architecture and civil engineering, Volgograd
Doctor of technical science, professor of the department «Structural mechanics»
Ph.: +7 (8442) 96-98-17
E-mail: bandurin_ng@mail.ru

S. Kalashnikov

Volgograd state university of architecture and civil engineering, Volgograd
Doctor of technical science, professor, rector
Ph.: +7 (442) 96-98-03
E-mail: postmaster@vgasu.ru

ИГНАТЬЕВ В.А., ИГНАТЬЕВ А.В.

РАСЧЕТ ПЛОСКИХ РАМ С БОЛЬШИМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ УЗЛОВ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА

Описан алгоритм формирования системы разрешающих уравнений для плоских рам с большими перемещениями узлов, основанный на применении метода конечных элементов в форме классического смешанного метода и процедуры пошагового нагружения. Рассмотрены два варианта алгоритма. Первый основан на процедуре пошагового догружения и выполнения расчета в линейной постановке на каждом шаге с учетом новой геометрии системы, достигнутой на предыдущем шаге. Второй вариант алгоритма заключается в том, что уже на первом шаге нагружения рассматривается геометрически нелинейная задача.

Ключевые слова: МКЭ в форме классического смешанного метода, плоские рамы, большие перемещения узлов.

Исходная геометрия части или всего стержня плоской рамы между узлами $(i-1)$ и i , принимаемых за конечный элемент с номером (i) , показана на рисунке 1, а. На рисунке 1, б показаны основная система и нумерация основных неизвестных смешанного метода i -го элемента.

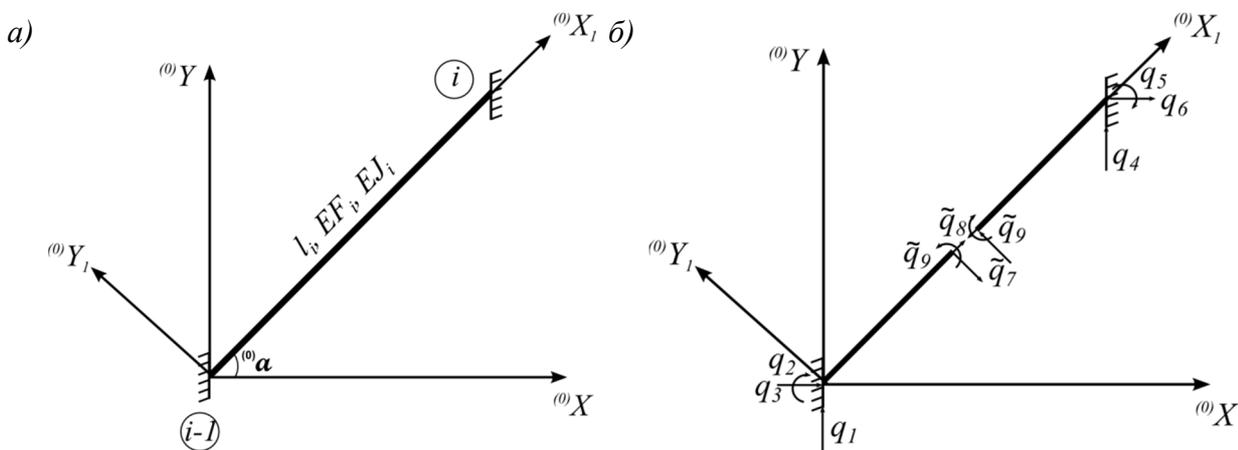


Рисунок 1 – Исходная геометрия стержня плоской рамы между узлами $(i-1)$ и i , принимаемых за конечный элемент с номером (i) (а); основная система и нумерация основных неизвестных смешанного метода i -го элемента (б)

Здесь q_1, q_2, \dots, q_6 – линейные и угловые перемещения узловых связей КЭ, $\tilde{q}_7, \tilde{q}_8, \tilde{q}_9$ – усилия в расчетном сечении конечного элемента в середине его длины, $Q^{(i)} = \tilde{q}_7, M^{(i)} = \tilde{q}_8, N^{(i)} = \tilde{q}_9$.

На первом шаге нагружения рамы, т.е. при нагрузке на каждый КЭ ${}^{(1)}P^{(i)} = \Delta^{(1)}P^{(i)}$, решается линейная задача расчета рамы по МКЭ в форме смешанного метода [1, 2].

Для случая, когда в узле i конечно-элементной сетки плоской стержневой системы сходятся только два конечных элемента (рис. 2), система разрешающих уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 {}^{(1)}R_{y,i} &= {}^{(1)}\left(\sum_{t=7}^9 \tilde{r}_{4,j}^{(i)} \tilde{q}_j^{(i)} + r_{4,p}^{(i)}\right) + {}^{(1)}\left(\sum_{t=7}^9 \tilde{r}_{1,j}^{(i+1)} \tilde{q}_j^{(i+1)} + r_{1,p}^{(i+1)}\right) = 0; \\
 {}^{(1)}R_{x,i} &= {}^{(1)}\left(\sum_{t=7}^9 \tilde{r}_{6,j}^{(i)} \tilde{q}_j^{(i)} + r_{6,p}^{(i)}\right) + {}^{(1)}\left(\sum_{t=7}^9 \tilde{r}_{3,j}^{(i+1)} \tilde{q}_j^{(i+1)} + r_{3,p}^{(i+1)}\right) = 0; \\
 {}^{(1)}M_i &= {}^{(1)}\left(\sum_{t=7}^9 \tilde{r}_{5,j}^{(i)} \tilde{q}_j^{(i)} + r_{5,p}^{(i)}\right) + {}^{(1)}\left(\sum_{t=7}^9 \tilde{r}_{2,j}^{(i+1)} \tilde{q}_j^{(i+1)} + r_{2,p}^{(i+1)}\right) = 0; \\
 {}^{(1)}\Delta_7^{(i)} &= {}^{(1)}\left(\sum_{j=1}^6 \tilde{\delta}_{7,j}^{(i)} q_j^{(i)} + \sum_{t=7}^9 \delta_{7,t}^{(i)} \tilde{q}_t^{(i)}\right) + {}^{(1)}\delta_{7,p}^{(i)} = 0; \\
 {}^{(1)}\Delta_8^{(i)} &= {}^{(1)}\left(\sum_{j=1}^6 \tilde{\delta}_{8,j}^{(i)} q_j^{(i)} + \sum_{t=7}^9 \delta_{8,t}^{(i)} \tilde{q}_t^{(i)}\right) + {}^{(1)}\delta_{8,p}^{(i)} = 0; \\
 {}^{(1)}\Delta_9^{(i)} &= {}^{(1)}\left(\sum_{j=1}^6 \tilde{\delta}_{9,j}^{(i)} q_j^{(i)} + \sum_{t=7}^9 \delta_{9,t}^{(i)} \tilde{q}_t^{(i)}\right) + {}^{(1)}\delta_{9,p}^{(i)} = 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

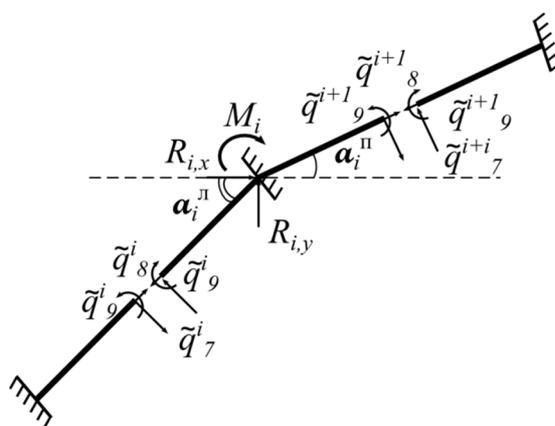


Рисунок 2 – Случай схождения двух конечных элементов в узле i конечно-элементной сетки плоской стержневой системы

Здесь левый верхний индекс (k) означает номер шага нагружения (догружения), правый верхний индекс (i) означает принадлежность к i -му конечному элемент, индексы Л и П вверху относятся к величинам справа или слева от рассматриваемого узла или расчетного сечения.

Первые три уравнения системы (1) являются условиями равновесия узла i конечно-элементной сетки, а вторые три – условиями совместности деформаций и неразрывности смещений в расчетном сечении i -го конечного элемента.

Значения коэффициентов матрицы откликов, входящих в эти уравнения, приведены в [1].

Решив систему уравнений (1), найдем величины всех узловых перемещений конечных элементов в глобальной системе координат XOY и усилий в расчетных сечениях:

$$\begin{aligned}
 {}^{(1)}q_1^{(i)} &= \Delta^{(1)}y_{i-1}, & {}^{(1)}q_2^{(i)} &= \Delta^{(1)}\varphi_{i-1}^{\text{П}}, & {}^{(1)}q_3^{(i)} &= \Delta^{(1)}x_{i-1}, \\
 {}^{(1)}q_4^{(i)} &= \Delta^{(1)}y_i, & {}^{(1)}q_5^{(i)} &= \Delta^{(1)}\varphi_i^{\text{Л}}, & {}^{(1)}q_6^{(i)} &= \Delta^{(1)}x_i, \\
 {}^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} &= \Delta^{(1)}Q^{(i)}, & {}^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} &= \Delta^{(1)}M^{(i)}, & {}^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)} &= \Delta^{(1)}N^{(i)}.
 \end{aligned}$$

Найденное в линейной постановке напряженно-деформированное состояние всех конечных элементов конструкции может рассматриваться далее в двух вариантах. В первом это состояние принимается за исходное для второго шага догружения, и для него снова решается линейная система разрешающих уравнений. То же повторяется на каждом последующем шаге нагружения.

Во втором варианте найденное в линейной постановке напряженно-деформированное состояние принимается за первое приближение при решении нелинейной системы разрешающих уравнений по методу Ньютона-Рафсона или методу последовательных приближений.

Рассмотрим сначала первый вариант.

Используя полученные в результате расчета в линейной постановке величины $q_1, q_2, \dots, \tilde{q}_9$, найдем геометрию КЭ после первого шага нагружения, являющуюся начальной для второго шага догружения при ${}^{(2)}P^{(i)} = {}^{(1)}P + \Delta({}^{(2)}P^{(i)})$.

На рисунке 3, а показано положение i -го конечного элемента после первого шага нагружения по отношению к первоначальному в системе координат XOY , а на рисунке 3, б – соответствующие этому шагу усилия в расчетном сечении C (в середине КЭ).

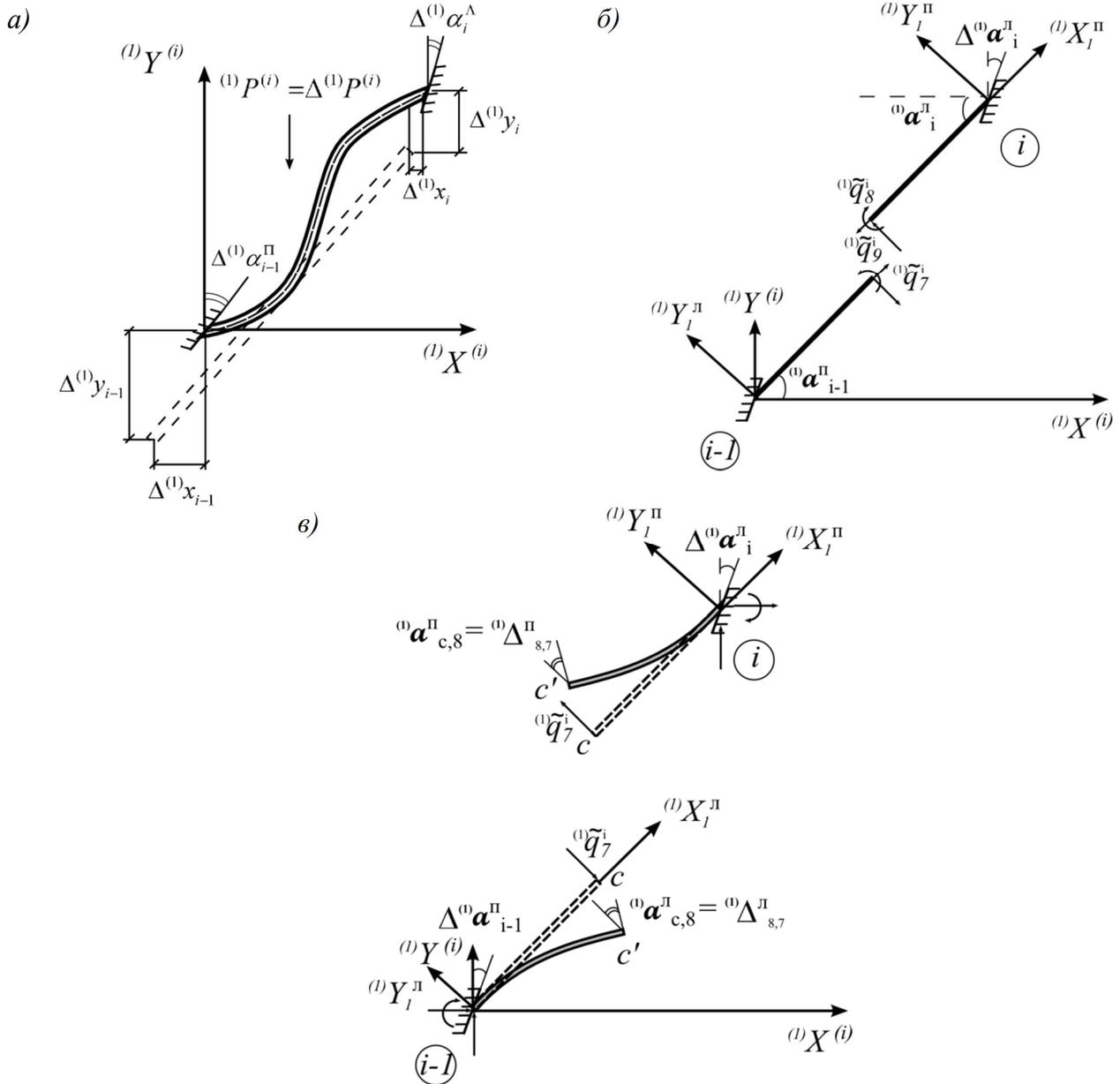


Рисунок 3 – Геометрия КЭ после первого шага нагружения (а); усилия в расчетном сечении C , соответствующие первому шагу нагружения (б); положение расчетного сечения C и узлов $(i-1)$ и i для i -го конечного элемента в локальных системах координат (в)

На рисунке 3, в показано положение расчетного сечения C и узлов $(i-1)$ и i для i -го конечного элемента в локальных системах координат $X_1^\Lambda O_1^\Lambda Y_1^\Lambda$ и $X_1^\pi O_1^\pi Y_1^\pi$ для левой и правой половины КЭ и системе координат $X_i O Y_i$, полученной плоскопараллельным переносом глобальной системы координат в узел $(i-1)$. Угол наклона этого сечения к оси OX глобальной

системы координат имеет три составляющих: угол наклона $^{(0)}\alpha$ i -го конечного элемента в исходном ненагруженном состоянии; углы поворота $^{(1)}\alpha_{i-1}^\Lambda$, $^{(1)}\alpha_{i-1}^\Pi$ левой и правой половины i -го КЭ как жесткого целого относительно точек $(i-1)$ и i соответственно; вызываемые изгибом КЭ углы поворота $^{(1)}\alpha_C^\Lambda$ и $^{(1)}\alpha_C^\Pi$ сечений в точке C , относящихся к левой и правой половине КЭ соответственно (рис. 3, в):

$$\begin{aligned} ^{(1)}\tilde{\alpha}_C^\Lambda &= ^{(1)}\alpha_{i-1}^\Pi + ^{(1)}\alpha_C^{(i)\Lambda} = (^{(1)}\alpha^{(i)} - ^{(1)}q_2^{(i)}) + ^{(1)}\alpha_C^{(i)\Lambda}; \\ ^{(1)}\tilde{\alpha}_C^\Pi &= ^{(1)}\alpha_i^\Lambda + ^{(1)}\alpha_C^{(i)\Pi} = (^{(1)}\alpha^{(i)} - ^{(1)}q_5^{(i)}) + ^{(1)}\alpha_C^{(i)\Pi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$^{(1)}\alpha_C^{(i)\Lambda} = \frac{^{(1)}Q_i \left(\frac{l_i}{2}\right)^2}{2(EJ)_i} - \frac{^{(1)}M_i \left(\frac{l_i}{2}\right)}{(EJ)_i} = \frac{^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} l_i^2}{8(EJ)_i} - \frac{^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} l_i}{2(EJ)_i}, \quad ^{(1)}\alpha_C^{(i)\Pi} = \frac{^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} l_i^2}{8(EJ)_i} + \frac{^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} l_i}{2(EJ)_i}. \quad (3)$$

В локальной системе координат уравнения изогнутой оси конечного элемента и соответствующих ей углов поворота сечений от воздействия усилий $^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)}$, $^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)}$, $^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)}$ (рис. 4) имеют (для левой половины КЭ) в линейной постановке следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{от } ^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} - y_7(x_1) &= ^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} \frac{1}{(EJ)_i} \left(\frac{l_i}{4} x_1^2 - \frac{x_1^3}{6} \right), \quad \varphi_7(x_1) = y_7'(x_1) = ^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} \frac{1}{2(EJ)_i} (l_i x_1 - x_1^2), \\ \text{от } ^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} - y_8(x_1) &= -^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} \frac{x_1^2}{2(EJ)_i}, \quad y_8'(x_1) = -\frac{\tilde{q}_8^{(i)}}{(EJ)_i} x_1, \\ \text{от } ^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)} - y_9(x_1) &= 0, \quad y_9'(x_1) = 0, \quad x_9(x_1) = ^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)} \frac{x_1}{(EF)_i}. \end{aligned}$$

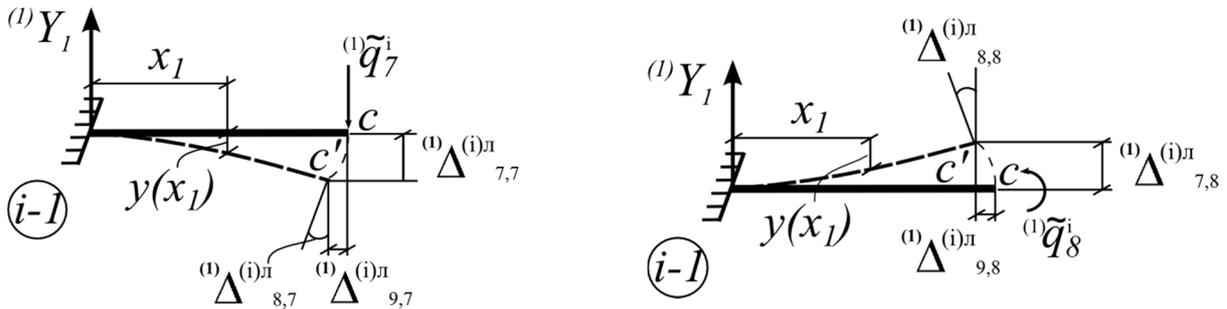


Рисунок 4 – К построению уравнений изогнутой оси конечного элемента и соответствующих ей углов поворота сечений от воздействия усилий $^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)}$, $^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)}$, $^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)}$ в локальной системе координат

Из этих уравнений следует:

$$\begin{aligned} ^{(1)}\Delta_{7,7}^{(i)\Lambda} &= ^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} \frac{l_i^3}{24(EJ)_i}, \quad ^{(1)}\Delta_{8,7}^{(i)\Lambda} = ^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)} \frac{l_i^2}{8(EJ)_i}, \quad ^{(1)}\Delta_{9,7}^{(i)\Lambda} = -\frac{1}{2} \int_0^{l_i/2} (y_7'(x_1))^2 dx_1 = (^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)})^2 \frac{l_i^5}{480(EJ)_i^2}, \\ ^{(1)}\Delta_{7,8}^{(i)\Lambda} &= -^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} \frac{l_i^2}{8(EJ)_i}, \quad ^{(1)}\Delta_{8,8}^{(i)\Lambda} = ^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)} \frac{l_i}{2(EJ)_i}, \quad ^{(1)}\Delta_{9,8}^{(i)\Lambda} = -(^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)})^2 \frac{l_i^2}{48(EJ)_i^2}, \\ ^{(1)}\Delta_{7,9}^{(i)\Lambda} &= 0, \quad ^{(1)}\Delta_{8,9}^{(i)\Lambda} = 0, \quad ^{(1)}\Delta_{9,9}^{(i)\Lambda} = ^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)} \frac{l_i}{2(EF)_i}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для правой половины КЭ получаем аналогично:

$$\begin{aligned} ^{(1)}\Delta_{7,7}^{(i)\Pi} &= ^{(1)}\Delta_{7,7}^{(i)\Lambda}, \quad ^{(1)}\Delta_{8,7}^{(i)\Pi} = -^{(1)}\Delta_{8,7}^{(i)\Lambda}, \quad ^{(1)}\Delta_{9,7}^{(i)\Pi} = ^{(1)}\Delta_{9,7}^{(i)\Lambda}, \\ ^{(1)}\Delta_{7,8}^{(i)\Pi} &= -^{(1)}\Delta_{7,8}^{(i)\Lambda}, \quad ^{(1)}\Delta_{8,8}^{(i)\Pi} = ^{(1)}\Delta_{8,8}^{(i)\Lambda}, \quad ^{(1)}\Delta_{9,8}^{(i)\Pi} = ^{(1)}\Delta_{9,8}^{(i)\Lambda}, \\ ^{(1)}\Delta_{7,9}^{(i)\Pi} &= ^{(1)}\Delta_{7,9}^{(i)\Lambda} = 0, \quad ^{(1)}\Delta_{8,9}^{(i)\Pi} = ^{(1)}\Delta_{8,9}^{(i)\Lambda} = 0, \quad ^{(1)}\Delta_{9,9}^{(i)\Pi} = ^{(1)}\Delta_{9,9}^{(i)\Lambda}. \end{aligned} \quad (5)$$

Перемещения i -го конечного элемента как жесткого целого по направлениям усилий ${}^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)}$, ${}^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)}$, ${}^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)}$ от смещения узловых связей в локальной системе координат $X_1O_1Y_1$ (рис. 5) определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} {}^{(1)}\Delta_{7,1}^{(i)} &= -{}^{(1)}q_1^{(i)}, & {}^{(1)}\Delta_{8,1}^{(i)} &= 0, & {}^{(1)}\Delta_{9,1}^{(i)} &= 0, \\ {}^{(1)}\Delta_{7,2}^{(i)} &= {}^{(1)}q_2^{(i)} \frac{l_i}{2}, & {}^{(1)}\Delta_{8,2}^{(i)} &= -{}^{(1)}q_2^{(i)}, & {}^{(1)}\Delta_{9,2}^{(i)} &= -\left({}^{(1)}q_2^{(i)}\right)^2 \frac{l_i^2}{4}, \\ {}^{(1)}\Delta_{7,3}^{(i)} &= 0, & {}^{(1)}\Delta_{8,3}^{(i)} &= 0, & {}^{(1)}\Delta_{9,3}^{(i)} &= {}^{(1)}q_3^{(i)}, & {}^{(1)}\Delta_{7,4}^{(i)} &= {}^{(1)}q_4^{(i)}, & {}^{(1)}\Delta_{8,4}^{(i)} &= 0, & {}^{(1)}\Delta_{9,4}^{(i)} &= 0, \\ {}^{(1)}\Delta_{7,5}^{(i)} &= {}^{(1)}q_5^{(i)} \frac{l_i}{2}, & {}^{(1)}\Delta_{8,5}^{(i)} &= {}^{(1)}q_5^{(i)}, & {}^{(1)}\Delta_{9,5}^{(i)} &= -\left({}^{(1)}q_5^{(i)}\right)^2 \frac{l_i^2}{4}, \\ {}^{(1)}\Delta_{7,6}^{(i)} &= 0, & {}^{(1)}\Delta_{8,6}^{(i)} &= 0, & {}^{(1)}\Delta_{9,6}^{(i)} &= -{}^{(1)}q_6^{(i)}. \end{aligned} \quad (6)$$

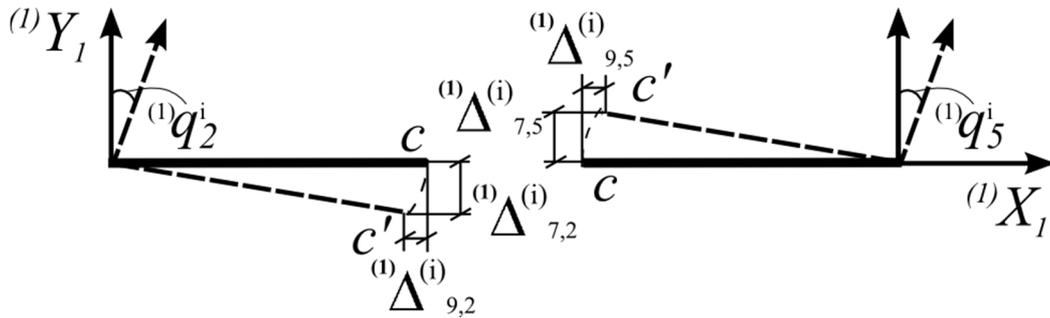


Рисунок 5 – Перемещения i -го конечного элемента как жесткого целого по направлениям усилий ${}^{(1)}\tilde{q}_7^{(i)}$, ${}^{(1)}\tilde{q}_8^{(i)}$, ${}^{(1)}\tilde{q}_9^{(i)}$ от смещения узловых связей в локальной системе координат

Углы наклона расчетного сечения в точке C i -го конечного элемента в локальной и глобальной осях координат определяются выражениями (2) и (3). Линейные смещения этого сечения после первого шага нагружения определяются с учетом (4) и (5) в локальной системе координат следующими выражениями:

$$\begin{aligned} {}^{(1)}\Delta_{C,x_1}^{(i)\Lambda} &= \sum_{j=7}^9 {}^{(1)}\Delta_{9,j}^{(i)\Lambda}, & {}^{(1)}\Delta_{C,x_1}^{(i)\Pi} &= \sum_{j=7}^9 {}^{(1)}\Delta_{9,j}^{(i)\Pi}, \\ {}^{(1)}\Delta_{C,y_1}^{(i)\Lambda} &= \sum_{j=7}^9 {}^{(1)}\Delta_{7,j}^{(i)\Lambda}, & {}^{(1)}\Delta_{C,y_1}^{(i)\Pi} &= \sum_{j=7}^9 {}^{(1)}\Delta_{7,j}^{(i)\Pi}. \end{aligned} \quad (7)$$

При переходе к глобальным осям координат (рис. 6) получаем с учетом линейных смещений узлов $(i-1)$ и i и их поворотов более сложные зависимости:

$$\begin{aligned} {}^{(1)}\Delta_{C,x}^{(i)\Lambda} &= {}^{(1)}q_3^{(i)} + {}^{(1)}\Delta_{C,x_1}^{(i)\Lambda} \cos^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}, & {}^{(1)}\Delta_{C,y}^{(i)\Lambda} &= {}^{(1)}q_1^{(i)} + {}^{(1)}\Delta_{C,y_1}^{(i)\Lambda} \sin^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}, \\ {}^{(1)}\Delta_{C,x}^{(i)\Pi} &= {}^{(1)}q_6^{(i)} + {}^{(1)}\Delta_{C,x_1}^{(i)\Pi} \cos^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}, & {}^{(1)}\Delta_{C,y}^{(i)\Pi} &= {}^{(1)}q_4^{(i)} + {}^{(1)}\Delta_{C,y_1}^{(i)\Pi} \sin^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}. \end{aligned} \quad (8)$$

Эта, найденная после первого шага нагружения, геометрия всех конечных элементов рамы является исходной для второго шага нагружения.

На рисунке 7 показаны положение расчетного сечения C и направления усилий ${}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_8^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)}$ в этом сечении на втором шаге нагружения с суммарной нагрузкой ${}^{(2)}P^{(i)} = {}^{(1)}P + \Delta {}^{(2)}P^{(i)}$.

Величины реакций в связях основной системы i -го КЭ определяются, исходя из его текущей геометрии, следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 {}^{(2)}R_{1,7}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}), & {}^{(2)}R_{2,7}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)} \left({}^{(1)}a_i^\Lambda \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda} + {}^{(1)}b_i^\Lambda \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}) \right), \\
 {}^{(2)}R_{3,7}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)} \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}), & {}^{(2)}R_{4,7}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}), \\
 {}^{(2)}R_{5,7}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)} \left(-{}^{(1)}a_i^\Pi \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi} + {}^{(1)}b_i^\Pi \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}) \right), & {}^{(2)}R_{6,7}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)} \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}), \\
 {}^{(2)}R_{1,8}^{(i)} &= 0, & {}^{(2)}R_{2,8}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_8^{(i)}, & {}^{(2)}R_{3,8}^{(i)} &= 0, & {}^{(2)}R_{4,8}^{(i)} &= 0, & {}^{(2)}R_{5,8}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_8^{(i)}, & {}^{(2)}R_{6,8}^{(i)} &= 0, \\
 {}^{(2)}R_{1,9}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)} \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}), & {}^{(2)}R_{2,9}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)} \left(-{}^{(1)}a_i^\Lambda \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda} + {}^{(1)}b_i^\Lambda \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}) \right), \\
 {}^{(2)}R_{3,9}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Lambda}), & {}^{(2)}R_{4,9}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)} \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}), \\
 {}^{(2)}R_{5,9}^{(i)} &= -{}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)} \left({}^{(1)}a_i^\Pi \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi} + {}^{(1)}b_i^\Pi \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}) \right), & {}^{(2)}R_{6,9}^{(i)} &= {}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_C^{(i)\Pi}).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 a_i^\Lambda &= \frac{l_i}{2} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_{i-1}^\Pi - {}^{(1)}\Delta_{C,x}^{(i)\Lambda}), & a_i^\Pi &= \frac{l_i}{2} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_i^\Lambda - {}^{(1)}\Delta_{C,x}^{(i)\Pi}), \\
 b_i^\Lambda &= \frac{l_i}{2} \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_{i-1}^\Pi - {}^{(1)}\Delta_{C,y}^{(i)\Lambda}), & b_i^\Pi &= \frac{l_i}{2} \left(2 \sin({}^{(0)}\alpha + \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_i^\Lambda) \right) + {}^{(1)}\Delta_{C,y}^{(i)\Pi}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

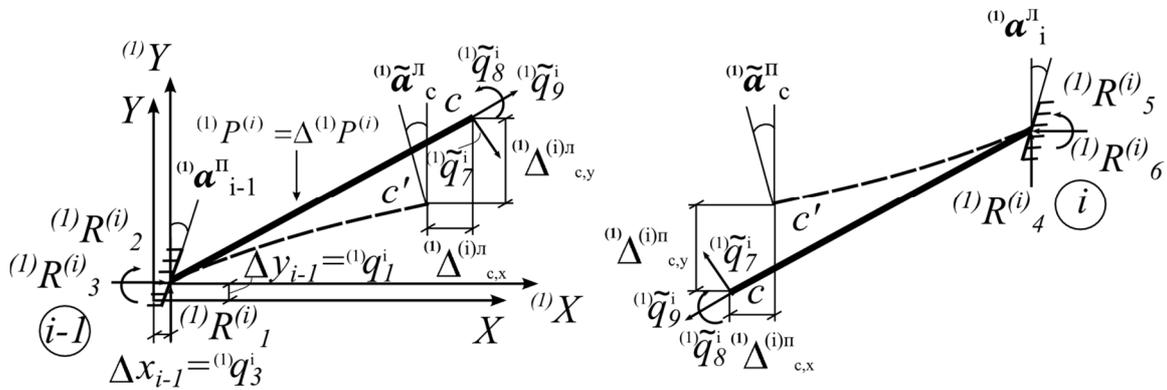


Рисунок 6 – К определению смещения сечения C после первого шага нагружения при переходе к глобальным осям координат

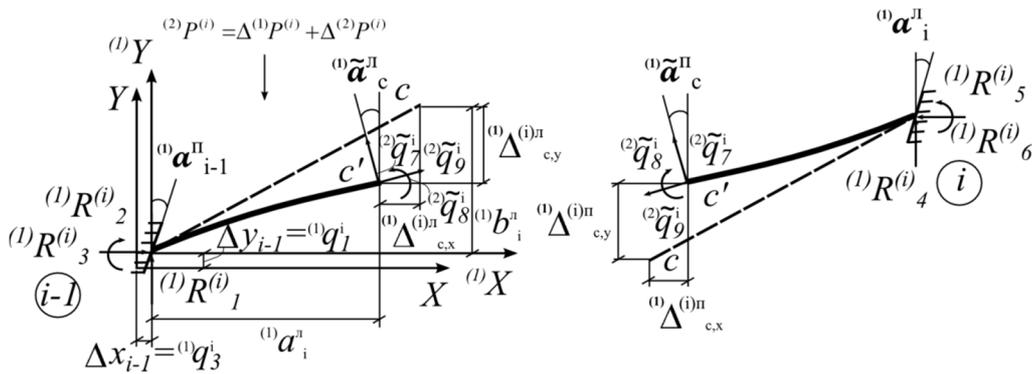


Рисунок 7 – Положение расчетного сечения C и направления усилий ${}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_8^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)}$ в этом сечении на втором шаге нагружения

Здесь

$$\begin{aligned}
 a_i^\Lambda &= \frac{l_i}{2} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_{i-1}^\Pi - {}^{(1)}\Delta_{C,x}^{(i)\Lambda}), & a_i^\Pi &= \frac{l_i}{2} \cos({}^{(1)}\tilde{\alpha}_i^\Lambda - {}^{(1)}\Delta_{C,x}^{(i)\Pi}), \\
 b_i^\Lambda &= \frac{l_i}{2} \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_{i-1}^\Pi - {}^{(1)}\Delta_{C,y}^{(i)\Lambda}), & b_i^\Pi &= \frac{l_i}{2} \left(2 \sin({}^{(0)}\alpha + \sin({}^{(1)}\tilde{\alpha}_i^\Lambda) \right) + {}^{(1)}\Delta_{C,y}^{(i)\Pi}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Система разрешающих уравнений на втором шаге догружения для i -го узла приведена ниже:

$$\begin{aligned}
 {}^{(2)}R_{y,i} &= \sum_{t=7}^9 ({}^{(2)}R_{4,t}^{(i)} + {}^{(2)}R_{1,t}^{(i+1)}) + {}^{(2)}R_{y,p}^{(i)} + {}^{(2)}R_{y,p}^{(i+1)} = 0; \\
 {}^{(2)}R_{x,i} &= \sum_{t=7}^9 ({}^{(2)}R_{6,t}^{(i)} + {}^{(2)}R_{3,t}^{(i+1)}) + {}^{(2)}R_{x,p}^{(i)} + {}^{(2)}R_{x,p}^{(i+1)} = 0; \\
 {}^{(2)}M_i &= \sum_{t=7}^9 ({}^{(2)}R_{5,t}^{(i)} + {}^{(2)}R_{2,t}^{(i+1)}) + {}^{(2)}M_p^{(i)} + {}^{(2)}M_p^{(i+1)} = 0; \\
 {}^{(2)}\Delta_7^{(i)} &= \sum_{j=1}^6 {}^{(2)}\Delta_{7,j}^{(i)} + \sum_{t=7}^9 ({}^{(2)}\Delta_{7,t}^{(i)} + {}^{(2)}\Delta_{7,p}^{(i)}) = 0; \\
 {}^{(2)}\Delta_8^{(i)} &= \sum_{j=1}^6 {}^{(2)}\Delta_{8,j}^{(i)} + \sum_{t=7}^9 ({}^{(2)}\Delta_{8,t}^{(i)} + {}^{(2)}\Delta_{8,p}^{(i)}) = 0; \\
 {}^{(2)}\Delta_9^{(i)} &= \sum_{j=1}^6 {}^{(2)}\Delta_{9,j}^{(i)} + \sum_{t=7}^9 ({}^{(2)}\Delta_{9,t}^{(i)} + {}^{(2)}\Delta_{9,p}^{(i)}) = 0.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Подставив в эти уравнения значения ${}^{(2)}\Delta_{s,t}^{(i)}$ и ${}^{(2)}R_{s,t}^{(i)}$ по (9)-(10) и (4)-(8) соответственно, получим в явном виде для каждого i -го КЭ систему разрешающих уравнений относительно девяти неизвестных – ${}^{(2)}\tilde{q}_7^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_8^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_9^{(i)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_4^{(i)} = {}^{(2)}\tilde{q}_1^{(i+1)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_5^{(i)} = {}^{(2)}\tilde{q}_2^{(i+1)}$, ${}^{(2)}\tilde{q}_6^{(i)} = {}^{(2)}\tilde{q}_3^{(i+1)}$.

Граничные условия остаются постоянными на всех шагах догружения.

Так как все неизвестные ${}^{(2)}q_t$ и нагрузка ${}^{(2)}P^{(i)}$ могут быть представлены в виде ${}^{(2)}q_t = {}^{(1)}q_t + \Delta {}^{(2)}q_t$, ${}^{(2)}P^{(i)} = {}^{(1)}P + \Delta {}^{(2)}P^{(i)}$, то произведя в системе уравнений (11) такую замену, получим разрешающую систему уравнений относительно приращений неизвестных в зависимости от приращения нагрузки на каждом шагу догружения.

На этом заканчивается расчет на втором шаге догружения и следует переход к третьему шагу. Система разрешающих уравнений на этом шаге получается по тому же алгоритму, что и на втором, т.е. с использованием тех же зависимостей и выражений, но с повышением в них верхних индексов (1) и (2) на (2) и (3) соответственно. Аналогично получают последовательно системы разрешающих уравнений на всех последующих шагах догружения.

Изложенный выше вариант алгоритма решения задачи, основанный на процедуре пошагового догружения и выполнения расчета в линейной постановке на каждом шаге с учетом новой геометрии системы, достигнутой на предыдущем шаге, исключает уточнение решения на каждом шаге.

Второй вариант алгоритма заключается в том, что уже на первом шаге нагружения рассматривается геометрически нелинейная задача. Для нее сразу записывается нелинейная система разрешающих уравнений (4-8) и (9-10) в которой необходимо заменить верхний индекс (2) на индекс (1).

Решение этой системы выполняется или методом последовательных приближений, или по методу Ньютона-Рафсона. За начальное (нулевое) приближение принимается решение линейной задачи по первому варианту для первого шага нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатьев, В.А. Смешанная форма метода конечных элементов в задачах строительной механики [Текст] / В.А. Игнатьев, А.В. Игнатьев, А.В. Жиделев. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. – 172 с.
2. Игнатьев, В.А. МКЭ в смешанной форме к расчету стержневых систем [Текст] / В.А. Игнатьев, А.В. Игнатьев // Известия ВУЗов. Строительство. – 2002. – №8. – С. 115-118.

В.А. Игнатьев

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика»
E-mail: alignat@gmail.com

А.В. Игнатьев

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика»
Тел.: +7 905 336 06 14
E-mail: alignat@gmail.com

V. IGNATYEV, A. IGNATYEV

**ANALYSIS OF PLANE FRAMES WITH LARGE NODAL
DISPLACEMENTS BY THE FINITE ELEMENT METHOD
IN THE FORM OF CLASSICAL MIXED METHOD**

The algorithm for assembling the system of governing equations for plane frames with large nodal displacements is presented that is based on the Finite Element Method in the form of classical mixed method and the incremental loading procedure. Two variants of the algorithm are considered. The first one is based on the procedure of stepwise loading with linear analysis in each step with respect to the new geometric configuration of the system reached in the previous step. The second version of the algorithm considers geometrically nonlinear problem from the first load step.

***Keywords:** FEM in the form of classical mixed method, plane frames, large nodal displacements.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ignat'ev, V.A. Smeshannaja forma metoda konechnyh jelementov v zadachah stroitel'noj mehaniki [Tekst] / V.A. Ignat'ev, A.V. Ignat'ev, A.V. Zhidelev. – Volgograd: VolgGASU, 2006. – 172 s.
2. Ignat'ev, V.A. MKJe v smeshannoju forme k raschetu sterzhnevnyh sistem [Tekst] / V.A. Ignat'ev, A.V. Ignat'ev // Izvestija VUZov. Stroitel'stvo. – 2002. – №8. – S. 115-118.

V. Ignatyev

Volgograd state university of architecture and civil engineering, Volgograd
Doctor of technical sciences, professor, head lecturer of the department «Structural mechanics»
E-mail: alignat@gmail.com

A. Ignatyev

Volgograd state university of architecture and civil engineering, Volgograd
Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Structural mechanics»
Ph.: +7 905 336 06 14
E-mail: alignat@gmail.com

НАЗАРОВ Ю.П., ПОЗНЯК Е.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН РЭЛЕЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ПО ЗАДАННОЙ АКСЕЛЕРОГРАММЕ

В работе приводится алгоритм и расчетные формулы для моделирования пространственно-временных процессов распространения поверхностных волн Рэлея. В качестве исходных данных используются упругие постоянные грунта и акселерограмма вертикального движения. Акселерограмма представляется в виде пакета монохроматических волн Рэлея, движущихся в пространстве с постоянной фазовой скоростью. Результатом моделирования являются ускорения вертикального и горизонтального движения частиц грунта в любой точке упругого пространства. Аналогично можно построить поля сейсмических перемещений и скоростей. Приводится пример расчета поля ускорений по акселерограмме вертикального движения землетрясения в Газли (14 мая 1976 г., 2048 точек, длительность 13,48 с).

Ключевые слова: сейсмические волны, волна Рэлея, дифференцированная схема сейсмического движения, поле сейсмических ускорений, акселерограмма.

При решении задач теории сейсмостойкости по дифференцированной схеме необходимы методики моделирования пространственно-временных сейсмических полей. Как распространяется в пространстве одна монохроматическая волна Рэлея известно [1-6]. Однако более реалистично выглядит случай, когда волны Рэлея движутся в составе волнового пакета, причем имеется запись этого движения в одной из точек пространства. Покажем, каким может быть алгоритм моделирования движения волн Рэлея по поверхности упругого полупространства, если в начале координат задана акселерограмма вертикального движения грунта.

Волновое движение в однородном упругом полупространстве будем описывать в осях $Ox_1x_2x_3$. Упругие свойства среды зададим с помощью параметров Ламе λ и μ или модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν [1-5]:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

где G – модуль сдвига. Напомним, что фазовые скорости объемных P - и S -волн в упругом пространстве равны соответственно:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

где ρ – плотность грунта.

Допустим, поверхностная волна Рэлея распространяется в направлении оси Ox_1 с угловой частотой ω и фазовой скоростью c_R . Период, длина и волновое число такой волны равны $T = \frac{2\pi}{\omega}$, $\lambda = \frac{2\pi c_R}{\omega}$ и $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Волна Рэлея плоская, поэтому частицы грунта совершают движение только в направлении осей Ox_1 и Ox_3 с перемещениями u_1 и u_3 соответственно, $u_2 = 0$.

Задача распространения волны Рэлея в упругом полупространстве имеет известное решение [2-4], полученное с точностью до константы C :

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_3, t) &= -C \left(e^{f_1(x_3)} - Q_1 e^{f_2(x_3)} \right) \sin \varphi(x_1, t), \\ u_3(x_1, x_3, t) &= -C \left(Q_3 e^{f_1(x_3)} - Q_2 e^{f_2(x_3)} \right) \cos \varphi(x_1, t), \end{aligned} \quad (1)$$

здесь введены обозначения:

$$Q_1 = 2 \frac{\sqrt{1-\alpha^2} \sqrt{1-L^2\alpha^2}}{2-\alpha^2}, \quad Q_2 = 2 \frac{\sqrt{1-L^2\alpha^2}}{2-\alpha^2}, \quad Q_3 = \sqrt{1-L^2\alpha^2},$$

$$L = \frac{c_2}{c_1}, \quad \alpha = \frac{c_R}{c_2}, \quad f_1(x_3) = kQ_3x_3, \quad f_2(x_3) = k(x_3\sqrt{1-\alpha^2}), \quad \varphi(x_1, t) = k(c_R t - x_1) = \omega t - kx_1.$$

Фазовая скорость волны Рэлея $c_R = \alpha c_2$, где α – решение нелинейного уравнения [2, 5].

$$(2-\alpha^2)^2 - 4\sqrt{1-\alpha^2} \sqrt{1-L^2\alpha^2} = 0, \quad \alpha \in [0, 1].$$

Поля скоростей и ускорений частиц грунта, инициированные прохождением волны Рэлея, задаются выражениями:

$$\dot{u}_1(x_1, x_3, t) = -C\omega \left(e^{f_1(x_3)} - Q_1 e^{f_2(x_3)} \right) \cos \varphi(x_1, t), \tag{2}$$

$$\dot{u}_3(x_1, x_3, t) = C\omega \left(Q_3 e^{f_1(x_3)} - Q_2 e^{f_2(x_3)} \right) \sin \varphi(x_1, t),$$

$$\ddot{u}_1(x_1, x_3, t) = C\omega^2 \left(e^{f_1(x_3)} - Q_1 e^{f_2(x_3)} \right) \sin \varphi(x_1, t), \tag{3}$$

$$\ddot{u}_3(x_1, x_3, t) = C\omega^2 \left(Q_3 e^{f_1(x_3)} - Q_2 e^{f_2(x_3)} \right) \cos \varphi(x_1, t).$$

На рисунке 1 показан пространственно-временной процесс распространения монохроматической волны Рэлея ($\omega=1$ рад/с, $C=1$) по поверхности грунта в направлении оси x_1 . Параметры грунта: $E=100$ МПа, $G=40$ МПа, $\nu=0,25$, кинематические параметры: $\alpha=0,9184$, $c_1=273,86$ м/с, $c_2=158,11$ м/с, $c_R=145,21$ м/с, $\lambda=912,40$ м.

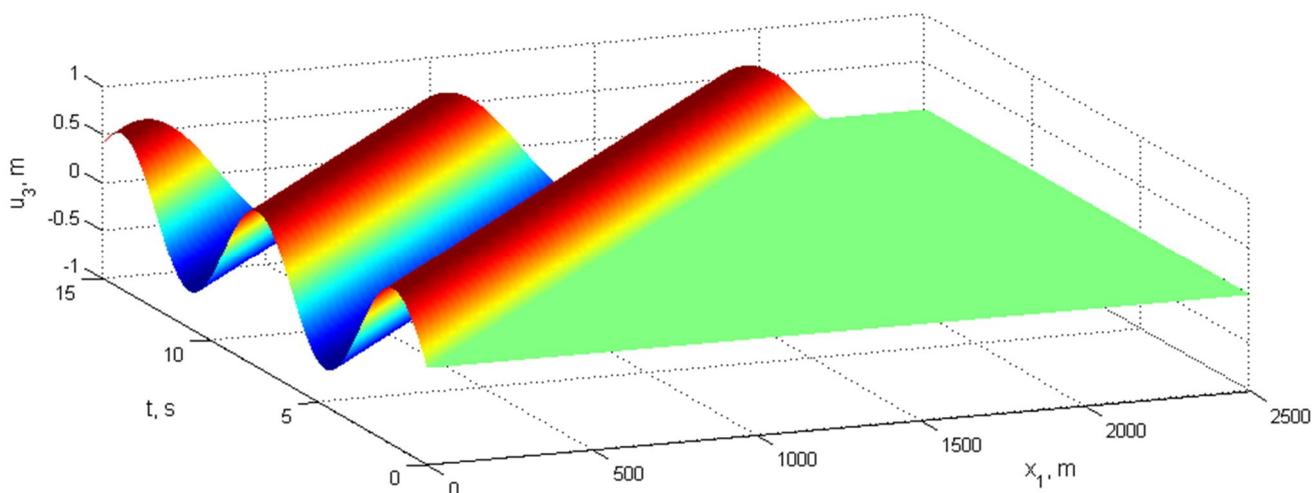


Рисунок 1 – Волна Рэлея. Вертикальные перемещения

Покажем, как на основе акселерограммы вертикального движения можно смоделировать пространственно-временное векторное поле сейсмического движения от волн Рэлея. Вертикальное движение грунта в начале координат O в направлении оси Ox_3 зададим в виде акселерограммы $a_3(t)$.

Разложим функцию $a_3(t)$ в ряд Фурье по косинусам. Для этого представим её как четную с периодом $2T$ (зеркально отразим график функции относительно оси ординат, а затем сместим результат по горизонтали на расстояния, кратные $2T$, получится четная функция с периодом $2T$, совпадающая с исходной на промежутке $[0, T]$). В этом случае функция $a_3(t)$ может быть разложена в ряд Фурье по косинусам [6]:

$$a_3(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{2\pi(n-1)}{2T} t, \quad (4)$$

где

$$A_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T a_3(\tau) \cos \frac{2\pi(n-1)\tau}{2T} d\tau, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Гармоника в сумме (4) с номером n имеет угловую частоту $\omega_n = \frac{\pi}{T}(n-1)$, длину волны $\lambda_n = \frac{2\pi}{\omega_n} c_R$, волновое число $k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n}$, $n=1, 2, 3, \dots$.

Представим имеющуюся акселерограмму как функцию дискретного аргумента. Допустим, акселерограмма a_3 содержит N точек с шагом Δt , длительность реализации $T = (N-1)\Delta t$. Значение времени в начале каждого интервала обозначим $t_j = (j-1)\Delta t$, j – номер отсчета, $j=1, \dots, N$. В моменты времени t_j функция принимает дискретные значения $a_3(t_j)$. Тогда $\omega_n = \frac{\pi}{T}(n-1) = \frac{\pi}{(N-1)\Delta t}(n-1)$, $n=1, \dots, N$. Сумма (4) из бесконечной превращается в финитную:

$$a_3(t_j) = \sum_{n=1}^N A_n \cos \omega_n t_j, \quad j=1, \dots, N. \quad (6)$$

Коэффициенты A_n , учитывая заранее оговоренную четность функции a_3 и четность функции косинуса, можно найти по финитному варианту формулы (5):

$$A_n = \frac{2}{(N-1)} \sum_{j=1}^N a_3(t_j) \cos \frac{\pi(n-1)(j-1)}{(N-1)}, \quad n=1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Набор постоянных A_n , соответствующих $a_3(t_j)$, можно определить по формуле (7) в любой математической программе.

Допустим, что вертикальное движение грунта является результатом прохождения пакета волн Рэлея – ограниченной во времени совокупности монохроматических волн, движущихся с единой фазовой скоростью c_R . Тогда в начале отсчета O ускорение вертикального движения грунта (3) от пакета волн Рэлея совпадает с заданной акселерограммой $\ddot{X}_3(t_j)$ по каждой гармонике из суммы (6). В точке O $x_1 = x_3 = 0$, $f_1(x_3) = 0$, $f_2(x_3) = 0$, $\varphi_n(t_j) = k_n c_R t_j = \omega_n t_j$, тогда:

$$\ddot{u}_{3(n)}(t_j) = C_n \omega_n^2 (Q_3 - Q_2) \cos \omega_n t_j = A_n \cos \omega_n t_j.$$

Таким образом, постоянные C_n могут быть определены из начальных условий:

$$C_n = \frac{A_n}{\omega_n^2 (Q_3 - Q_2)}. \quad (8)$$

Заметим, что при $n=1$ $\omega_1 = 0$. В формулах (3) квадрат угловой частоты – множитель при гармонических функциях. При подстановке найденной постоянной в (3) квадрат частоты сократится и неопределенности, возникающей при делении на нуль, не будет.

В результате формулы для пространственно-временного векторного поля ускорений от пакета монохроматических волн Рэлея (3), формирующих заданную акселерограмму $a_3(t_j)$ вертикального движения в начале координат, имеют вид:

$$\ddot{X}_1(x_1, x_3, t_j) = \frac{1}{Q_3 - Q_2} \sum_{n=1}^N A_n \left(e^{f_{1(n)}(x_3)} - Q_1 e^{f_{2(n)}(x_3)} \right) \sin \varphi_n(x_1, t_j),$$

$$\ddot{X}_3(x_1, x_3, t_j) = \frac{1}{Q_3 - Q_2} \sum_{n=1}^N A_n \left(Q_3 e^{f_{1(n)}(x_3)} - Q_2 e^{f_{2(n)}(x_3)} \right) \cos \varphi_n(x_1, t_j),$$
(9)

где

$$Q_1 = 2 \frac{\sqrt{1-\alpha^2} \sqrt{1-L^2\alpha^2}}{2-\alpha^2}, \quad Q_2 = 2 \frac{\sqrt{1-L^2\alpha^2}}{2-\alpha^2}, \quad Q_3 = \sqrt{1-L^2\alpha^2}, \quad L = \frac{c_2}{c_1}, \quad \alpha = \frac{c_R}{c_2},$$

$$f_{1(n)}(x_3) = k_n Q_3 x_3, \quad f_{2(n)}(x_3) = k_n \left(x_3 \sqrt{1-\alpha^2} \right), \quad \varphi_n(x_1, t) = k_n (c_R t - x_1) = \omega_n t - k_n x_1,$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{T} (n-1), \quad k_n = \frac{\omega_n}{c_R}, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \text{ константы } A_n \text{ перед расчетом определяются по}$$

формуле (7).

На рисунке 2 приведены акселерограммы $\ddot{X}_1(x_1, x_3, t_j)$ и $\ddot{X}_3(x_1, x_3, t_j)$ движения грунта от волн Рэлея, сгенерированные в точке O ($x_1 = x_3 = 0$) по акселерограмме вертикального движения a_3 (Газлийское землетрясение 14 мая 1976 г., 2048 точек, длительность 13,48 с). Полученная акселерограмма \ddot{X}_3 полностью совпадает с исходной.

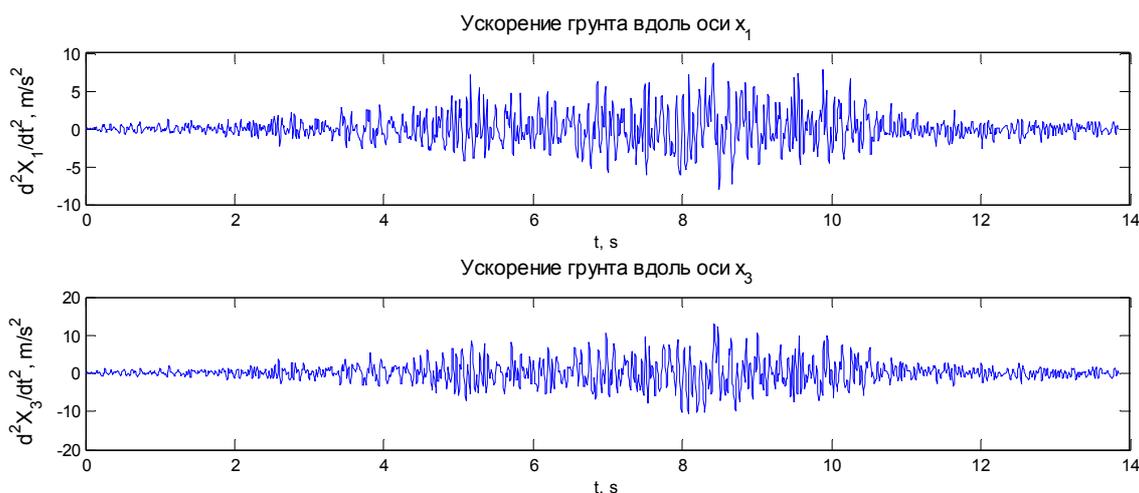
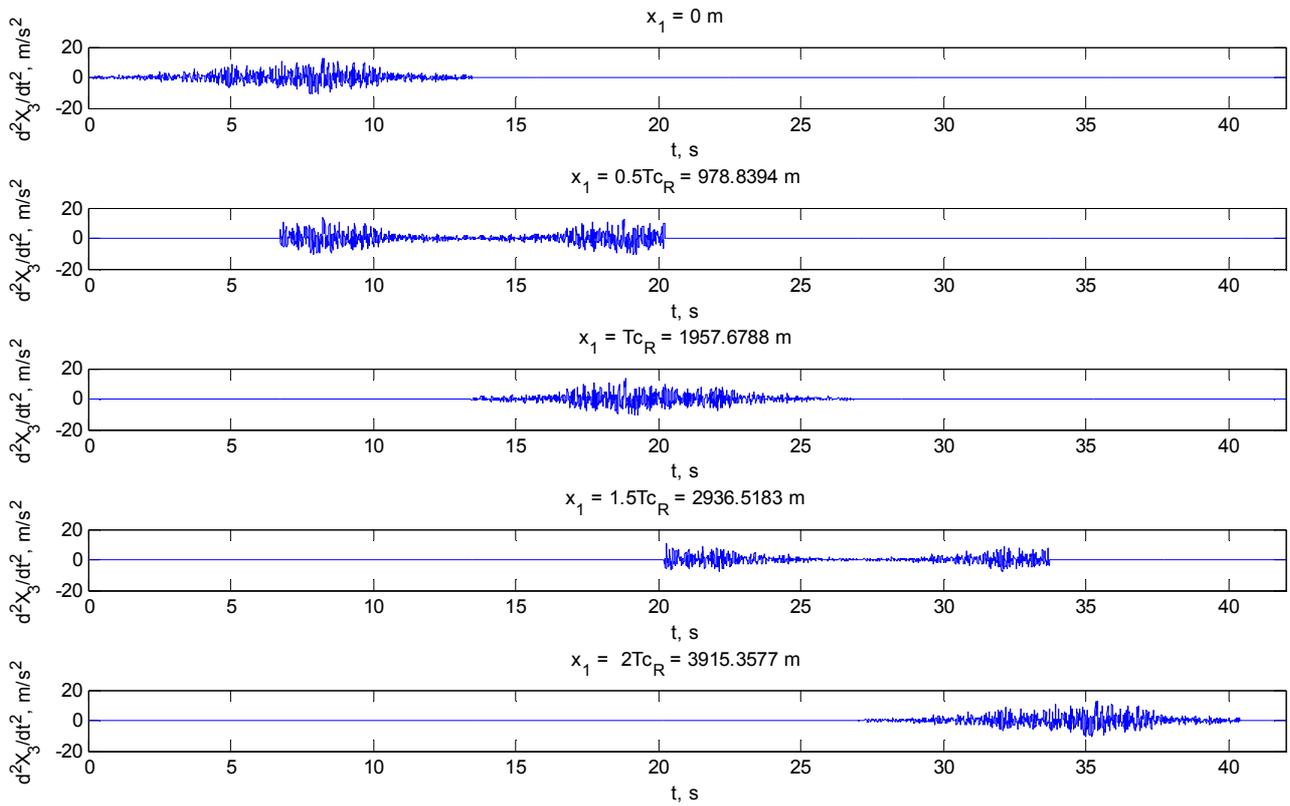


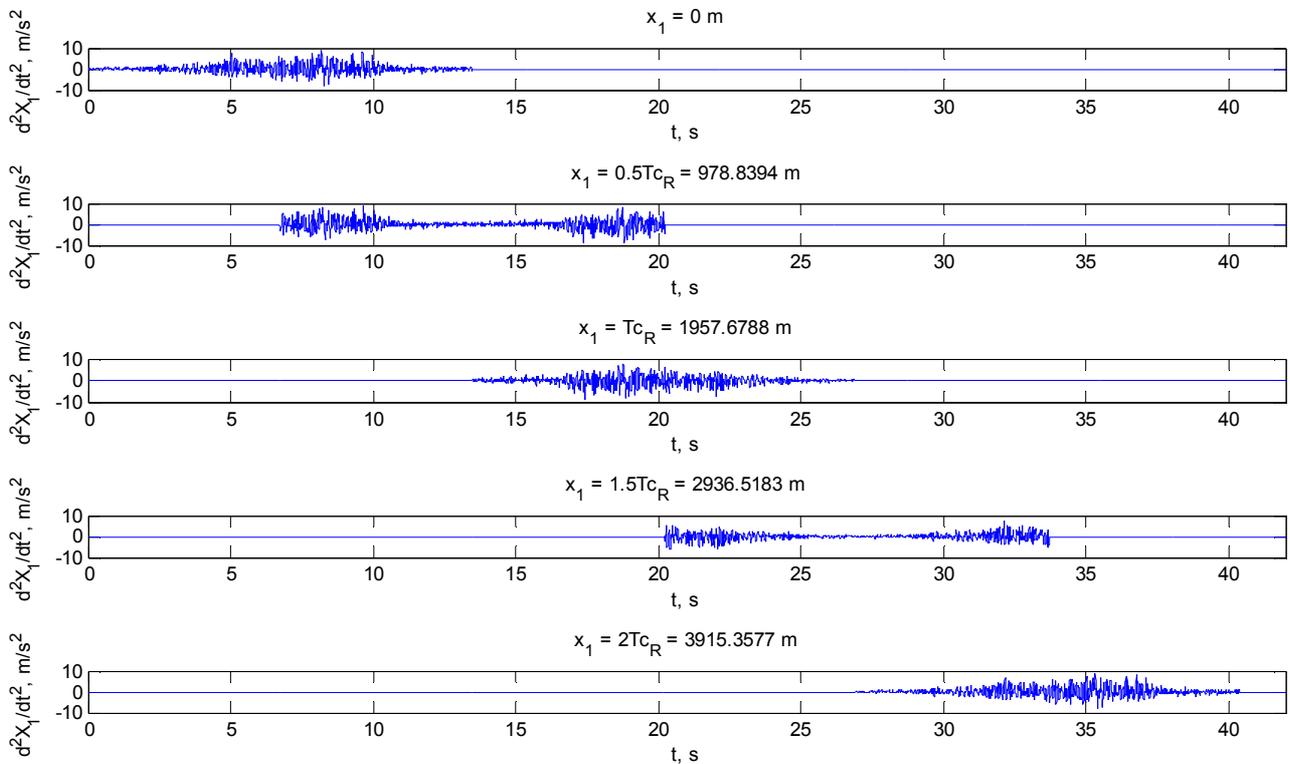
Рисунок 2 – Формирование поля ускорений от волн Рэлея. Акселерограммы

$$\ddot{X}_1(x_1, x_3, t_j) \text{ и } \ddot{X}_3(x_1, x_3, t_j) \text{ в точке } O$$

На рисунках 3 и 4 показаны акселерограммы $\ddot{X}_1(x_1, x_3, t_j)$ и $\ddot{X}_3(x_1, x_3, t_j)$ на поверхности грунта ($x_3 = 0$) при различных значениях координат x_1 точках пространства. Эти координаты были выбраны таким образом, чтобы показать разные фазы волнового процесса. Напомним, что при разложении функции $a_3(t)$ предполагалась периодичность исходной акселерограммы с периодом $2T$, обусловленная периодичностью волновых функций в формулах (1-3). Поэтому акселерограммы при $x_1 = 0$ и при $x_1 = 2Tc_R$ выглядят идентично, но со сдвигом по времени в $2T$. Промежуточные стадии волнового процесса $x_1 = 0.5Tc_R$, $x_1 = Tc_R$ и $x_1 = 1.5Tc_R$ по виду довольно сильно отличаются друг от друга. Это обусловлено различным запаздыванием составляющих с разными частотами.



**Рисунок 3 – Распространение волны Рэлея, $C_R=145,21$ м/с.
Вертикальное ускорение точек на поверхности грунта.
Длительность акселерограммы $T=13,48$ с, время наблюдения 42 с.**



**Рисунок 4 – Распространение волны Рэлея, $C_R=145,21$ м/с.
Горизонтальное ускорение точек на поверхности грунта.
Длительность акселерограммы $T=13,48$ с, время наблюдения 42 с.**

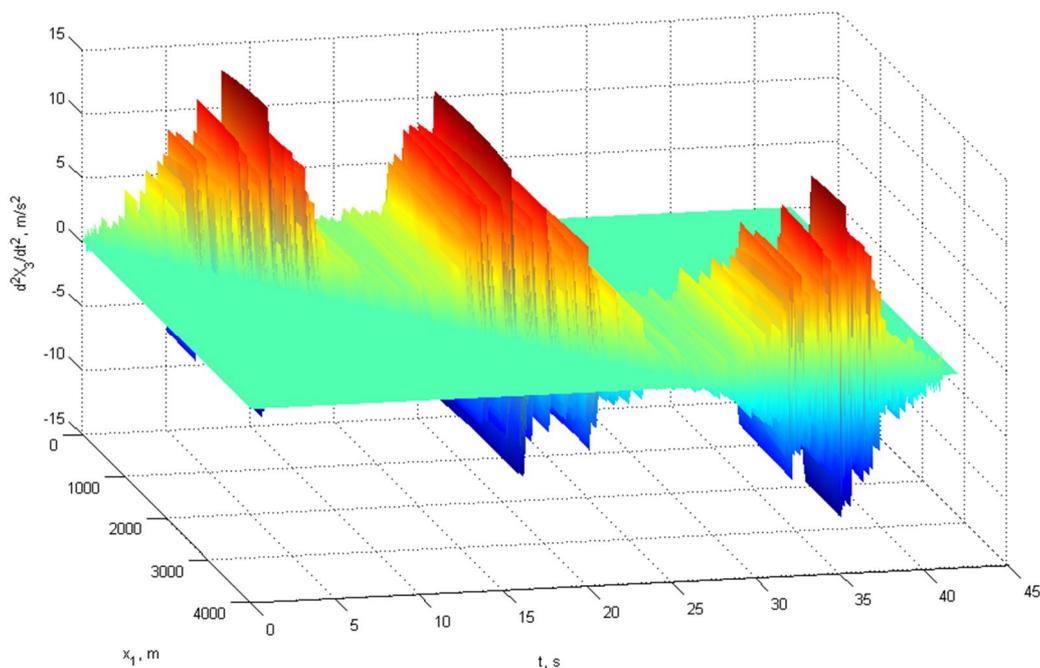


Рисунок 5 – Пространственно-волновой процесс распространения пакета волн Рэлея, смоделированный по заданной акселерограмме

В заключение добавим, что предложенный алгоритм может быть полезен не только для расчета по дифференцированной схеме протяженных в плане сооружений. Этот подход можно применять и для представления волн Рэлея в составе обобщенной волновой модели [3, 4, 8-10], удобной для формирования композиции объемных и поверхностных сейсмических волн, расчета ротаций, выбора наиболее опасной расчетной комбинации волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болт, Б. Землетрясения. Общедоступный очерк [Текст] / Б. Болт. – М.: Мир, 1981.
2. Саваренский, Е.Ф. Сейсмические волны [Текст] / Е.Ф. Саваренский. – М.: Недра, 1972.
3. Назаров, Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий [Текст] / Ю.П. Назаров. – М.: Наука, 2012.
4. Назаров, Ю.П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия [Текст] / Ю.П. Назаров. – М.: Наука, 2010. – 468 с.
5. Гаскин, В.В. Динамика и сейсмостойкость зданий и сооружений [Текст] / В.В. Гаскин, А.Н. Снитко, В.И. Соболев. – Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та, 1992.
6. Новацкий, В. Теория упругости [Текст] / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975.
7. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа [Текст] / П.И. Романовский. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.
8. Назаров, Ю.П. Анализ вида волновой модели и получение расчетных параметров сейсмического воздействия для высотного здания [Текст] / Ю.П. Назаров, Е.В. Позняк, А.В. Филимонов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №5. – С. 40-45.
9. Позняк, Е.В. О расчетах на сейсмостойкость с программным обеспечением «Еврософт Одиссей» [Текст] / Е.В. Позняк // Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». – 2013. – №5. – С. 22-24.
10. Nazarov Yuri P., Poznyak Elena V., Filimonov Anton V. Seismic Data Analysis in Odyssey Software. International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS), ISSN (Online): 2279-0055, ISSN (Print): 2279-0047, December 2013 – February 2014, Issue 7, Volume 1, pp. 75-77.

Ю.П. Назаров

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко, г. Москва
 Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко
 E-mail: Nazarov@eurosoft.com

Е.В. Позняк

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»
E-mail: PozniakYV@mpei.ru

YU. NAZAROV, E. POZNIAK

**SIMULATION OF SPATIAL PROPAGATION
OF RAYLEIGH WAVES IN ACCORDANCE WITH
A GIVEN ACCELEROGRAM**

This paper describes an algorithm and provides a practical procedure for the modeling spatial-temporal propagation of surface Rayleigh's waves. Input data include elastic constants of the ground and accelerogram of vertical ground movement. Accelerogram is represented as a package of monochromatic Rayleigh's waves moving in space with a constant phase velocity. A result of modeling is the accelerations of vertical and horizontal movements of ground particles at any point in the elastic space. Similarly, you can model fields of seismic displacements and velocities. For an example, calculation of seismic field in accordance with a accelerogram of vertical movement of Gazli earthquake (May 14, 1976, 2048 points, duration 13.48 c) is considered.

Keywords: seismic waves, Rayleigh wave, differentiated seismic motion, field of seismic accelerations, accelerogram.

BIBLIOGRAPHY

1. Bolt, B. Zemletrjasenija. Obshhedostupnyj ocherk [Tekst] / B. Bolt. – M.: Mir, 1981.
2. Savarenskij, E.F. Sejsmicheskie volny [Tekst] / E.F. Savarenskij. – M.: Nedra, 1972.
3. Nazarov, Ju.P. Raschetnye modeli sejsmicheskikh vozdeystvij [Tekst] / Ju.P. Nazarov. – M.: Nauka, 2012.
4. Nazarov, Ju.P. Analiticheskie osnovy rascheta sooruzhenij na sejsmicheskie vozdeystvija [Tekst] / Ju.P. Nazarov. – M.: Nauka, 2010. – 468 s.
5. Gaskin, V.V. Dinamika i sejsmostojkost' zdaniy i sooruzhenij [Tekst] / V.V. Gaskin, A.N. Snitko, V.I. Sobol'. – Irkutsk: Izd-vo Irkutsk. un-ta, 1992.
6. Novackij, V. Teorija uprugosti [Tekst] / V. Novackij. – M.: Mir, 1975.
7. Romanovskij P.I. Rjady Fur'e. Teorija polja. Analiticheskie i special'nye funkcii. Preobrazovanie Laplasy [Tekst] / P.I. Romanovskij. – M.: Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1973.
8. Nazarov, Ju.P. Analiz vida volnovoju modeli i poluchenie raschetnyh parametrov sejsmicheskogo vozdeystvija dlja vysotnogo zdaniya [Tekst] / Ju.P. Nazarov, E.V. Poznjak, A.V. Filimonov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014. – №5. – S. 40-45.
9. Poznjak, E.V. O raschetah na sejsmostojkost' s programmnyim obespecheniem «Evrosoft Odissey» [Tekst] / E.V. Poznjak // Prilozhenie k zhurnalu «Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal». – 2013. – №5. – S. 22-24.
10. Nazarov Yuri P., Poznyak Elena V., Filimonov Anton V. Seismic Data Analysis in Odyssey Software. International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS), ISSN (Online): 2279-0055, ISSN (Print): 2279-0047, December 2013 – February 2014, Issue 7, Volume 1, pp. 75-77.

Yu. Nazarov

Central research Institute of building constructions behalf of V.A. Kucherenko, Moscow
Doctor of technical sciences, professor
E-mail: Nazarov@eurosoft.com

E. Pozniak

National research university «MPEI», Moscow
Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Dynamics and strength of machines»
E-mail: PozniakYV@mpei.ru

САБОДАШ О.А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ САХАЛИНСКОГО ШЕЛЬФА

Постановка задачи вызвана тем, что на сегодняшний день не существует единого теоретического подхода к выбору нормативных значений параметров ледяного покрова и ледовых нагрузок. По мнению автора, это обусловлено высокой степенью пространственно-временной изменчивостью и неоднородностью ледяного покрова в акваториях нефтегазовых месторождений, разнообразием свойств морского льда при взаимодействии с конструкциями, а также несовершенством принятых в нормах различных стран расчетных моделей ледовой нагрузки. Сравнительный анализ ледовых нагрузок от ровных ледяных полей и торосистых образований на различные типы конструкций ледостойких оснований гравитационного типа на примере шельфа Охотского моря по методикам и рекомендациям различных норм проектирования выявил необходимость дальнейшего совершенствования теоретических и экспериментальных исследований, включая разработку численных и нейросетевых моделей ледовых нагрузок.

Ключевые слова: ледовые нагрузки, Сахалинский шельф, ровные ледяные поля, торосы, ледяной покров, нормирование, анализ.

При проектировании ледостойких сооружений различают глобальные и локальные (местные) ледовые нагрузки [11]. Глобальная нагрузка представляет суммарную нагрузку на сооружение и определяет общую устойчивость и общую прочность конструкции. Глобальные нагрузки делятся на горизонтальные и вертикальные. Расчет сооружений на действие локального давления льда играет важную роль в обеспечении прочности отдельных элементов конструкции платформы, в частности, местной прочности внешней обшивки и элементов подкрепляющего набора конструкции.

Глобальные нагрузки состоят из постоянной и переменной частей. Глобальные нагрузки могут быть статическими и динамическими. Определение глобальных нагрузок является основой экстремальных и усталостных оценок.

При определении квазистатической глобальной ледовой нагрузки на опоры стационарных ледостойких сооружений рекомендуется рассматривать воздействия [5]:

- от ровных ледяных полей;
- от дрейфующих торосов и айсбергов, а также ледяных островов;
- от наслоенного льда.

Проблема нормирования ледовых нагрузок на сооружения возникла в 60-е годы XX века в связи с исследованиями взаимодействия речного льда с различными гидротехническими сооружениями, а также проектированием маяков в Ботническом заливе. В связи с этим были разработаны нормы проектирования таких сооружений, в которых более обоснованно оценивались многие факторы, влияющие на ледовые нагрузки при взаимодействии льда с сооружениями. В основу расчета шельфовой конструкции была изначально заложена концепция предельных состояний, которая используется и по настоящее время практически во всех нормах.

Существующие нормативные документы США [4] и Канады [6], а также некоторых других стран [9], основываются на опыте проектирования и эксплуатации стационарных платформ для климатических условий залива Кука, моря Бофорта, Ботнического и Бохайского заливов, где применялись платформы свайного типа и гравитационные конструкции [11]. Российские стандарты [1-3] также не учитывают в полной мере специфику ледовых условий арктического шельфа, в частности, при оценках ледовых нагрузок от торосов, локального, динамического и истирающего воздействия льда.

В мировой практике на сегодняшний день не существует единого подхода к выбору нормативных значений параметров ледяного покрова и ледовых нагрузок. Некоторые иссле-

дователи предлагают в качестве расчетных принимать максимально возможные из имеющегося ряда наблюдений значения. Другие рекомендуют вводить в расчет наиболее вероятные значения. При проектировании конструкций для морских условий в настоящее время чаще всего используются вероятностно-статистические методы определения расчетных параметров ледяного покрова и нагрузок [11].

Большие расхождения в значениях расчетных ледовых нагрузок, определенных по существующим методикам различными исследователями [5, 7, 8, 10, 12, 13], обусловлены высокой степенью пространственно-временной изменчивостью и неоднородностью ледяного покрова, разнообразием свойств морского льда при взаимодействии с конструкциями, а также несовершенством принятых в нормах расчетных моделей ледовой нагрузки. Тем не менее, в последнее десятилетие отмечается значительный прогресс в совершенствовании расчетных методик оценки параметров ледового режима и ледовых нагрузок, действующих на сооружение [8].

Решение этой проблемы требует постановки широкого комплекса экспериментальных исследований ледового режима с целью определения наиболее вероятного диапазона и характера изменчивости функциональных параметров, обуславливающих величину и характер нагрузок в течение ледового периода, а также особенностей состояния системы «лед-сооружение» в конкретном физико-географическом районе.

Ледовый режим северо-восточного шельфа Сахалина является одним из самых тяжелых в южной части Охотского моря. В суровые зимы максимальные величины толщины льда достигают 90-160 см, максимальные значения скорости дрейфа льда достигают 74-110 см/с, при этом особенностью дрейфа льда является его реверсивный характер вблизи берегов и в районе морских месторождений [5].

Акватории в районах месторождений характеризуются постоянной деформацией ледяного покрова, сопровождающейся торосообразованием и разрушением ледяных полей. Высота паруса торосов в отдельных районах достигает 1,5÷3,0 м, ширина килля составляет порядка 60 м, а максимальная глубина килля тороса находится в диапазоне 20÷25 м.

Анализ ледовой обстановки на шельфе о. Сахалин показывает, что наиболее опасными с точки зрения уровня ледовых нагрузок являются [5]:

- ровные ледяные поля;
- наслоенный лед;
- однолетние торосы;
- всплывшие стамухи и обломки стамух.

При определении глобальной ледовой нагрузки на одиночные вертикальные опоры шельфовых сооружений Охотского моря рассматриваются сценарии воздействия ровных ледяных полей и торосов по рекомендациям различных нормативных методик, а также вероятностной модели, приведенной в работе [5]. Для анализа были взяты нормы проектирования Российской Федерации [1-3], Канады [6], США [4] и Международный стандарт [9].

Расчет ледовых нагрузок от ровных ледяных полей

Ледовые нагрузки на платформу «Моликпак» (широкое сооружение)

Платформа «Моликпак» (ПА-А), установленная на месторождении Пильтун-Астохское в 1998 г., представляет собой модернизированную буровую платформу ледового класса со следующими характеристиками: размеры основания 111×111 м; масса 37 523 т; глубина воды у сооружения 30 м.

Статистические характеристики изменчивости различных параметров ледяного покрова для различных месторождений были взяты на основании многолетних рядов наблюдений, полученных различными исследователями за период 80-90-х годов на шельфе Охотского моря. Моделирование расчетных параметров ледового режима осуществлялось методом Монте-Карло на основе имеющихся долговременных вероятностных распределений.

В таблице 1 представлены сопоставительные вычисления значений ледовых нагрузок на платформу «Моликпак» от ровных ледяных полей, выполненные по различным нормативным документам и методикам.

На рисунке 1 представлена диаграмма максимальных значений ледовых нагрузок от ровных ледяных полей, выполненных по различным методикам и исследованиям. На этом же рисунке нанесены результаты натурных наблюдений за давлением ровного льда на платформу «Моликпак», а также проектные значения ледовой нагрузки для этой платформы.

Таблица 1 – Результаты расчета нагрузок от ровных ледяных полей на платформу «Моликпак»

Характеристика	Нормы					
	СНиП [3]	ВСН [1]	API [4]	CSA [6]	ISO [9]	Регистр [2]
Минимальное значение ряда	20,003	0,003	0,002	0,002	99,629	337,301
Максимальное значение ряда	444,198	1228,824	439,977	292,493	267,273	549,634
Среднее значение ряда	73,252	264,916	205,540	126,757	165,204	508,799
Стандартное отклонение	56,953	185,758	106,853	81,342	61,872	21,330

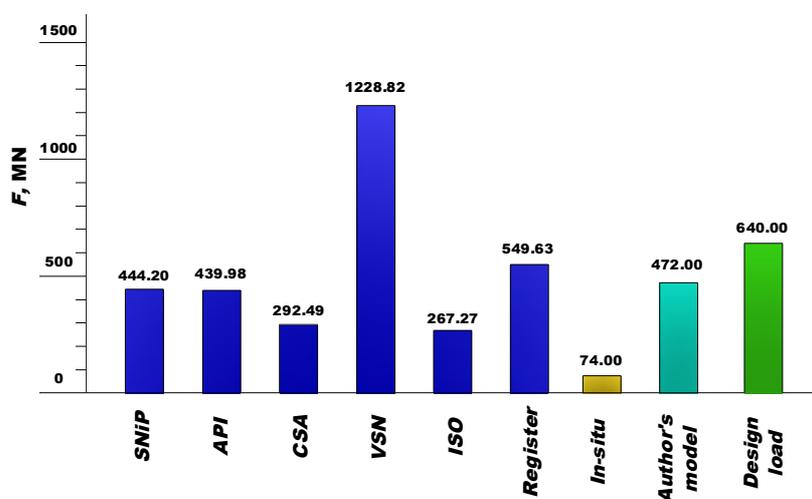


Рисунок 1 – Диаграмма максимальных значений ледовых нагрузок (MN) на платформу «Моликпак» по различным нормам и методикам

Ледовые нагрузки на платформу «Беркут» (многоопорное сооружение)

Ледостойкая стационарная платформа «Беркут» для Аркутун-Дагинского месторождения (проект «Сахалин-1») представляет собой железобетонное четырехопорное основание гравитационного типа (ЖОГТ), установленное в 2012 году на месторождении на глубине 33,6 м и рассчитанное на плановый срок службы 40 лет.

В таблице 2 представлены сопоставительные вычисления значений ледовых нагрузок на многоопорное сооружение (платформа Аркутун-Даги) от ровных ледяных полей, выполненные по различным методикам. На рисунке 2 представлена диаграмма максимальных значений ледовых нагрузок от ровных ледяных полей по различным нормативным расчетам. На этом же рисунке нанесены проектные значения нагрузки для платформы.

Таблица 2 – Результаты расчета нагрузок от ровных ледяных полей на платформу «Беркут»

Характеристика	Нормы				
	СНиП [3]	ВСН [1]	API [4]	CSA [6]	ISO [9]
Минимальное значение ряда	0,010	0,014	8,802	2,311	10,690
Максимальное значение ряда	394,714	833,250	303,450	215,202	121,019
Среднее значение ряда	4,850	108,702	84,026	42,112	42,721
Стандартное отклонение	15,450	119,994	78,288	52,879	28,993

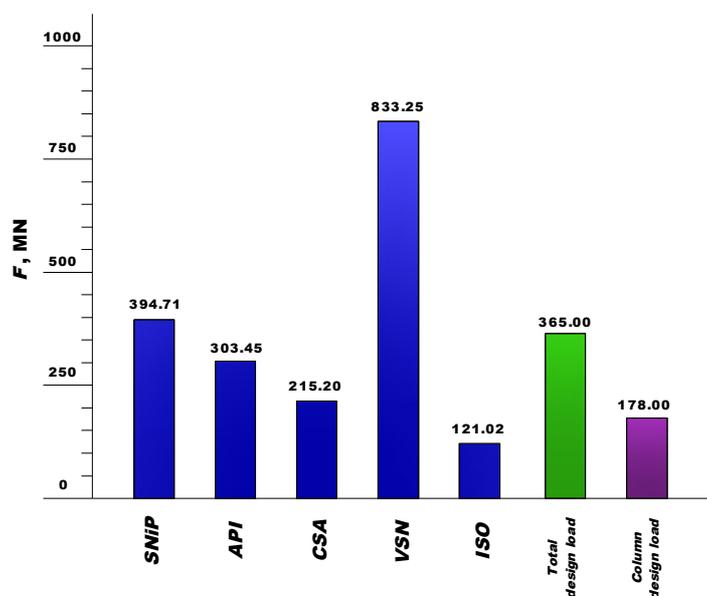


Рисунок 2 – Диаграмма максимальных значений нагрузки (МН) на платформу «Беркут» по различным нормам и методикам

Анализ результатов расчетов

Сопоставительные расчеты показывают, что имеется значительный разброс между величинами нагрузок, рассчитанных по различным методам. Так, отношение между максимальными значениями нагрузок по различным нормативным документам для ровного льда составило приблизительно 4,6 раза для широкого сооружения и 7,0 раз для многоопорного сооружения. Расхождение между максимальными и проектными значениями ледовой нагрузки составило приблизительно 100% для широкого сооружения и 130% – для многоопорного сооружения. В целом необходимо отметить, что глобальные ледовые нагрузки от ровных ледяных полей, определенные по нормам СНиП [2], ВСН [1] и Морского Регистра [2], во всех случаях превышают значения нагрузок, определенных по нормам API [4], CSA [6] и ISO [9].

Первая причина расхождения результатов в разнообразных методиках – это различный подход к оценке основных факторов, влияющих на величину ледовой нагрузки. Другой причиной, объясняющей разброс, является принятая математическая модель или метод оценки нагрузки, который зависит, в основном, от типа ледяного образования и сценария взаимодействия льда с конструкцией.

В рекомендациях СНиП [2], ВСН [1], Морского Регистра [2] рассматривается воздействие на сооружение двух типов ледяных образований: ровных ледяных полей и торосов. Влияние основных параметров учитывается в расчетных зависимостях по определению ледовой нагрузки как непосредственным путем, так и косвенно системой коэффициентов, таких как коэффициент формы опоры, коэффициент смятия, учитывающий пространственное напряженное состояние ледяного поля, коэффициент скорости.

Необходимо отметить, что между этими нормами существует значительное отличие при назначении величин каждого из этих коэффициентов. Например, коэффициент смятия в ВСН [1] превышает значения такого же коэффициента в СНиП [2] в 1,5÷2,0 раза. С учетом вышеуказанных факторов ледовые нагрузки на широкое и многоопорное сооружения с вертикальными гранями по ВСН [1] значительно превосходят значения по всем другим нормам.

В Морском Регистре [2], в отличие от других документов, впервые производится учет пространственно-временной изменчивости толщины льда путем введения коэффициента масштаба распределения толщины, однако, все остальные коэффициенты существенно не отличаются по значениям от рекомендаций СНиП [3]. В связи с этим анализ величин ледовых нагрузок, рассчитанных по этим нормам, показывает незначительное расхождение со значениями, полученными по СНиП [3].

В некоторых нормативных источниках апробирована практика введения в расчетные зависимости для определения ледовой нагрузки данных натурных исследований давления льда на реальные сооружения. Так, в нормах API [4] приведена эмпирическая зависимость для определения ледовой нагрузки на широкое сооружение, в которой давление льда рассчитывается с использованием данных натурных исследований реальных сооружений в зависимости от площади контакта льда и сооружения. Тем не менее, результаты расчета ледовой нагрузки по API [4] как на широкое сооружение, так и на многоопорное, имеют неплохое согласование с рекомендациями СНиП [3].

В нормах CSA [6] при оценке глобальной ледовой нагрузки на вертикальную опору сооружения также принята система коэффициентов, как и в российских нормах. Однако эти коэффициенты, кроме учета влияния толщины льда и параметра D/h на величину ледовой нагрузки, назначаются еще и в зависимости от степени суровости ледовых условий по географическим зонам распространения льда. Как результат, ледовые нагрузки по CSA имеют наиболее низкие значения по сравнению со всеми остальными методиками и рекомендациями. Методика расчета ледовых нагрузок по рекомендациям ISO [9] очень близка к нормам CSA [6], в связи с чем получились практически одинаковые значения нагрузок по этим двум документам.

Отдельно необходимо отметить расчет ледовых нагрузок от ровных ледяных полей по вероятностной модели Bekker A. и др. [5]. Отличие в результатах расчета ледовых нагрузок на «Моликпак» связано с более детальным учетом изменчивости ледового режима путем имитационного моделирования всех возможных расчетных ситуаций по оригинальной методике авторов статьи, хотя при этом методика детерминистического расчета ледовых нагрузок на «Моликпак» основывалась на рекомендациях СНиП [3].

В целом ледовые нагрузки от ровных ледяных полей на широкое сооружение типа «Моликпак», рассчитанные по СНиП [3], API [4], Морскому Регистру [2], по своим значениям имеют незначительные расхождения между собой и проектными данными. Нагрузки, рассчитанные по нормам CSA [6] и ISO [9], имеют несколько заниженное значение, что объясняется наличием большого количества коэффициентов, полученных эмпирическим путем, которые могут не охватывать особенности ледового режима Охотского моря.

Особенности взаимодействия ледяного покрова с многоопорными сооружениями заключаются в характере разрушения льда и напряженно-деформированного состояния ледяного покрова. На величину ледовых нагрузок на каждую опору и в целом на сооружение оказывает влияние количество опор, взаимное расположение и геометрия опор, расстояние между опорами, ориентация направления движения ледяного поля относительно фронта сооружения и некоторые другие факторы [11].

В некоторых нормах, таких как ВСН [1], СНиП [3], суммарная ледовая нагрузка на конструкцию зависит от количества опор и их взаимного влияния, пространственной неоднородности льда и направления его движения, а также неполноты соприкосновения между льдом и одной опорой. Вышеперечисленные факторы учитываются в расчетной зависимости по определению ледовой нагрузки системой коэффициентов, при этом имеется существенное отличие в значениях этих коэффициентов по СНиП [3] и ВСН [1], что и обуславливает большую разницу в величине ледовой нагрузки по этим нормам.

Согласно нормам ISO [9], расчетное значение горизонтальной ледовой нагрузки на многоопорную конструкцию, также как и в вышеперечисленных нормах, зависит от количества опор и их взаимного влияния в сооружении. Однако в этом нормативном документе путем введения понижающих коэффициентов рассматриваются два важных фактора: неодновременное достижение пиковых нагрузок на различных колоннах и забивание льдом пространства между опорами на максимальную ширину преграды, создаваемой опорами. В связи с этим глобальные нагрузки на сооружение, определенные по ISO [9], имеют наиболее низкие значения по сравнению со всеми другими нормами. В целом необходимо отметить, что неодновременное достижение пиковых нагрузок на различных колоннах совершенно не учитывается большинством норм, кроме ISO [9].

Нормами API [4] при проектировании многоопорных сооружений рекомендуется назначить достаточное расстояние между опорами в предположении их независимой работы. В нормативном документе API [4] отмечается, что для учета фактора взаимовлияния опор требуются дополнительные экспериментальные исследования и натурные наблюдения на существующих платформах. Поэтому рекомендуется нагрузки от ровного ледяного покрова определять как на отдельно стоящую опору в соответствии с принятыми в этих нормах методиками.

Анализ результатов расчетов показывает, что ледовые нагрузки по API [4] близки по своим значениям к расчетам по СНиП [3] и глобальной проектной нагрузке, рассчитанной для этого сооружения в предположении забивки льдом пространства между колоннами.

В нормах CSA [6] нет указаний по расчету ледовой нагрузки от ровных ледяных полей на многоопорное сооружение, вследствие чего получены значения ледовых нагрузок на каждую опору по методике, принятой в CSA [6] для одиночного сооружения с вертикальной гранью. Как видно из рисунка 2, результаты расчетов неплохо согласуются со значениями проектной ледовой нагрузки на отдельную колонну ледостойкой платформы «Беркут» [5].

Расчет ледовой нагрузки от торосистых образований

Ледовая нагрузка на платформу «Моликпак»

В таблице 3 представлены сопоставительные вычисления значений ледовых нагрузок на широкое сооружение от торосистых образований, выполненных по различным методикам. На рисунке 3 приведена диаграмма максимальных значений ледовых нагрузок от торосистых образований по различным нормативным расчетам и модели Веккер А. и др. [5]. На этом же рисунке нанесены результаты данных натурных наблюдений давления торосистого льда на платформу «Моликпак», а также проектные значения нагрузки для этой платформы.

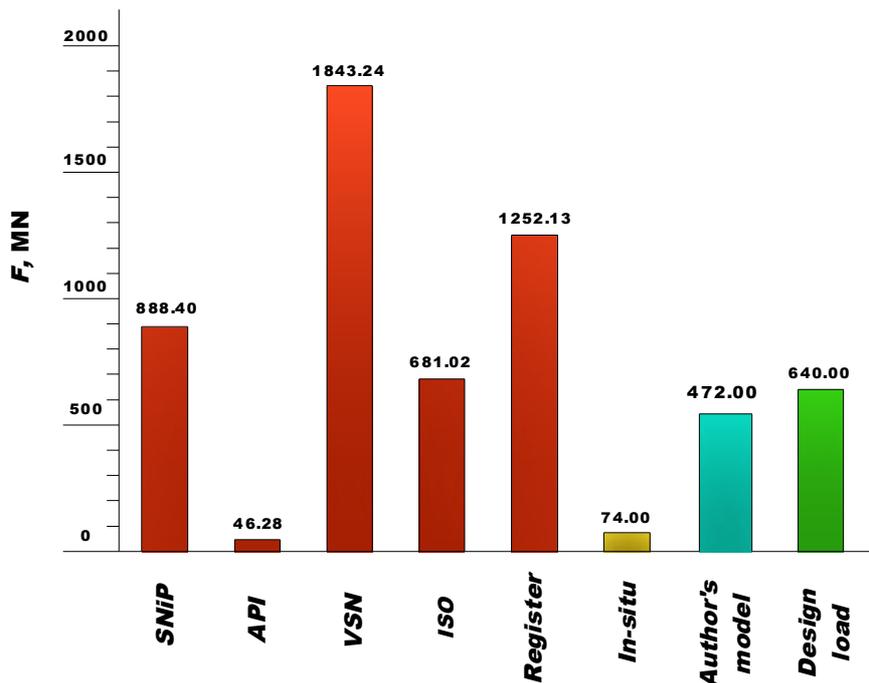


Рисунок 3 – Диаграмма максимальных значений нагрузки (МН) на платформу «Моликпак» по различным нормам и методикам

Ледовые нагрузки на платформу «Беркут»

Расчет ледовых нагрузок от торосов выполнен по рекомендациям Морского Регистра [2], СНиП [3] и ВСН [1], остальные нормативные документы не содержат методик определения нагрузок от торосистых образований на многоопорные сооружения. Максимальное значение ледовой нагрузки от торосов составило: по Морскому Регистру [2] – 210 МН; по ВСН [1] – 1670 МН; по СНиП [3] – 790 МН.

Таблица 3 – Результаты расчета нагрузок от торосов на платформу «Моликпак»

Характеристика	Нормы					
	СНиП [3]	ВСН [1]	API [4]	CSA [6]	ISO [9]	Регистр [2]
Минимальное значение ряда	40,00	0,004	0,060	-	31,656	425,674
Максимальное значение ряда	888,397	1843,236	46,275	-	681,024	1252,129
Среднее значение ряда	146,503	397,375	7,552	-	286,975	758,269
Стандартное отклонение	113,906	278,637	6,108	-	139,214	211,217

Анализ результатов расчетов

Сопоставительные расчеты показывают, что имеется значительная разница между результатами нагрузок, рассчитанных по различным методам (рис. 3). Так, отношение между максимальными значениями нагрузок по различным нормативным документам для торосистого льда составило приблизительно 15 для широкого сооружения. При этом ледовые нагрузки по API [4], которые имеют наиболее низкие значения, не учитывались в сравнении, так как по этим нормам необходимо проведение дополнительных исследований. По многоопорным сооружениям выполнить подобное сравнение вообще проблематично в связи с отсутствием в большинстве норм каких-либо рекомендаций по расчету ледовой нагрузки от торосов.

Большое расхождение в значениях ледовых нагрузок от торосов связано с особенностями этих ледяных образований и различными подходами в методологии оценки ледовых нагрузок от торосистых образований, принятых в различных нормах проектирования.

В нормах API [4] и ISO [9] нагрузка от торосов на вертикальную преграду представляется в виде независимых слагаемых – нагрузок от консолидированной части как от ледяной плиты, подводной части (киля) и надводной части тороса (паруса) как сыпуче-связанной среды Мора-Кулона. При этом в нормах ISO [9] нагрузкой от паруса тороса пренебрегается ввиду ее незначительного влияния на максимальное глобальное значение нагрузки.

Такой подход в настоящее время достаточно обоснован и подтверждается наблюдениями за воздействием торосистых образований на реальные сооружения, а также крупномасштабными экспериментами в ледовых бассейнах. Однако при оценке сопротивления подводной части в нормах API [4], в отличие от норм ISO [9], не учитывается как трехмерный характер взаимодействия, так и дополнительное нагромождение обломков перед опорой в процессе взаимодействия, что существенно занижает расчетную нагрузку от киля тороса, и как следствие, общую нагрузку на сооружение (рис. 3).

Для расчета нагрузок от консолидированной части тороса многими нормативными документами рекомендуется использовать методики, разработанные ими для ровного льда. Поскольку в большинстве норм принято, что основная часть ледовой нагрузки определяется разрушением у сооружения консолидированного слоя тороса, следует предположить, что причины большого разброса в результатах расчетов аналогичны указанным для случая ровного льда.

В нормативных документах СНиП [3], ВСН [1] и Морского Регистра [2] учет торосистости льда производится умножением значений нагрузок от ровного льда на коэффициент торосистости, зависящий от географического района расположения акватории. Анализ результатов расчета (рис. 3) показывает, что значения ледовых нагрузок по этим нормам с использованием коэффициента торосистости значительно увеличивает нагрузку на сооружение по сравнению со всеми другими нормативными методиками.

В целом анализ результатов расчетов ледовых нагрузок от торосов на различные типы конструкций ледостойких оснований показывает, что для уточнения и совершенствования нормативных методик необходимо дальнейшее всестороннее изучение морфометрических характеристик торосистых образований, прочностных свойств их элементов и механизма их воздействия на сооружение в реальных условиях акваторий обустройства месторождений.

Краткое обсуждение результатов расчета ледовых нагрузок от ровных ледяных полей и от торосов на конструкции широких и многоопорных сооружений приведено в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Обсуждение теоретических результатов расчета нагрузок от ровных ледяных полей

Нормы	Комментарии
СНиП [3], ВСН[1], Морской Регистр [2]	<p><u>ОБЩАЯ ТЕНДЕНЦИЯ РАСЧЕТА НАГРУЗОК В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u> В целом нагрузки в этой группе имеют неплохое согласование по значениям (кроме ВСН), что объясняется идентичным подходом к методике расчета нагрузок на основе различных коэффициентов.</p> <p><u>РАЗЛИЧИЯ В НАГРУЗКАХ МЕЖДУ НОРМАМИ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Основное различие связано с величиной коэффициента внедрения k_b. Значения этого коэффициента в СНиПе и Морском Регистре получены на основе представительных данных многолетних натурных исследований целого ряда авторов в различных акваториях и более обоснованы. Нагрузки по ВСН сильно завышены в связи с необоснованно большими значениями коэффициента внедрения k_b, рекомендуемого этими нормами. Согласно ВСН, это предельно возможное значение нагрузки из всех имеющихся рекомендаций для широкого и многоопорного сооружений. В Морском регистре отсутствуют рекомендации по расчету ледовой нагрузки от ровных ледяных полей на многоопорное сооружение.
API [4], CSA [6], ISO [9]	<p><u>ОБЩАЯ ТЕНДЕНЦИЯ РАСЧЕТА НАГРУЗОК В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u> В целом нагрузки в этой группе имеют неплохое согласование по значениям. Эти нормы рекомендуют более реалистические нагрузки от ровных ледяных полей, чем в предыдущей группе норм. Это связано с тем, что в расчетных зависимостях учитываются фактические данные натурных измерений давления льда на существующих сооружениях.</p> <p><u>ОБЩИЕ НЕДОСТАТКИ ПОДХОДА В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Эмпирические коэффициенты, зависящие от типа сооружения и W/h, назначены по зонам в зависимости от суровости ледовых условий моря Бофорта. Непосредственное применение этих коэффициентов без учета специфики ледовых условий Охотского моря может привести к заниженным оценкам нагрузки в этом регионе.
API [4], CSA [6], ISO [9]	<p><u>РАЗЛИЧИЯ В НАГРУЗКАХ МЕЖДУ НОРМАМИ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Нагрузки по ISO и CSA имеют более низкие значения для двух типов сооружений, чем по API, что объясняется более детальным учетом различных факторов путем эмпирических коэффициентов. <p>Нагрузки по API рассчитаны на основе натурных данных по давлению льда, без учета коэффициентов, что приводит к более реалистичным результатам.</p>
Натурные данные [13]	<ul style="list-style-type: none"> Небольшие значения нагрузок связаны, скорее всего, с очень малым (по сравнению со сроком службы сооружения) промежутком времени реальных измерений давления льда на корпус платформы «Моликпак» [13]. Для многоопорных сооружений подобные исследования вообще никогда не проводились в данном регионе Сахалинского шельфа.
<p>ВЫВОД: В целом, несмотря на разницу в теоретических подходах, отличие между этими двумя группами норм по значениям нагрузок незначительно: для широкого сооружения 100%, для многоопорного сооружения 130%.</p>	

Таблица 5 – Обсуждение теоретических результатов расчета ледовых нагрузок от торосистых образований

Нормы	Комментарии
СНиП [3], ВСН [1], Морской Регистр [2]	<p><u>ОБЩАЯ ТЕНДЕНЦИЯ РАСЧЕТА НАГРУЗОК ОТ ТОРОСОВ В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u> Во всех нормах есть рекомендации по расчету нагрузок от торосов на широкие и многоопорные сооружения. В целом в этой группе значения нагрузок существенно завышены, что объясняется объективными недостатками метода расчета на основе коэффициента торосистости, на который умножается нагрузка от ровного ледяного поля.</p> <p><u>ОБЩИЕ НЕДОСТАТКИ ПОДХОДА В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> значения коэффициента торосистости в зависимости от географического расположения моря недостаточно обоснованы; при расчете нагрузки не учитываются особенности строения торосистых образований, различие в свойствах их составных частей и специфики процесса разрушения каждой части в отдельности.
	<p><u>РАЗЛИЧИЯ В НАГРУЗКАХ МЕЖДУ НОРМАМИ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Нагрузки по ВСН завышены в связи с общей тенденцией завышения нагрузки от ровного льда по этим нормам.

	Нагрузки на многоопорное сооружение по Морскому Регистру более реалистичны в этой группе норм, т.к. в расчетной зависимости учитывается толщина наслоенного льда.
API [4], CSA [6], ISO [9]	<p><u>ОБЩАЯ ТЕНДЕНЦИЯ РАСЧЕТА НАГРУЗОК ОТ ТОРОСОВ В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u> более реалистические нагрузки от торосов, т.к. в расчетных зависимостях учитываются геометрические и физико-механические параметры торосистых образований.</p> <p><u>ОБЩИЕ НЕДОСТАТКИ ПОДХОДА В ДАННОЙ ГРУППЕ НОРМ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Нет рекомендаций по расчету нагрузок от торосов на многоопорные сооружения; • В CSA отсутствуют конкретные рекомендации по расчету ледовых нагрузок от торосов на широкие сооружения, при этом предлагается использовать численные модели ряда авторов. <p><u>РАЗЛИЧИЯ В НАГРУЗКАХ МЕЖДУ НОРМАМИ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • в API киль тороса рассматривается вместе с консолидированной частью как единое целое, при этом принята модель разрушения подводной части тороса как сыпуче-связанной среды Кулона-Мора. Такой подход не соответствует физическим свойствам и механике разрушения консолидированного слоя, что приводит к необоснованно низким значениям нагрузки; • в ISO нагрузкой от паруса пренебрегается, однако нагрузки от килля тороса и консолидированной части рассмотрены по отдельности, в соответствии с существующими объективными различиями в свойствах этих частей. Поэтому нагрузки по ISO можно считать более реалистичными, чем по всем другим нормам. Дальнейшее накопление статистических данных по свойствам торосистого льда позволит более точно назначать нагрузку по этим нормам.
Модель Bekker A. и др. [5]	<ul style="list-style-type: none"> • В имитационной модели общая нагрузка от тороса рассматривается как сумма всех трех составных частей с различными свойствами, при этом учитываются специфические особенности механики разрушения каждой из этих частей. Поэтому нагрузки от торосов по модели авторов находятся в более реалистичном диапазоне, близко к ISO [9].
Натурные данные [13]	<ul style="list-style-type: none"> • Небольшие значения нагрузок от торосистого льда связаны, скорее всего, с очень малым (по сравнению с сроком службы сооружения) промежутком времени реальных измерений давления льда на корпус платформы «Моликпак» [13]. Для многоопорных сооружений подобные исследования вообще никогда не проводились в данном регионе.
<p>ВЫВОД: Сравнительный анализ показал, что существует значительная разница между результатами расчета ледовых нагрузок от торосов, вычисленных по различным нормам: для широкого сооружения приблизительно 1300%, для многоопорного сооружения 300%. Половина норм не имеет рекомендаций по расчету нагрузок от торосов на многоопорные сооружения.</p>	

Выводы

Сопоставительные расчеты ледовых нагрузок от ровных ледяных полей и от торосов на различные конструкции шельфовых сооружений для условий Сахалина по методикам и рекомендациям различных действующих нормативных документов, натурным и проектным данным показывают широкий диапазон изменения ледовой нагрузки. Этот разброс вызван существующим на сегодняшний день различным подходом к оценке основных факторов, влияющих на величину ледовой нагрузки, а также различными моделями оценки нагрузки.

Сопоставительный анализ расчетов показывает, что по нормативным документам СНиП [3], ВСН [1] и Морского Регистра [2], а также вероятностной модели Bekker A. и др. [12, 13] ледовые нагрузки были значительно выше величин, полученных по всем остальным методикам. Тем не менее, применение расчетных зависимостей по определению ледовой нагрузки в этих нормах является более обоснованным для специфических тяжелых ледовых условий Охотского моря.

Воздействия торосистых ледяных образований на морские гидротехнические сооружения шельфа представляют наибольшую опасность. В целом необходимо отметить, что ледовые нагрузки от торосов имеют небольшое расхождение по различным нормам, кроме рекомендаций API [4]. Это объясняется введением в некоторые нормы недостаточно обоснованных значений коэффициента торосистости, что приводит к завышению нагрузки по сравнению с проектными данными по платформам и реально измеренному ледовым давлению.

Сопоставление ледовых нагрузок на многоопорные сооружения свидетельствует, что значения нагрузок, определенные по рекомендациям СНиП [3], ВСН [1] и Морского Регистра [2], оказываются значительно выше по сравнению с нагрузками по всем другим методикам.

Анализ действующих нормативных документов по определению ледовых нагрузок на сооружения в целом показал, что все существующие методики требуют серьезного совершен-

ствования, при этом необходимо проведение дальнейших экспериментальных, теоретических исследований и натурных измерений на построенных ледостойких сооружениях шельфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 41.88. Проектирование ледостойких стационарных платформ [Текст]. – М.: ВНИПИморнефтегаз Миннефтепрома СССР, 1988.
2. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП) [Текст]. – СПб: Изд-во Морского Регистра, 2008.
3. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [Текст]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
4. API RP 2N. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Structures and pipelines for Arctic Conditions. Second Edition, December 1, 1995. American Petroleum Institute, Washington, DC 20005.
5. Bekker, A., Sabodash, O., and Kochev, A. Analysis of Ice Loads on Offshore Structures for Okhotsk Sea Oil&Gas Fields // Proc. 30th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ-2011), Rotterdam, 2011, Vol. I, pp. 439-448.
6. CAN/CSA S471-04. General Requirements, Design Criteria, the Environment and Loads. Published as a National Standard of Canada in 2004 by the Canadian Standards Association, 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada L4W 5N6.
7. Comparison of International Codes for Ice Loads on Offshore Structures. PERD/CHC Report 11-20. Project 142211. Sandwell Engineering Inc., Vancouver, Canada 1998.
8. Frederking, R. Review of Standards for Ice Forces on Port Structures Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment © ASCE 2012, pp. 725-734.
9. ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and Natural Gas Industries – Arctic Offshore Structures. Final Draft. International Organisation for Standardization, ISO TC 67/SC 7, 2010.
10. Maattanen, M., and Lilja, V. Comparison of Existing Ice Load Design Recommendations. EU-Project STANDICE, Report No. TREN/04/FP6EN/S07.31041/503721, 2005.
11. Palmer, A., and Croasdale, K. Arctic Offshore Engineering. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd? 2012.
12. Shkhinek, K., Blanchet, D., Croasdale, K., Matskevitch, D., and Bhat, B. Comparison of the Russian and Foreign Codes and Methods for Global Load Estimations // Proc. 13th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ-1994), 1994, Vol. 4, pp. 75-82.
13. Timco, G., and Croasdale, K. How Well Can We Predict Ice Loads? // Proc. 18th Int. Symp. on Ice, IAHR'06, Sapporo, 2006, Vol. 1, pp. 167-174.

О.А. Сабодаш

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехника, теория зданий и сооружений»

Тел.: +7 914 790 12 43

E-mail: olga_sab67@mail.ru

O. SABODASH

COMPARATIVE ANALYSIS OF GLOBAL ICE LOADS ON THE ENGINEERING STRUCTURES SAKHALIN OFFSHORE

The author have made a comparative analysis of global ice loads on wide structure and multi-legged structure in the ice conditions of the Sea of Okhotsk according to the procedures and guidelines from different Codes. The comparative analysis shows that there is a significant difference between ice loads calculated under different methods. Analysis of the existing standards in part of calculation of ice loads on structures showed, as a whole, that the procedures and techniques require a serious improvement, and it is necessary to carry out further experimental and theoretical investigations including full-scale measurements on the existing offshore structures.

Keywords: ice loads, Sakhalin offshore, level ice fields, hummocks, design codes, analysis.

BIBLIOGRAPHY

1. VSN 41.88. Proektirovanie ledostojkih stacionarnyh platform [Tekst]. – M.: VNIPI morneftegaz Minnefteproma SSSR, 1988.
2. Pravila klassifikacii, postrojki i oborudovanija plavuchih burovyh ustanovok (PBU) i morskikh stacionarnyh platform (MSP) [Tekst]. – SPb: Izd-vo Morskogo Registra, 2008.
3. SNiP 2.06.04-82*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov) [Tekst]. – M.: CITP Gosstroja SSSR, 1989.
4. API RP 2N. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Structures and pipelines for Arctic Conditions. Second Edition, December 1, 1995. American Petroleum Institute, Washington, DC 20005.
5. Bekker A., Sabodash, O., and Kochev, A. Analysis of Ice Loads on Offshore Structures for Okhotsk Sea Oil&Gas Fields // Proc. 30th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-2011), Rotterdam, 2011, Vol. I, pp. 439-448.
6. CAN/CSA S471-04. General Requirements, Design Criteria, the Environment and Loads. Published as a National Standard of Canada in 2004 by the Canadian Standards Association, 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada L4W 5N6.
7. Comparison of International Codes for Ice Loads on Offshore Structures. PERD/CHC Report 11-20. Project 142211. Sandwell Engineering Inc., Vancouver, Canada 1998.
8. Frederking, R. Review of Standards for Ice Forces on Port Structures Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment © ASCE 2012, pp. 725-734.
9. ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and Natural Gas Industries – Arctic Offshore Structures. Final Draft. International Organisation for Standardization, ISO TC 67/SC 7, 2010.
10. Maattanen, M., and Lilja, V. Comparison of Existing Ice Load Design Recommendations. EU-Project STANDICE, Report No. TREN/04/FP6EN/S07.31041/503721, 2005.
11. Palmer, A., and Croasdale, K. Arctic Offshore Engineering. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd? 2012.
12. Shkhinek, K., Blanchet, D., Croasdale, K., Matskevitch, D., and Bhat, B. Comparison of the Russian and Foreign Codes and Methods for Global Load Estimations // Proc. 13th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-1994), 1994, Vol. 4, pp. 75-82.
13. Timco, G., and Croasdale, K. How Well Can We Predict Ice Loads? // Proc. 18th Int. Symp. on Ice, IAHR'06, Sapporo, 2006, Vol. 1, pp. 167-174.

O. Sabodash

Far Eastern federal university, Vladivostok

Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Hydraulic engineering, theory of buildings and structures»

Ph.: +7 914 790 12 43

E-mail: olga_sab67@mail.ru

СОКОЛОВ Б.С., РАДАЙКИН О.В.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРИВИЗНЫ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВДОЛЬ ПРОЛЁТА С УЧЕТОМ СОВМЕЩНОГО ДЕЙСТВИЯ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ И ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ

Целью данной работы ставилось определение кривизны бетонных и железобетонных балок вдоль их пролёта на всех этапах нагружения с учетом совместного действия перерезывающих сил и изгибающих моментов. Для этого использована методика [2], полученная на основе нелинейной деформационной модели, которая позволяет наглядно отразить действительную работу конструкций с учётом неупругих свойств материалов и развития нормальных трещин на всех характерных участках деформирования вдоль пролёта. Установлено, что для рассмотренных в статье железобетонных балок максимальные кривизны в середине пролёта, полученные по предложенной методике, на 30% превышают результаты по методу предельных состояний СП 63.13330.2012 (что, как показывают расчёты, зависит от уровня нагрузки), а для бетонных балок данные практически совпадают. Далее предполагается рассмотреть влияние других схем нагружения балок различной геометрии, изменение процента продольного армирования, вида диаграмм деформирования материалов, развития наклонных трещин, наличия предварительно напряжённой арматуры, а также вопрос о перераспределении усилий в статически неопределимых конструкциях.

Ключевые слова: железобетон, пролёт среза, изгибающий момент, перерезывающая сила, прогиб, нелинейная деформационная модель, диаграмма деформирования.

В последнее время в российские и зарубежные нормы проектирования железобетонных конструкций широко внедряется нелинейная деформационная модель. Она позволяет рассчитывать конструкции по обеим группам предельных состояний на основе единого подхода, что даёт возможность описывать их напряженно-деформированное состояние на всех стадиях нагружения – от нуля вплоть до разрушения. Однако в подавляющем большинстве случаев расчёт, к примеру, изгибаемых элементов, с использованием этой модели выполняется только на действие изгибающих моментов, а перерезывающие силы не учитывают. Такое упущение присутствует и в отечественном СП 63.13330.2012. В развитие диаграммного метода, изложенного в нормах, в работах [1, 2], внимание уделено расчёту изгибаемых элементов на совместное действие этих двух силовых факторов. Так, в статье [1] проведено компьютерное многофакторное моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок в «пролёте среза», что послужило основой для разработки усовершенствованной диаграммной методики расчёта прогибов бетонных и железобетонных изгибаемых конструкций [2].

Целью данной работы ставилось определение кривизны бетонных и железобетонных балок вдоль их пролёта на всех этапах нагружения с учетом совместного действия перерезывающих сил и изгибающих моментов.

Для этого по предложенному в [2] алгоритму выполнен расчёт бетонных и железобетонных элементов по обширной программе численных исследований, которую для сокращения объёма статьи здесь не приводим. В программе за базовую модель принята шарнирно опертая однопролётная железобетонная балка со следующими характеристиками: пролётом $l=6$ м, высотой и шириной прямоугольного сечения $h=l/6=1,0$ м, $b=0,5h=0,5$ м, изготовленная из бетона класса В25, с симметричным армированием у верхней и нижней грани арматурой класса А400 (процент армирования $\mu=0,837\%$); с расстоянием от грани бетона до центра тяжести $a=a'=0,03$ м. Для описания работы бетона использованы ранее предложенные диаграммы состояния [3, 4], для арматуры – двухлинейная диаграмма Прандтля по СП 63.13330.2012.

В работе исследовано влияние следующих факторов (рис. 1):

1 – тип расчётной схемы: рассмотрены балки, нагруженные равномерно распределённой нагрузкой « q » либо двумя сосредоточенными силами « P », расположенными симметрично относительно середины пролёта – на $1/3$ его длины от каждой из опор;

2 – наличие или отсутствие продольного армирования на примере железобетонных и бетонных балок (для того, чтобы отдельно оценить вклад бетона и арматуры в работу конструкции);

3 – величина нагрузок « q » или « P » для соответствующей схемы нагружения, которая подбиралась таким образом, чтобы вызвать в максимально нагруженном сечении (в середине пролёта) изгибающий момент равный:

– в железобетонных балках – $M=2M_{crc}<M_{ult}$ (где M_{crc} и M_{ult} – соответственно момент образования трещин и предельный момент), что соответствует $q=2q_{crc}<q_{ult}$ ($P=2P_{crc}<P_{ult}$);

– в бетонных балках – $M=M_{crc}$ (условие разрушения бетонных балок), что соответствует $q=q_{crc}=q_{ult}$ ($P=P_{crc}=P_{ult}$).

На рисунке 1, а-г показаны графики изменения кривизны нейтральной оси балок вдоль пролёта, которая определена из упругого расчёта (кривые «1») по методике, предложенной в [2] (кривые «2»), и по методу предельных состояний СП 63.13330.2012 (кривые «3»). Они позволяют сравнить деформации бетонных и железобетонных балок после появления трещин.

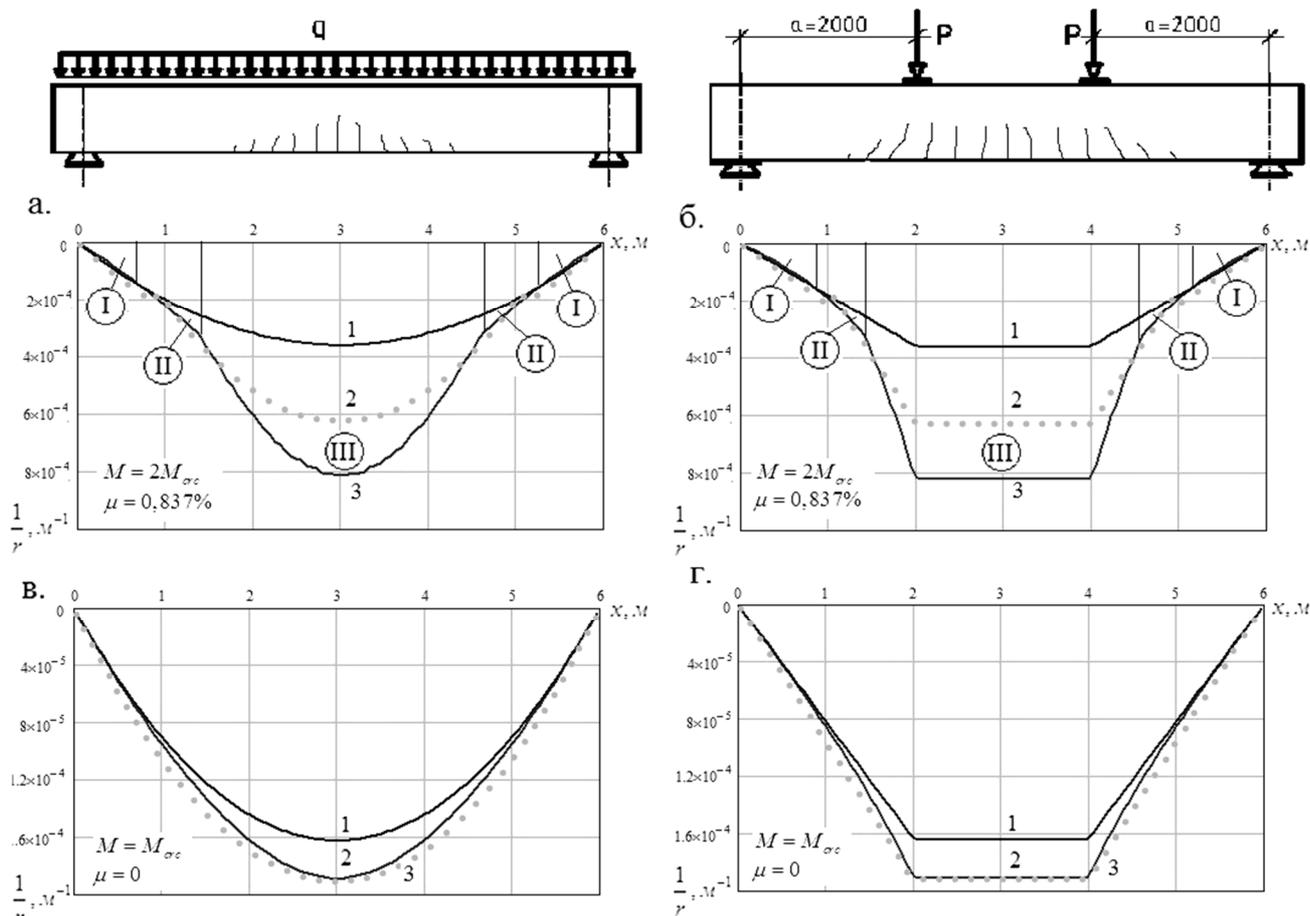


Рисунок 1 – Графики изменения кривизны нейтральной оси балок вдоль пролёта при нагрузке $q=2q_{crc}$ (а), $P=2P_{crc}$ (б), $q=q_{crc}$ (в) и $P=P_{crc}$ (г): 1 – упругая кривизна; 2 – нелинейный расчёт [2]; 3 – метод предельных состояний СП 63.13330.2012

Из рисунка 1 видно, что в середине пролёта нелинейные кривизны (кривые «2») бетонных и железобетонных балок превышают упругие соответственно в 1,2 и 2,3 раза. При этом для железобетонных балок максимальные кривизны, полученные по методике [2], на 30% превышают результаты по СП 63.13330.2012 (что, как показывают расчёты, зависит от уровня нагрузки), а для бетонных балок данные практически совпадают.

Следует также отметить, что максимальные кривизны, полученные для двух различных схем нагружения балок – равномерно распределённой нагрузкой и сосредоточенными силами – практически совпадают.

Кроме того, на рисунке 1 *а, б* можно выделить три характерные зоны работы железобетонных балок:

I – зона упругой работы (стадия I);

II – зона неупругой работы бетона (стадия I, *а*);

III – зона неупругой работы материалов и развития трещин вплоть до разрушения (стадии II и III).

Выводы

Таким образом, предложенная методика [2] оценки кривизны балок позволяет наглядно отразить их действительную работу с учётом нелинейных свойств материалов и развития нормальных трещин на всех характерных участках деформирования вдоль пролёта. При этом также учитывается совместное действие изгибающих моментов и перерезывающих сил.

Для рассмотренных в статье железобетонных балок максимальные кривизны в середине пролёта, полученные по методике [2], на 30% превышают результаты по методу предельных состояний СП 63.13330.2012 (что, как показывают расчёты, зависит от уровня нагрузки), а для бетонных балок данные практически совпадают.

Заключение

Полученные в данной работе результаты являются очередным этапом наших исследований, направленных на совершенствование методики расчёта железобетонных конструкций по двум группам предельных состояний с применением нелинейной деформационной модели. Далее предполагается рассмотреть влияние других схем нагружения, отношения l/h и a/h , процента продольного армирования, вида диаграмм деформирования материалов, развития наклонных трещин, наличия предварительно напряжённой арматуры, а также вопрос о перераспределении усилий в статически неопределимых конструкциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, Б.С. Исследование напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных изгибаемых элементов в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил [Текст] / Б.С. Соколов, О.В. Радайкин // VIII Академические чтения РААСН. Международная научно-технической конференции «Механика разрушения строительных материалов и конструкций». – Казань, 18-20 сентября, 2014. – С. 312-317.
2. Соколов, Б.С. К расчёту прогибов изгибаемых железобетонных элементов с учётом совместного действия изгибающих моментов и перерывающих сил с использованием нелинейной деформационной модели [Текст] / Б.С. Соколов, О.В. Радайкин // Известия КазГАСУ. – Казань. – 2013. – №4(30). – С. 113-120.
3. Карпенко, Н.И. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры [Текст] / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин // Журнал «Строительство и реконструкция». – Орёл: ОрелГТУ. – 2012. – №2. – С. 11-20.
4. Карпенко, Н.И. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона для расчёта железобетонных конструкций по деформационной модели [Текст] / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин // Промышленное и гражданское строительство. – М. – 2013. – №1. – С. 25-27.

Б.С. Соколов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции»

E-mail: sokolov@ksaba.ru

О.В. Радайкин

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань

E-mail: olegxxii@mail.ru

TO THE DEFINITION OF THE CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE ELEMENTS CURVATURE ALONG THE SPAN, TAKING INTO ACCOUNT THE COMBINED ACTION OF BENDING MOMENTS AND SHEAR FORCES

The purpose of this paper sets specific curvature of concrete and reinforced concrete beams along their span at all stages of loading, taking into account the combined action of shear forces and bending moments. To do this, used the method of [2] obtained on the basis of the nonlinear deformation model that allows to visually reflect the actual work of construction taking into account the inelastic properties of materials and the development of normal cracks at all typical areas of deformation along the span. It was found that for the considered article reinforced concrete beams maximum curvature in the middle of the span, obtained by the proposed method, 30% higher than the results of the method of limiting states SP 63.13330.2012 (which, as shown by calculations depends on the load), and for concrete beams data practically coincide. It is further assumed to consider the influence of other schemes of loading beams of different geometry, the percentage change of the longitudinal reinforcement types of charts deformation of materials, development of inclined cracks, presence prestressed reinforcement, as well as the issue of redistribution of forces in statically indeterminate structures.

Keywords: reinforced concrete, shear span, bending moment, shear force, bending, nonlinear deformation model, stress-strain diagram.

BIBLIOGRAPHY

1. Sokolov, B.S. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija betonnyh i zhelezobetonnyh izgibaemyh jelementov v zone sovместnogo dejstvija izgibajushhih momentov i poperechnyh sil [Tekst] / B.S. Sokolov, O.V. Radajkin // VIII Akademieskie chtenija RAASN. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mehanika razrushenija stroitel'nyh materialov i konstrukcij». – Kazan', 18-20 sentjabrja, 2014. – S. 312-317.
2. Sokolov, B.S. K raschjotu progibov izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov s uchjotom sovместnogo dejstvija izgibajushhih momentov i pereryvajushhih sil s ispol'zovaniem nelinejnoj deformacionnoj modeli [Tekst] / B.S. Sokolov, O.V. Radajkin // Izvestija KazGASU. – Kazan'. – 2013. – №4(30). – S. 113-120.
3. Karpenko, N.I. K opredeleniju deformacij izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov s ispol'zovaniem diagramm deformirovanija betona i armatury [Tekst] / N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radajkin // Zhurnal «Stroitel'stvo i rekonstrukcija». – Orjol: OrelGTU. – 2012. – №2. – S. 11-20.
4. Karpenko, N.I. Analiz i sovershenstvovanie krivolinejnyh diagramm deformirovanija betona dlja rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij po deformacionnoj modeli [Tekst] / N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radajkin // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – M. – 2013. – №1. – S. 25-27.

B. Sokolov

Kazan state university of architecture and construction, Kazan

Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Reinforced concrete and masonry structures»

E-mail: sokolov@ksaba.ru

O. Radaikin

Kazan state university of architecture and construction, Kazan

E-mail: olegxxii@mail.ru

ТУР В.И., ТУР А.В.

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЕТЧАТОГО КУПОЛА ПРИ ИСКЛЮЧЕНИИ ИЗ РАБОТЫ ОДНОГО УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Проводится исследование изменений в напряженно-деформированном состоянии сетчатого купола при исключении из работы одного узлового соединения при равномерном распределении нагрузки на все стержни купола. Установлено, что отказ даже одного узла в куполе (при рассмотренных параметрах купола) представляет значительную опасность и может привести к прогрессирующему обрушению конструкции в целом. Была создана расчетная схема сетчатого купола, выполненного по разрезке Кайвитта, диаметр купола 18 м, стрела подъема купола $1/6$ диаметра купола, с 4 ярусами стержней, узловые соединения купола жесткие, в качестве сечения стержней задан профиль «Молодечно» с поперечным сечением в виде прямоугольной трубы.

Ключевые слова: сетчатый купол, напряженно-деформированное состояние, узловое соединение, отказ.

Сетчатые купола – один из самых эффективных видов пространственных конструкций, но напряженно-деформированное состояние элементов купола при различных нагрузках изучено не в полной мере. Так, к одной из проблем следует отнести исследование работы купола при отказе одного из узлов. Отказ узлового соединения сетчатого купола происходит при превышении узловой нагрузкой некоторого критического значения, при этом часть поверхности купола приобретает обратный выгиб, а узловое соединение фактически выходит из работы [2].

Целью настоящей работы является исследование изменений в напряженно-деформированном состоянии сетчатого купола при отказе узлового соединения.

Исследование выполнялось с применением программного комплекса «Ли́ра 9.4». Методика построения расчетной схемы купола, нагрузки и закрепления описаны в работах [1, 3]. В данном исследовании прикладывалась равномерная нагрузка на все стержни.

Для проведения исследования была создана расчетная схема сетчатого купола, выполненного по разрезке Кайвитта, диаметр купола 18 м, стрела подъема купола $1/6$ диаметра купола, с 4 ярусами стержней, узловые соединения купола жесткие, в качестве сечения стержней задан профиль «Молодечно» с поперечным сечением в виде прямоугольной трубы 97×80 мм с толщиной стенок 3 мм.

Вышедший из работы узел расположен на вершине купола и в расчетной схеме был моделирован путем нанесения шарниров по всем шести возможным степеням свободы на 5 из 6 концов стержней, соединяемых в данном узле, что показано на рисунке 1. Установка шарниров на всех шести стержнях привела бы к нулевым перемещениям узла и искажению результатов.

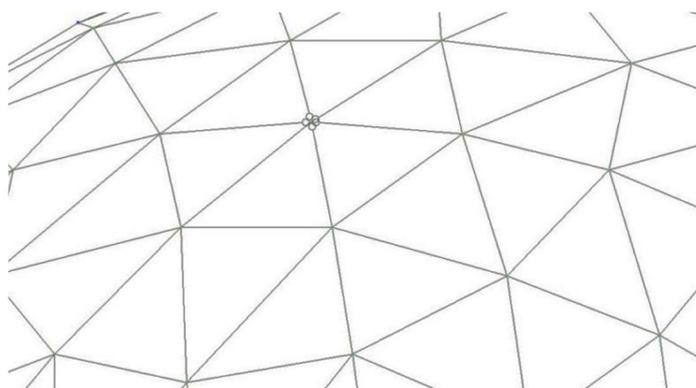


Рисунок 1 – Фрагмент расчетной схемы с вышедшим из работы узлом

В ходе исследования было выявлено, что отказ узла оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние трех групп стержневых элементов купола:

- стержневые элементы, стыкуемые в узле, который вышел из работы (стержни с номерами 1, 2, 4, 5, 6);
- стержневые элементы первого от вершины кольца купола (стержни с номерами 7, 8, 9, 10, 11, 12);
- стержневые элементы, идущие в меридиональном направлении (стержни с номерами 13, 16, 19, 22, 25, 28);
- стержни, отходящие от первого кольца купола, кроме идущих в меридиональном направлении (14, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30).

Нумерация стержней приведена на рисунке 2.

Влияние на напряженно-деформированное состояние других элементов купола невелико, изменение усилий по сравнению с недеформированной схемой не превышает 10%.

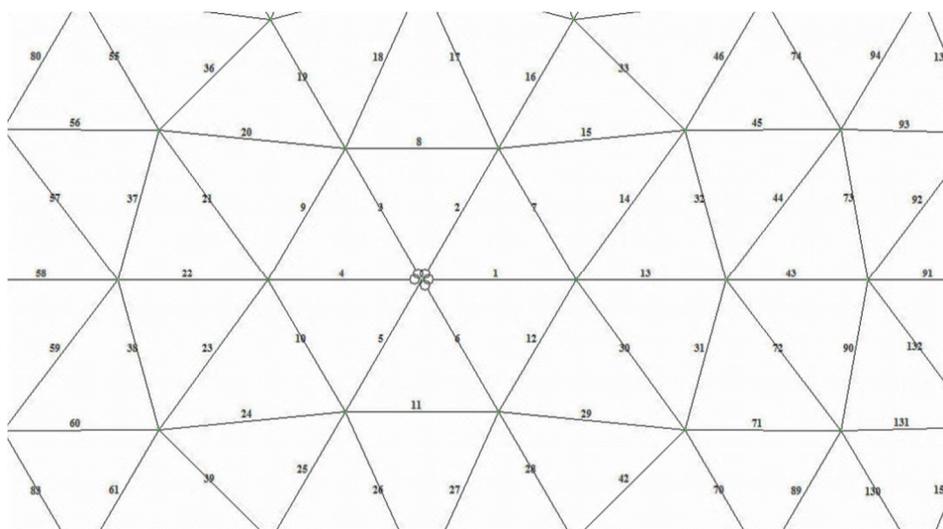


Рисунок 2 – Нумерация стержневых элементов купола

Рассмотрим подробнее изменение напряженно-деформированного состояния упомянутых выше стержневых элементов купола.

В стержнях, примыкающих к вышедшему из работы узлу, значительно изменилось напряженно-деформированное состояние, стержни фактически стали работать как консоли, продольная сила практически исчезла, и значительно вырос изгибающий момент в точке закрепления. Полученные значения приведены в таблице 1, все значения во всех таблицах даны для нагружения купола равномерной нагрузкой.

Таблица 1 – Изменение напряженно-деформированного состояния в стержнях, примыкающих к отказавшему узлу (стержни №1, 2, 4, 5, 6)

	До отказа узла	После отказа узла	Разница, %
Максимальная продольная сила, кН	17,2	0,22	-98,7
Максимальный изгибающий момент, кН·м	0,6	3,3	+550

В стержнях кольца купола значительно выросла как продольная сила, так и изгибающий момент, сам характер работы стержней несколько изменился. Если до отказа узла максимальный изгибающий момент наблюдался по концам стержня, то после отказа – в его середине. Полученные значения приведены в таблице 2.

В стержнях, идущих в меридиональном направлении, несколько выросла продольная сила, и значительно увеличился изгибающий момент. Полученные значения приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Изменение напряженно-деформированного состояния в стержнях, первого от вершины кольца купола (стержни №7, 8, 9, 10, 11, 12)

	До отказа узла	После отказа узла	Разница, %
Максимальная продольная сила, кН	20,5	41,4	+201,9
Изгибающий момент в центре стержня, кН·м	0,27	0,73	+270,3
Изгибающий момент на концах стержня, кН·м	0,67	0,21	-68,7

Таблица 3 – Изменение напряженно-деформированного состояния в стержнях, идущих в меридиональном направлении (стержни №13, 16, 19, 22, 25, 28)

	До отказа узла	После отказа узла	Разница, %
Максимальная продольная сила, кН	24,6	26,2	+6,5
Максимальный изгибающий момент, кН·м	0,88	1,68	+90,9

В стержнях, отходящих от кольца купола (кроме идущих в меридиональном направлении), также несколько выросла продольная сила, и увеличился изгибающий момент. Полученные значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Изменение напряженно-деформированного состояния в стержнях, отходящих от кольца купола (стержни №14, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30)

	До отказа узла	После отказа узла	Разница, %
Максимальная продольная сила, кН	12,6	14,3	+13,5
Максимальный изгибающий момент, кН·м	0,81	1,35	+66,7

Также следует отметить, что увеличились прогибы узлов, соседних с отказавшим, если до отказа прогиб от нагрузки составил 7,72 мм, то после отказа – 8,91 мм (увеличение прогиба на 15,4%).

В целом, по результатам исследования, можно сделать вывод, что отказ даже одного узла в куполе (при рассмотренных параметрах купола) представляет значительную опасность и может привести к прогрессирующему обрушению конструкции в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тур, А.В. Автоматизированная программа подготовки исходных данных для расчета сетчатых куполов разрезки Кайвитта [Текст] / А.В. Тур // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – №3. – С. 116-119.
2. Холопов, И.С. Исследование напряженно-деформированного состояния узлового соединения сетчатого купола [Текст] / И.С. Холопов, В.И. Тур, А.В. Тур // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – №4. – С. 104-111.
3. Холопов, И.С. Сетчатый купол с новыми узловыми соединениями [Текст] / И.С. Холопов, В.И. Тур, А.В. Тур // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – №10. – С. 60-62.

В.И. Тур

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск
Кандидат технических наук, профессор
E-mail: v_tur@mail.ru

А.В. Тур

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск
Ассистент кафедры «Архитектурно-строительное проектирование»
E-mail: v_tur@mail.ru

V. TUR, A. TUR

CHANGING THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MESH DOME IN CASE OF FAILURE NODAL CONNECTION

A study of changes in the stress-strain state of the mesh dome under a uniformly distributed load with failure of one nodal connection is described in this paper. Determined that the failure even one node in the dome (for parameter) is a significant danger and it may lead to progressive collapse of the whole structure. There is created the model of mesh dome of Kywitt system with 18 m diameter and height 1/6 of the diameter. Dome has four rod tiers with rigid nodular connection. Cross-sections of members are made of profile bar "Molodechno" in the form of the rectangular tube.

Keywords: mesh dome, the stress-strain state, the node connection failure.

BIBLIOGRAPHY

1. Tur, A.V. Avtomatizirovannaja programma podgotovki ishodnyh dannyh dlja rascheta setchatyh kupolov razrezki Kajvitta [Tekst] / A.V. Tur // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2011. – №3. – S. 116-119.
2. Holopov, I.S. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija uzlovogo soedinenija setchatogo kupola [Tekst] / I.S. Holopov, V.I. Tur, A.V. Tur // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. – 2012. – №4. – S. 104-111.
3. Holopov, I.S. Setchatyj kupol s novymi uzlovymi soedinenijami [Tekst] / I.S. Holopov, V.I. Tur, A.V. Tur // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2012. – №10. – S. 60-62.

V. Tur

Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk
Candidate of technical sciences, professor
E-mail: v_tur@mail.ru

A. Tur

Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk
Assistant lecturer of the department «Architecture and civil engineering»

ТУРКОВ А.В., МАКАРОВ А.А., ВОЛОБУЕВА Е.С.

ПРОГИБЫ И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ БАЛОК С РАЗЛИЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ ЯЧЕЕК НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ

Рассматривается взаимосвязь основной частоты свободных поперечных колебаний ω систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на треугольном плане и их максимальных прогибов W_0 при действии равномерно распределённой нагрузки в зависимости от схемы опирания системы. Построены зависимости прогибов и частот поперечных колебаний в зависимости от соотношения количества опор конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне. Показано, что изменения соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по этой же стороне существенно не влияет на динамические и жесткостные параметры, а также на коэффициент $K_{расч}$, если количество опор по одной стороне конструкции не менее трёх.

Ключевые слова: система перекрестных балок, жесткость узловых соединений, частота собственных колебаний, максимальный прогиб, схема опирания.

Выявленная профессором В.И. Коробко зависимость для упругих изотропных пластин постоянной толщины и произвольной формы [1], гласит: вне зависимости от граничных условий произведение максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределенной нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний балки в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная, и соответствует закономерности:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}, \quad (1)$$

где m – равномерно распределённая по площади масса пластины.

В настоящем исследовании рассматривается влияние схемы опирания (количества опор) СПБ на динамические и жесткостные характеристики СПБ. В качестве расчетной была принята система перекрестных балок в виде правильного треугольника со сторонами 18 м (рис. 1). Стороны ячеек a составляли 1 м, 1,5 м, 2 м, 3 м, 4,5 м и 6 м.

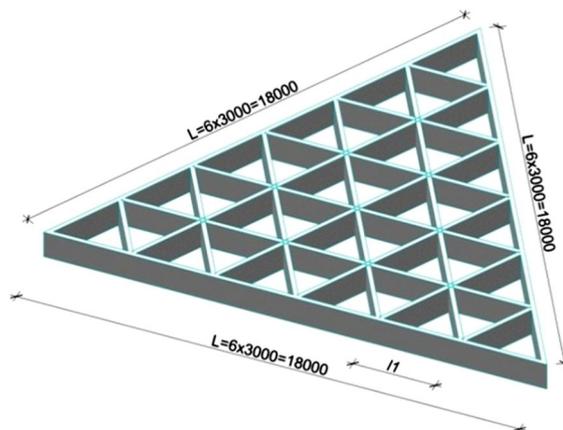


Рисунок 1 – Схема системы перекрестных балок на треугольном плане

По контуру система перекрестных балок опиралась в контурных узлах на шарнирные опоры, количество которых варьировалось в зависимости от размеров ячейки. Постоянная нагрузка принята от собственного веса системы перекрестных балок (сечение дощатоклееных элементов системы принято постоянным $b \times h = 160 \times 1221$ мм), $q_{св} = 0,187$ Кн/м².

При статическом расчете нагрузки были приложены по длине балки для ячеек 6×6×6 м, 3×3×3 м, 2×2×2 м через 1 м, нагрузка от собственного веса балки составляла $G_1=2,93$ кН в промежуточных сечениях и $G_2=0,98$ кН в узлах системы. Для ячеек 4,5×4,5×4,5 м, 1,5×1,5×1,5 м через 0,75 м, нагрузка от собственного веса балки составляла соответственно $G_1=2,19$ кН, $G_2=0,73$ кН, для ячейки 1×1×1 м через 0,5 м, нагрузка от собственного веса балки составляла $G_1=1,47$ кН, $G_2=0,47$ кН.

Для определения собственных частот колебаний в узлы системы прикладывались сосредоточенные массы, интенсивность которых рассчитывалась по фактическому собственному весу конструкции в соответствии с грузовой площадью узла. Модуль упругости клееной древесины в расчётах принимался по СНиП II-25-80 $E=10000$ МПа. Соотношение жесткости вставки к жесткости элемента самой системы перекрёстных балок принято постоянным $EI_{вст.}/EI_{эл}=0,03$.

Исследования проводились методом конечных элементов. Расчет выполнялся в программном комплексе SCAD. В результате расчёта определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Результаты расчета конструкции с различными размерами ячеек представлены на рисунках 3...5. Они представляют собой графики изменения прогибов и частот колебаний, а также коэффициента $K_{расч}$ в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне.

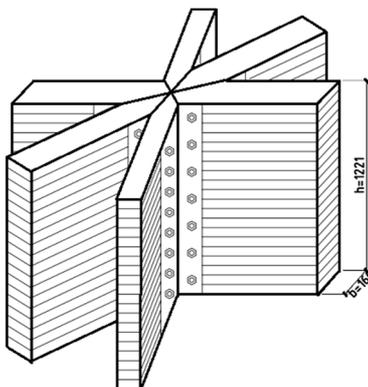


Рисунок 2 – Узел примыкания элементов

Отклонение расчётных значений коэффициента $K_{расч}$ от аналитического вычислялось по формуле:

$$\Delta = \frac{K_{аналит} - K_{расч}}{K_{аналит}} \cdot 100\%$$

и представлено в таблице 1.

Резкое изменение параметров (значения прогибов, основных частот собственных поперечных колебаний) при различном размере ячеек происходит в случае расположения опор только по углам конструкций (2 опоры по одной стороне). В случае, когда по одной стороне конструкции располагается 3 опоры и более, в системах перекрестных балок динамические и жесткостные параметры практически не изменяются по сравнению с опиранием по всем контурным узлам.

Наиболее резкое изменение отклонения расчётных значений коэффициента $K_{расч}$ от аналитического проявлялось в случаях расположения по одной стороне конструкции всего 3-х и в случае, когда СПБ опирается только по углам.

Анализ данных значений прогибов W_0 , основных частот собственных колебаний ω отклонения Δ (%) для различных размеров ячеек в зависимости от количества опор приведены на рисунках 3-5.

Изменение коэффициента $K_{расч}$ для ячеек с размерами сторон 4,5 и 6 м на рисунке 5 не показано, так как значение отклонения коэффициента для системы перекрестных балок с данными размерами ячеек большое.

Таблица 1 – Значения прогибов W_0 (мм), основных частот собственных поперечных колебаний ω (c^{-1}), отклонения Δ (%) для различных размеров ячеек в зависимости от количества опор

Количество опор по одной стороне, включая углы конструкции		Размеры ячейки, м					
		1×1	1,5×1,5	2×2	3×3	4,5×4,5	6×6
19	W_0	0,474123					
	ω	183,3911					
	%	-1,40165					
13	W_0		0,48324				
	ω		180,2931				
	%		0,110795				
10	W_0	0,557136		0,498105			
	ω	168,747		176,5394			
	%	-0,88598		1,280792			
7	W_0	0,631312	0,594748		0,552733		
	ω	157,9485	162,0735		167,9596		
	%	-0,15497	0,653063		0,843194		
5	W_0		0,692946			0,595168	
	ω		149,4179			152,9299	
	%		1,621064			11,48399	
4	W_0	0,838569	0,80527	0,784617	0,768658		0,80771
	ω	133,901	136,9077	138,853	140,6385		130,4212
	%	4,389869	4,016907	3,802072	3,319459		12,63262
3	W_0	0,992725	0,941389		0,881022	0,887798	
	ω	109,0175	112,5505		116,5809	116,0635	
	%	24,97278	24,16644		23,85541	23,94935	
2	W_0	20,135	18,51405	17,13716	16,4204	16,09654	14,41862
	ω	24,49159	25,6074	26,63649	27,43907	27,9497	28,82995
	%	23,19614	22,79776	22,68027	21,38236	20,03788	23,79053

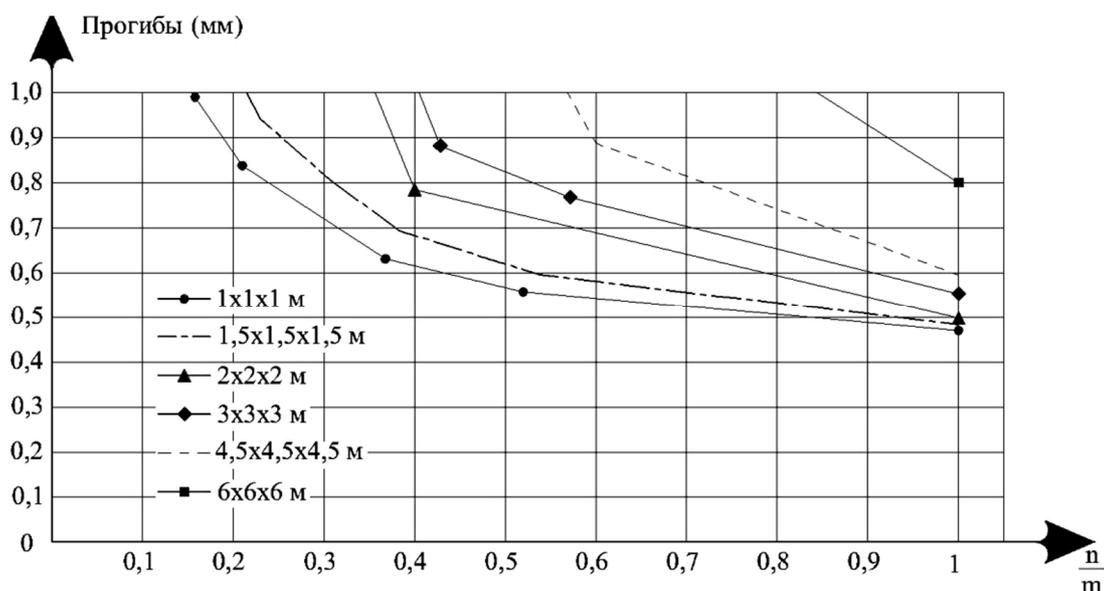


Рисунок 3 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов по одной стороне)

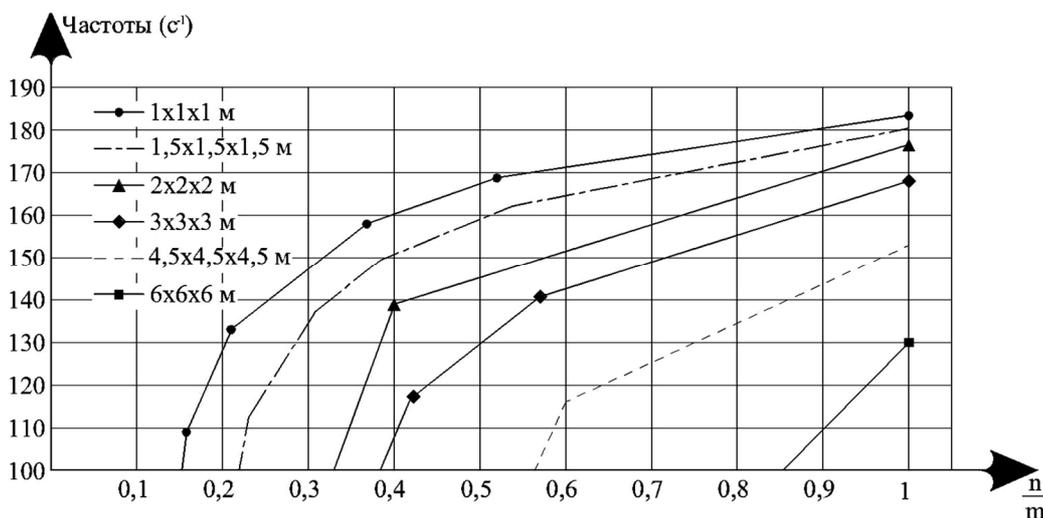


Рисунок 4 – Изменение частот собственных колебаний СПБ в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

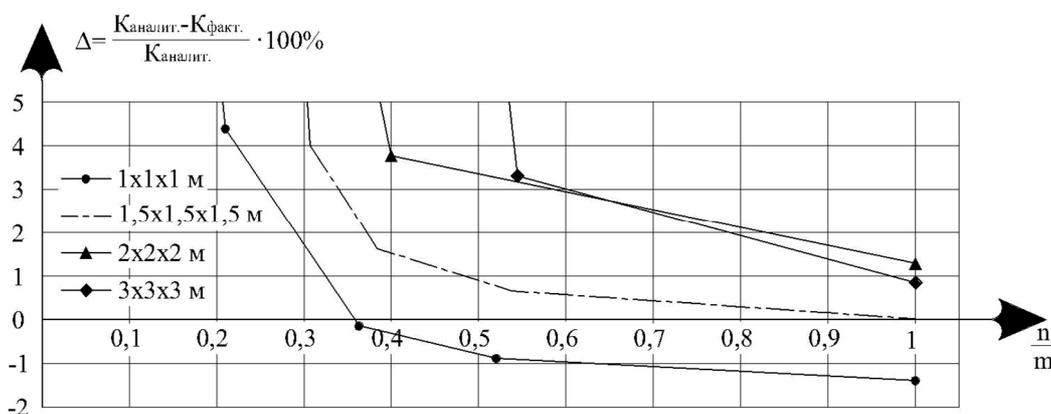


Рисунок 5 – Изменение коэффициента $K_{расч}$ в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

Заключение

При соотношении количества опор конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне конструкции $n/m < 0,3$ отклонение коэффициента K от своего аналитического значения превышает 5%, при расположении по одной стороне конструкции числа опор $n > 0,3$ отклонение коэффициента K не превышает 4,38%. Исключением являются системы перекрестных балок с размерами сторон ячеек 4,5 и 6 м – при опирании системы перекрестных балок на шарнирные опоры во всех контурных узлах отклонение коэффициента K для системы с размерами сторон ячеек 4,5 м составило 11,48%, для системы с размерами сторон ячеек 6 м составило 12,63%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. Об одной «замечательной» закономерности в теории упругих пластинок [Текст] / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – №11. – С. 32-36.
2. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции [Текст]. – М.: Стройиздат, 1982. – 66 с.

А.В. Турков

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
 Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Городское строительство и хозяйство»

А.А. Макаров

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Инженер

Е.С. Волобуева

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Магистрант

A. TURKOV, A. MAKAROV, E. VOLOBUEVA

**DEFLECTIONS AND FREQUENCIES OF OWN
FLUCTUATIONS OF SYSTEMS CROSS BEAMS WITH VARIOUS
SIZES OF CELLS ON THE TRIANGULAR PLAN DEPENDING
ON BEARING SCHEME**

The relation of the fundamental frequency ω of free transverse vibrations of systems of cross beams with plates on the top belt with different mesh sizes on a triangular plan and the maximum deflection of the action W_0 evenly spread the load is depending on the circuit bearing system. Dependences of deflections and frequencies of cross fluctuations depending on a ratio of quantity of support on one party of a design to number of planimetric knots on one party are constructed. It is shown that changes of a ratio of quantity of support on one party of a design to number of planimetric knots on the same party, significantly doesn't influence dynamically and stiffness parameters, and also coefficient of K calculated, if quantity of support on one party of a design not less than three.

Keywords: cross-beams, the stiffness of joints for, own-frequency oscillations, the maximum deflection, scheme bearing.

BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. Ob odnoj «zamechatel'noj» zakonomernosti v teorii uprugih plastinok [Tekst] / V.I. Korobko // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1989. – №11. – S. 32-36.
2. SNiP II-25-80. Derevjannye konstrukcii [Tekst]. – M.: Strojizdat, 1982. – 66 s.

A. Turkov

State university – teaching, research and production complex, Orel
Doctor of technical sciences, head of the department «Urban construction and management»

A. Makarov

State university – teaching, research and production complex, Orel
Engineer

E. Volobueva

State university – teaching, research and production complex, Orel
Postgraduate

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ АВАРИЙНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Моделирование жизненного цикла технически сложных и уникальных зданий и сооружений предъявляет особые требования к подходам математического моделирования и обеспечению достоверности результатов на всех стадиях эксплуатации, особенно в условиях аварийных воздействий. Рассматриваются вопросы выбора численного метода, влияния демпфирования на конечные результаты, оценивается вероятность наступления критической ситуации.

Ключевые слова: *нелинейное деформирование конструкций, закритическая стадия работы, экстремальные воздействия.*

Решение задачи численного моделирования поведения строительных конструкций на критической или закритической стадии является важным вопросом при определении безопасности сооружения, которое подвергается воздействию повышенных или экстремальных нагрузок и воздействий.

Современная практика исследования работы сооружений в закритической стадии носит относительно фрагментированный характер, сконцентрированный на одной или нескольких проблемах, среди которых можно выделить следующее. К одной из них можно отнести методики получения первых критических форм устойчивости системы с учетом нелинейной работы материала путем уточнения жесткостных параметров системы в зависимости от стадии работы материала отдельных элементов конструкции, исследование динамических параметров системы с учетом возникновения различных дефектов или изменения жесткостных свойств системы. В других работах рассматриваются подходы к определению живучести отдельных элементов или всей конструкции, подверженной вариантным отказам.

Можно также выделить работы [1] по анализу причин обрушения СОК «Трансвааль», где проводился анализ системы на различных масштабных уровнях.

При моделировании работы сооружения в критической и закритической стадиях при экстремальных воздействиях важным этапом является выбор корректного подхода и численного метода. Процессы деформирования и разрушения, а также сами воздействия носят динамический характер, накладывающий свои требования, предъявляемые к численным методам.

Решение динамической задачи методом конечно-элементного моделирования возможно в двух постановках: явным или неявным схемам интегрирования уравнений динамики. Проведя сопоставление математических методик можно сделать следующие выводы.

1. При решении задач в предкритической или критической стадии без разрушения узлов конструкции и накопления критической массы потерявших устойчивость элементов возможно использование методов прямого интегрирования по неявным схемам, таких как метод Ньюмарка, Хоболта или θ -метод Вилсона.

2. Переход в закритическое состояние накладывает свои ограничения для неявных схем интегрирования. Возрастающие скорости деформирования, нелинейное поведение системы, возможное разрушение узлов и возникновение контакта между смежными элементами существенно усложняют получение корректного решения при плохой сходимости или ее отсутствии.

3. На этом этапе становится возможным применение явных схем интегрирования, выполняющих при одинаковом временном шаге в скорости и стабильности у неявных схем. Шаг интегрирования для неявных схем с учетом проблем со сходимостью из-за значительных пластических деформаций или перемещений и большим числом итераций на одну эквивалентную итерацию может стать существенно ниже, чем в явной схеме.

В качестве основного метода прямого интегрирования уравнений динамики возможно применение метода центральных разностей, базовая форма которого представлена ниже:

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_{n-1/2}\} = \{R_n\} - \{F_n\},$$

где $[M], [C]$ – матрицы масс и демпфирования; $\{R_n\}, \{F_n\}$ – эффективные вектора нагрузки и внутренних сил, в которых также производится учет физической, геометрической и контактной нелинейностей.

Определение ускорений, скоростей и перемещений производится следующим образом:

$$\{\ddot{u}_n\} = [M]^{-1} (\{R_n\} - \{F_n\} - [C]\{\dot{u}_{n-1/2}\});$$

$$\{\dot{u}_{n+1/2}\} = \{\dot{u}_{n-1/2}\} + \{\ddot{u}_n\} \Delta t_n;$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_{n+1/2}\} \Delta t_{n+1/2}.$$

В качестве основных соотношений, связывающих перемещения с деформациями, можно использовать обновляемую Лагранжевую формулировку, использующую тензор скоростей изменения напряжений Яумана [2].

Следующим вопросом в построении подхода к моделированию является получение напряженно-деформированного состояния системы на момент возникновения аварийной ситуации, которое складывается из двух факторов: значения нагрузки на момент воздействия и пути нагружения системы.

Современные нормативные документы на текущий момент не охватывают весь спектр воздействий, ориентированные на взрывное воздействие от газа и ему подобное по аналогии с ситуацией Ronan Point в Лондоне в 1968 г., предлагая рассматривать гипотетическое воздействие при пониженных нагрузках.

Однако на примере статистического анализа аварий стальных строительных конструкций, проведенного на основании [3], можно судить, что основной проблемой возникновения аварийной ситуации служит после некачественного монтажа и ошибок изготовления перегрузка конструкций, которая уже сопровождается потерей устойчивости и (или) разрушением по материалу.

С этой точки зрения для случаев исследования поведения сооружения при выходе из строя узлов целесообразно использование полных значений нагрузок. При этом вероятность взрыва или удара транспорта при полных нагрузках остается достаточно низкой, что позволяет использовать нормативные пониженные значения нагрузок.

Доведение системы до адекватной ситуации напряженно-деформированного состояния при этом следует проводить поэтапно, эквивалентно жизненному циклу работы конструкций.

Можно использовать следующую схему, которая представлена на рисунке 1. На первом этапе при значительной величине демпфирования нагружается конструкция в несколько шагов. Далее следует период стабилизации и релаксации напряжений в элементах сооружения. На последнем этапе вводится инициирующее воздействие, такое как или выключение узла конструкции, или динамический удар, или взрыв.

Стадия закритического поведения конструкций сооружения по сравнению со статикой имеет несколько отличные параметры демпфирования, которые представлены в статье Н.М. Ньюмарка [4] и таблице 1. Стоит отметить, что параметры рассеивания для случаев, превышающих предел текучести, приведены для случая сейсмического расчета по линейно-спектральной теории и не могут быть применены в прямом динамическом анализе.

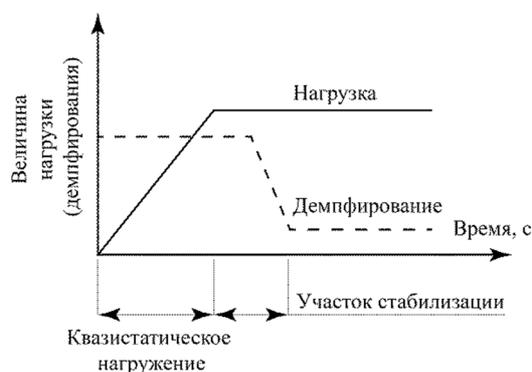


Рисунок 1 – Этапность нагружения конструкций

Таблица 1 – Параметры демпфирования строительных конструкций

Стадия работы конструкции	Стальные конструкции	Железобетонные конструкции
Напряжения менее 25% предела текучести в стали, железобетон без трещин, предварительно напряженный железобетон	0,5-1,0%	
Напряжения менее 50% предела текучести в стали, железобетон с трещинами	Сварные конструкции – 2% Соединение на болтах – 5...7%	Сильно армированный ж.б. с небольшим числом трещин – 2% Железобетон со значительными трещинами – 3...5%
Напряжения равны пределу текучести в стали, железобетон в предельном состоянии	Сварные конструкции – 5% Соединение на болтах – 10...15%	Железобетон в предельном состоянии – 7...10% Предварительно напряженный железобетон до потери обжатия – 7%
Напряжения и остаточные деформации превышают соответствующие пределу текучести значения	Сварные конструкции – 7...10% Соединение на болтах – 20%	Закритическая работа железобетона – 10...15%

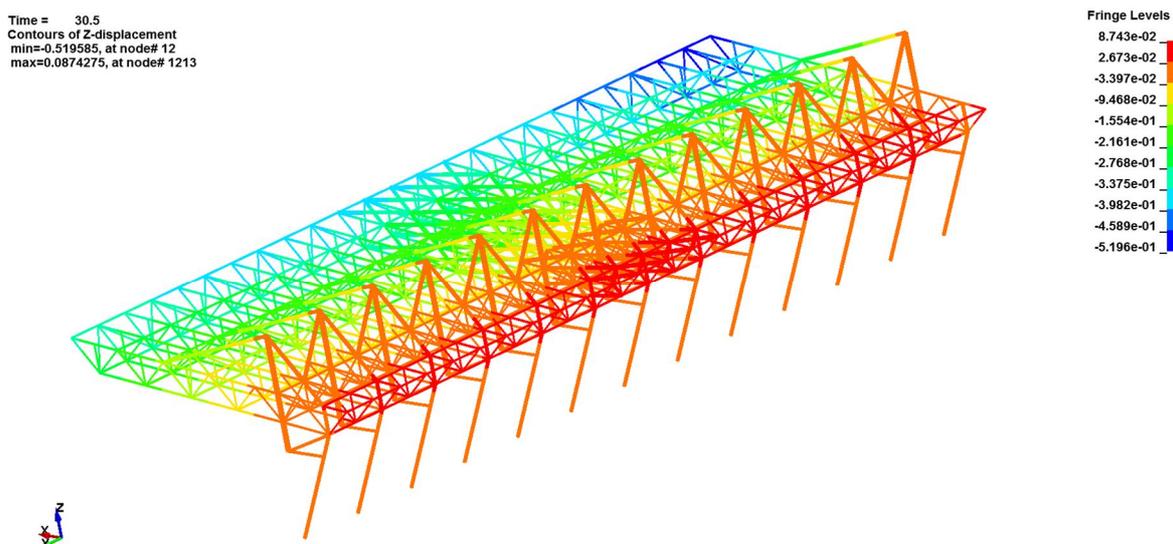


Рисунок 2 – Перемещения покрытия для момента максимальной амплитуды (м) для демпфирования 5%

На примере покрытия трибуны было проведено оценочное сопоставительное моделирование с применением стандартных параметров демпфирования 2 и 5%. По результатам которых для исследуемой конструкции установлено малое влияние рассеивания энергии в ука-

занных интервалах на амплитудные значения усилий в конструкции, однако, следует отметить возможное влияние затухания на дальнейший процесс деформирования и количество циклов колебаний конструкции. Сопоставление результатов представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Выборочное сопоставление параметров НДС

Параметр	Демпфирование		Разница, %
	2%	5%	
Перемещение по Z, м (конец консоли)	-0,537 м	-0,519 м	0,87%
Продольное усилие в верхней оттяжке (соседний блок с удаленным элементом), кН	4038,68	3978,96	1,5%

При моделировании и оценке несущей способности сооружения также стоит отметить, что для некоторых случаев наступление случая разрушающей экстремальной нагрузки может быть либо маловероятным, либо вообще невозможным.

Это можно продемонстрировать на следующем примере. Спроектированное 16-тиэтажное здание со стальным каркасом с ребрами жесткости, расставленными по лифтовым и лестничным шахтам, а также по углам сооружения, испытывает ударное воздействие от транспорта, масса которого эквивалентна полностью груженному грузовику КАМАЗ 55111, одному из самых тяжелых в своем классе. Модели представлены на рисунке 3.

В рамках моделирования определялась скорость удара, при которой происходит разрушение опорной колонны в уровне первого этажа.

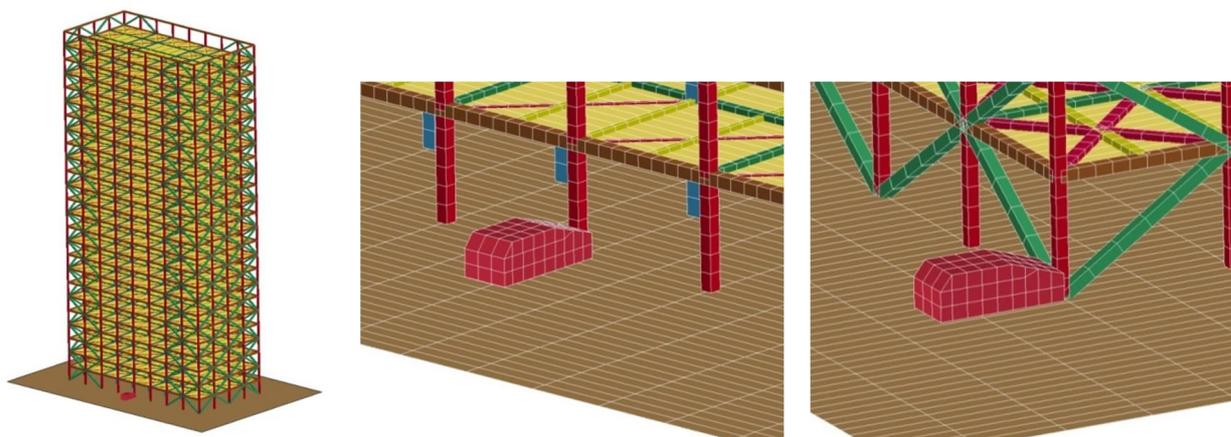


Рисунок 3 – Модель сооружения и схемы удара транспорта

Демпфирование принималось 2%, при этом учет рассеивания энергии транспортом не учитывался, а сам автомобиль моделировался жестким телом. Материал стальных конструкций учитывал пластические свойства стали билинейной диаграммой с кинематическим упрочнением. Влияние времени нагружения на предельные деформации и напряжения учитывались через аппроксимацию значений из [5] для стали Ст3 в параметры модели Cowper-Symonds.

По результатам моделирования максимальная скорость, при которой происходило разрушение элемента, составила 108 км/ч при максимально возможной 90 км/ч в полностью снаряженном состоянии. Момент выхода из строя и перемещения ближайшего узла конструкции к месту удара продемонстрированы на рисунках 4 и 5.

Выводы

Применение методов прямого интегрирования уравнений динамики в явной постановке позволяет получить преимущество при решении задач с сильной нелинейностью протекаемого

процесса деформирования строительных конструкций за счет большей устойчивости счета и меньшего числа итераций при сопоставимых шагах по времени.

В зависимости от вида конечного результата, критическая нагрузка потери устойчивости или сам процесс деформирования, возможно использование различных параметров демпфирования. Влияние рассеивания энергии на амплитудное значение усилий и перемещений в первой волне не так существенно, как при распространении динамической волны по сооружению, при котором неверные параметры демпфирования могут привести к тому, что эффект «хлыста» может не проявиться. В этом случае рекомендуется отслеживание величин напряженно-деформированного состояния с локальной корректировкой демпфирования.

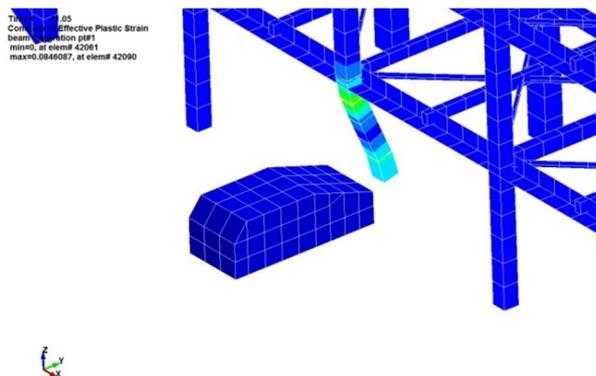


Рисунок 4 – Момент выхода из строя опорного элемента сооружения

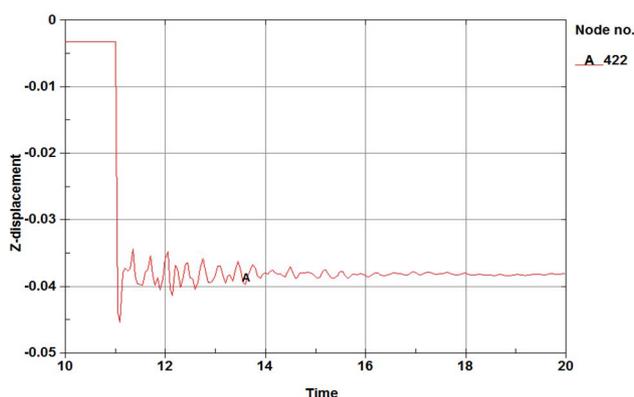


Рисунок 5 – Перемещения верхнего узла разрушенного элемента в вертикальной плоскости

Современные подходы к оценке способности сооружения сопротивляться обрушению не учитывают статистических величин возможных нагрузок и вероятности наступления аварийной ситуации. Представленный в статье пример показывает, что удар грузовым транспортом не может привести к выходу из строя элемента при должном уровне прочностного обеспечения несущей способности конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белостоцкий, А.М. Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк» – ANSYS Solutions [Текст] / А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский. – М. – 2007. – №4.
2. Коробейников, С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел [Текст] / С.Н. Коробейников. – Монография – РАН, Сибирское отделение, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. – Новосибирск, 2000.
3. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения [Текст] / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. – М.: Издательство литературы по строительству, 1968.
4. N.M. Newmark, W.J. Hall. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. – Proc. IAEA Panel on Aseismic Design and Testing of Nuclear Facilities – Japan Earthquake Engineering Promotion Society – Токио. 1969 – p. 90-113.

5. Суворова, Ю.В. Запаздывание текучести в сталях [Текст] / Ю.В. Суворова. – Прикладная механика и техническая физика. – Новосибирск. – 1968. – №3. – С. 55-62.

А.М. Белостоцкий

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва
Доктор технических наук, профессор
E-mail: niccm@mgsu.ru

А.С. Павлов

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва
Кандидат технических наук, научный сотрудник НОЦ КМ МГСУ
E-mail: a.pvlv@yandex.ru

A. BELOSTOTSKY, A. PAVLOV

**NUMERICAL SIMULATION FOR DEFORMATION
OF STRUCTURES UNDER ACTIONS BEYOND DESIGN BASES**

Numerical modeling of life cycle of unique structures and buildings bring special requirement for methods of numerical solution and assurance of results for any stage of exploitation, especial for accident situation. The paper consider the questions of choosing numerical method of solution, influence of damping to results, way of estimate influence of critical load on structure resistance.

Keywords: *nonlinear deformation of structures, post-critical state, extreme loading.*

BIBLIOGRAPHY

1. Belostockij, A.M. Analiz prichin obrushenija konstrukcij pokrytija SOK «Transvaal'-park» – ANSYS Solutions [Текст] / A.M. Belostockij, S.I. Dubinskij. – М. – 2007. – №4.
2. Korobejnikov, S.N. Nelinejnoe deformirovanie tverdyh tel [Текст] / S.N. Korobejnikov. – Monografija – RAN, Sibirskoe otdelenie, Institut gidrodinamiki im. M.A. Lavrent'eva. – Novosibirsk, 2000.
3. Beljaev, B.I. Prichiny avarij stal'nyh konstrukcij i sposoby ih ustraneniya [Текст] / B.I. Beljaev, V.S. Kornienko. – М.: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1968.
4. N.M. Newmark, W.J. Hall. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. – Proc. IAEA Panel on Aseismic Design and Testing of Nuclear Facilities – Japan Earthquake Engineering Promotion Society – Tokio. 1969 – p. 90-113.
5. Suворova, Ju.V. Zapazdyvanie tekuchesti v staljah [Текст] / Ju.V. Suворova. – Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. – Novosibirsk. – 1968. – №3. – S. 55-62.

A. Belostotsky

Moscow state construction university, Moscow
Doctor of technical sciences, professor
E-mail: niccm@mgsu.ru

A. Pavlov

Moscow state construction university, Moscow
Candidate of technical sciences
E-mail: a.pvlv@yandex.ru

ЕРЁМИН К.И., АЛЕКСЕЕВА Е.Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Выполнено изучение повреждаемости основных несущих конструкций зданий энергетической и химической отраслей с целью повышения уровня комплексной безопасности зданий и сооружений, представлены идеализированные диаграммы повреждаемости основных несущих конструкций исследуемых зданий, отображающие изменение их технического состояния, представлены диаграммы накопленных в процессе эксплуатации характерных дефектов и повреждений стропильных ферм. Введено понятие «критической» конструкции, выработаны «требования» к «критической конструкции».

Ключевые слов: здания, предприятия энергетики, химическое производство, анализ, дефекты, повреждения, несущие конструкции, техническое состояние, срок эксплуатации, оценка повреждаемости.

В настоящее время в большинстве стран отмечается рост числа аварий зданий и сооружений с человеческими жертвами. Этот факт можно объяснить комплексом причин, в том числе накоплением в процессе эксплуатации дефектов и повреждений. С целью изучения возможности снижения уровня аварийности зданий и сооружений проанализирована накопленная в процессе эксплуатации повреждаемость основных элементов каркаса зданий и сооружений.

Рассмотрены предприятия энергетической и химической отраслей промышленности.

Предприятия энергетической и химической промышленности являются стратегически важными объектами. Последствия аварий и аварийных ситуаций на данных объектах могут иметь не только локальный, но и глобальный характер. Очень сложно, а порой и невозможно в полной мере оценить экономический ущерб и социальные последствия аварий на данных предприятиях.

Сферы энергетики и химической промышленности являются «закрытыми», соответственно повреждаемость основных зданий и сооружений в данных отраслях мало изучена.

Целью натурных обследований конструктивных элементов зданий энергетики и химической промышленности явилось выявление дефектов, повреждений и причин, вызывающих их. Анализ выявленных дефектов и повреждений позволил оценить изменение технического состояния несущих элементов каркасов главных корпусов в зависимости от длительности их эксплуатации.

Знакомство с конструктивным решением и состоянием несущих строительных конструкций зданий главных корпусов предприятий энергетики и рядом расположенных основных производственных цехов химических предприятий, а также результаты выполненных натурных обследований показали, что состояние ряда несущих конструкций оценено как ограниченно работоспособное.

Анализ накопленных дефектов и повреждений в сфере энергетики выполнен по результатам натурных обследований зданий одиннадцати главных корпусов предприятий энергетики, восемь из которых входят в состав ОАО «Фортум». Главные корпуса предприятий ОАО «Фортум» вводились в эксплуатацию, начиная с 1931 года (Челябинская ГРЭС) и заканчивая 1996 годом (Челябинская ТЭЦ-3).

К главным корпусам тепловых электростанций относят здание или комплекс зданий, в которых размещается основное и вспомогательное оборудование, непосредственно участвующее в процессе выработки тепловой и электрической энергии [2].

На основании анализа конструктивных решений главных корпусов предприятий теплоэнергетики установлено следующее: в основу конструктивного решения главных корпусов за-

ложена многопролетная рама, включающая в себя не менее трех пролетов. Пролеты выполняются полностью в железобетонном, металлическом каркасе или смешанными с железобетонными колоннами и металлическими конструкциями покрытия.

Анализ дефектов и повреждений в химической промышленности выполнен по результатам натурного обследования семи цехов основного производства, включающего в себя цех обжига электродной продукции, сортопрокатный цех, цех графитации, механической обработки и др. Данные цеха вводились в эксплуатацию, начиная с 1977 года (прокалочный цех) и заканчивая 1990 годом (цех обжига электродной продукции).

По результатам анализа повреждаемости основных несущих конструкций главных корпусов предприятий энергетики и основных производственных цехов химической промышленности построены диаграммы изменения повреждаемости несущих конструкций зданий главных корпусов в зависимости от срока эксплуатации здания (рис. 1-3).

За единицу повреждаемости принято отношение конструкций с накопленными в процессе эксплуатации дефектами и повреждениями к общему количеству однотипных конструкций (рис. 1).

На рисунках 2 и 3 представлены идеализированные диаграммы повреждаемости основных несущих конструкций исследуемых зданий, отображающие изменение технического состояния строительных конструкций, а именно рост повреждаемости в зависимости от времени эксплуатации на момент проведения обследования.

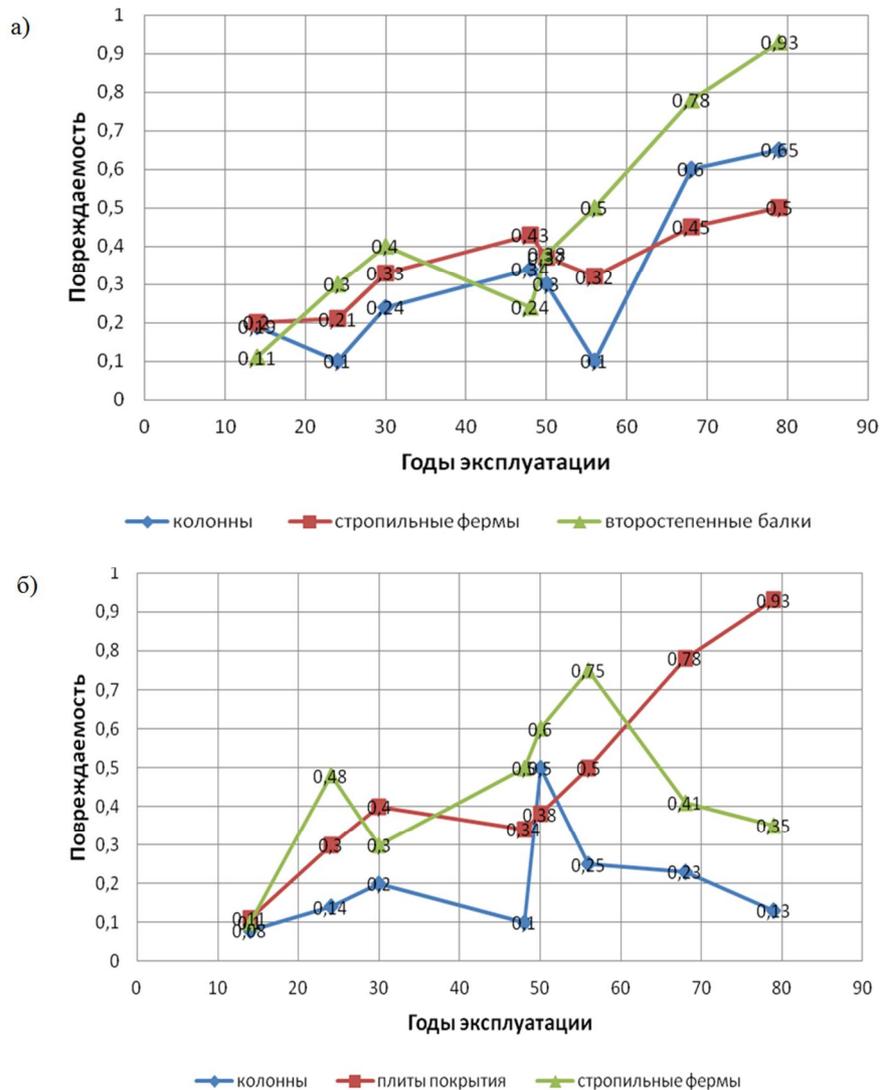


Рисунок 1 – Накопленная в процессе эксплуатации повреждаемость конструкций: а – в энергетической промышленности; б – в химической промышленности

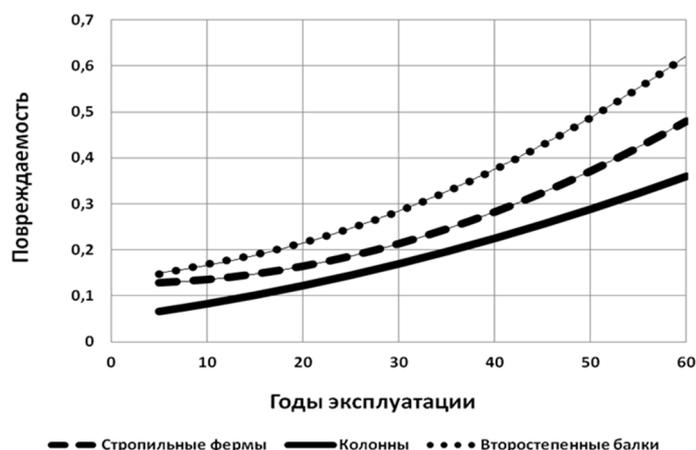


Рисунок 2 – Идеализированный график накопленной в процессе эксплуатации повреждаемости колонн, стропильных ферм и второстепенных балок зданий главных корпусов предприятий энергетики

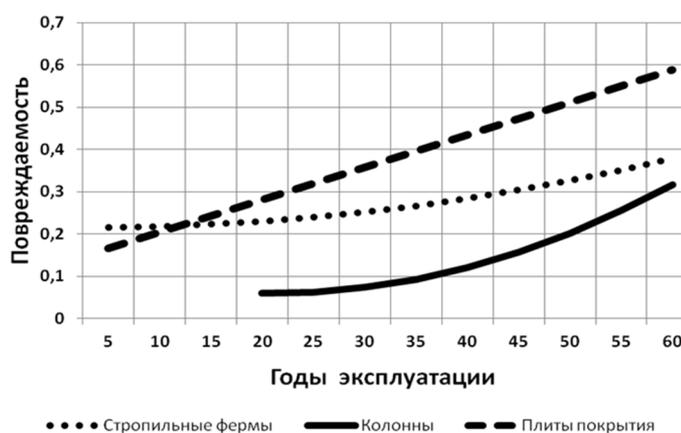


Рисунок 3 – Идеализированный график накопленной в процессе эксплуатации повреждаемости колонн, стропильных ферм и плит покрытия зданий основных производственных цехов химической промышленности

Видно, что в конструкциях стропильных ферм развитие дефектов и повреждений носит одинаково прогрессирующий характер в обоих производственных процессах. При этом часть конструкций эксплуатируется с такими повреждениями, как коррозия металлических конструкций, общие погибы элементов стропильных ферм, внеузловое опирание, вырезы либо отсутствие элементов. На рисунках 4 и 5 представлены диаграммы накопленных в процессе эксплуатации характерных дефектов и повреждений стропильных ферм.

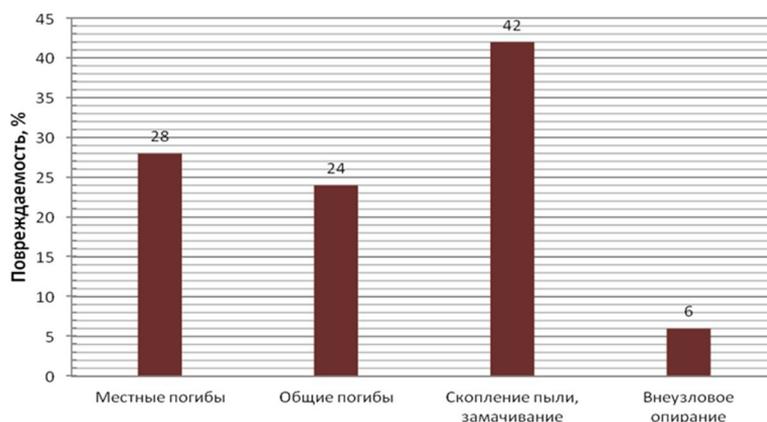


Рисунок 4 – Характерные дефекты в стропильных фермах предприятий энергетики

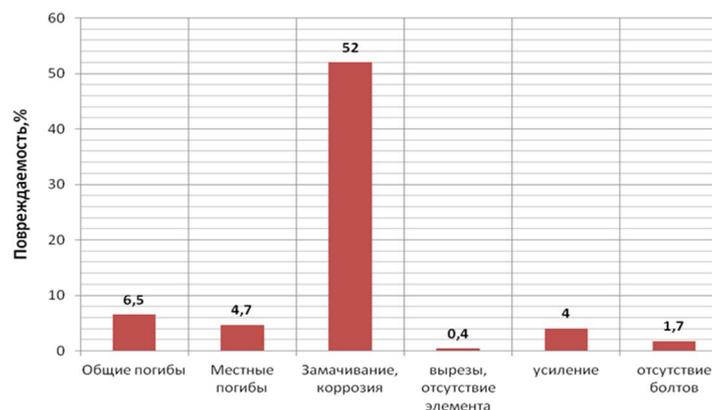


Рисунок 5 – Характерные дефекты в стропильных фермах предприятий химической промышленности

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод, что вне зависимости от производственной отрасли накопленные дефекты и эксплуатационная повреждаемость стропильных ферм как в энергетике, так и в химической промышленности практически однотипны.

На рисунках 6 и 7 представлены диаграммы относительной частоты α возникновения дефектов и повреждений конкретного вида в стропильных фермах:

$$\alpha = \frac{\Delta n}{N} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где α – относительная частота возникновения дефектов и повреждений; Δn – число дефектов и повреждений данного вида; N – общее число дефектов и повреждений по однотипным конструкциям.

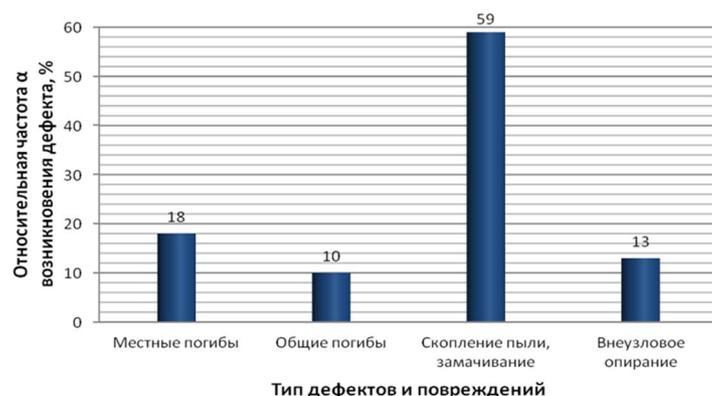


Рисунок 6 – Относительная частота возникновения дефектов и повреждений в стропильных фермах предприятий энергетики

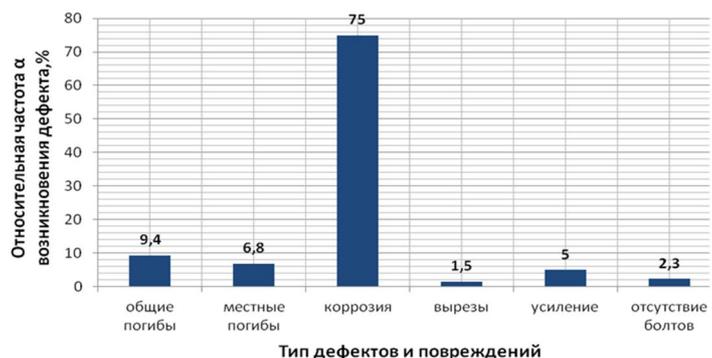


Рисунок 7 – Относительная частота возникновения дефектов и повреждений в стропильных фермах предприятий химической промышленности

Как известно, прогрессирующее обрушение зданий и сооружений как в отмеченных выше, так и в других отраслях промышленности, начинается с разрушения так называемой «критической» конструкции.

Под «критической» конструкцией понимают ту конструкцию, разрушение которой (либо разрушение ее отдельного узла или элемента) приведет к неконтролируемому прогрессирующему (каскадному) обрушению значительной части либо всего здания или сооружения.

В привязке к стропильным фермам разрушение «критического» узла или элемента в «критической» ферме приведет к неконтролируемому прогрессирующему обрушению всего покрытия промышленного здания или как минимум к обрушению в пределах одного температурного блока.

Для теоретического изучения поведения «критической» конструкции как инициатора аварии и теоретического моделирования прогрессирующих обрушений с целью выработки рекомендаций по минимизации числа и последствий однотипных аварий необходимо выработать «требования» к «критическим» конструкциям.

«Критическая» конструкция «стареет» во времени, а именно:

1. По мере увеличения времени эксплуатации увеличивается общее число дефектов и повреждений в пределах одной («критической») конструкции, а так же общее число поврежденных конструкций, что отчетливо видно на рисунках 2 и 3, отображающих повреждаемость основных несущих конструкций зданий. Особенно активно «стареют» конструкции в рассмотренных отраслях после 25-30 лет эксплуатации.

2. В то же время с увеличением продолжительности эксплуатации развиваются и сами дефекты как в «критических», так и в других конструкциях – увеличиваются размеры общих погибов, прогрессирует коррозия, растут и раскрываются трещины и т.д.

3. Со временем увеличивается эксплуатационная нагрузка как на все, так и в большей степени на «критические» конструкции – скапливаются пылевые отложения, увеличивается число гидроизоляционных слоев, происходит замачивание утеплителя кровли и т.д., что ускоряет процесс «старения» и разрушения «критической» конструкции.

4. «Критическая» конструкция располагается в самой нагруженной части здания или пролете с максимальным уровнем климатических и технологических воздействий – воздействие циклических или динамических эксплуатационных нагрузок, а также высоких технологических температур и др.

Таким образом, выполненный статистический анализ накопления в процессе эксплуатации дефектов и повреждений несущими конструкциями зданий основных производств химической и энергетической промышленности, учитывающий реальный износ конструкций с течением времени, позволяет приступить к теоретическому моделированию «критической» конструкции, условно ослабив наиболее нагруженную несущую конструкцию наименее выгодным сочетанием числа дефектов эксплуатации с наиболее крупными, но реально зарегистрированными размерами дефектов. В дальнейшем, теоретически продолжая увеличивать размеры дефектов и повреждений, можно моделировать разрушение «критической» конструкции и оценивать возможность возникновения прогрессирующего обрушения части (например, блока покрытия) либо всего здания или сооружения.

Полученные в результате подобных расчетов сведения можно использовать уже на стадии проектирования новых зданий и сооружений, подбирая необходимые конструктивные решения, а также при планировании капитальных ремонтов в действующих цехах, путем закладывания необходимых запасов прочности, подбора антикоррозийного состава и других мероприятий, позволяющих обеспечить необрушаемость зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добромислов, А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений [Текст] / А.Н. Добромислов. – М.: МГСУ. 2008. – 301 с.
2. Кузнецов, И.П. Проектирование и строительство тепловых электростанций [Текст] / И.П. Кузнецов, Ю.Р. Иоффе. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 576 с.

3. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений [Текст]: ЦНИИПромзданий. – М. 2001. – 99 с.

4. Руководство по эксплуатации строительных конструкций производственных зданий промышленных предприятий [Текст]. – М., 2004.

К.И. Ерёмин

Московский государственный строительный университет, г. Москва
Доктор технических наук, профессор кафедры «Испытание сооружений»
E-mail: president@weld.su

Е.Л. Алексеева

ООО «ВЕЛД», г. Магнитогорск
Кандидат технических наук, директор Управления промышленной безопасности
E-mail: alekseeva@weld.su

K. ERYOMIN, E. ALEKSEEVA

**SIMULATION OF PROGRESSIVE FAILURE OF BUILDINGS
AND STRUCTURES ON THE BASIS OF STATISTICAL
ANALYSIS OF ACCUMULATED DAMAGE**

In this paper, damage of the main load-carrying structures of power and chemical facilities are investigated in order to improve overall safety of buildings and structures, ideal diagrams of damages of main load-carrying structures of explored buildings, reflecting changes in their technical condition, are presented, diagrams of accumulated in the process of usage specific defects and damages of principals are presented. The term of “critical” construction is implemented, requirements to “critical construction” are formulated.

Keywords: buildings; energy companies; chemical production; analysis; defects; damage; load-carrying structures; technical condition; service life; damage evaluation.

BIBLIOGRAPHY

1. Dobromyslov, A.N. Diagnostika povrezhdenij zdaniy i inzhenernyh sooruzhenij [Tekst] / A.N. Dobromyslov. – М.: MGSU. 2008. – 301 s.
2. Kuznecov, I.P. Proektirovanie i stroitel'stvo teplovyh jelektrostantsij [Tekst] / I.P. Kuznecov, Ju.R. Ioffe. – М.: Jenergoatomizdat, 1985. – 576 s.
3. Rekomendacii po ocenke nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Tekst]: CNIIPromzdaniy. – М. 2001. – 99 s.
4. Rukovodstvo po jekspluatacii stroitel'nyh konstrukcij proizvodstvennyh zdaniy promyshlennyh predpriyatij [Tekst]. – М., 2004.

K. Eryomin

Moscow state university of civil engineering, Moscow
Doctor of technical sciences, professor of the department «Structure test department»

E. Alekseeva

ООО «ВЕЛД», Магнитогорск
Candidate of technical sciences, director of Industrial safety department

МЕРКУЛОВ С.И.

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются подходы к решению проблемы обеспечения живучести строительных конструкций и конструктивных систем при проектировании зданий и сооружений. Приведен обзор некоторых исследований по оценке живучести конструкций и конструктивных систем. Приведены подходы к предотвращению прогрессирующего обрушения здания и сооружения. Приведены некоторые результаты анализа расчетов живучести железобетонных конструкций и конструктивных систем.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, конструктивные системы, хрупкое разрушение, прогрессирующее разрушение, живучесть.

Сформированная нормативная база позволяет обеспечить надежность строительного объекта, в общепринятой терминологии, как свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, которые требуют функции объекта в заданных условиях и режимах эксплуатации [1, 2]. Надежность строительного объекта поддерживается обеспечением долговечности и безотказности. Применительно к проектированию строительных объектов действующими сводами правил обеспечиваются параметры прочности, жесткости, устойчивости. В настоящее время в связи с участвовавшими разрушительными природными и техногенными катастрофами возрастает актуальность экспериментально-теоретических исследований и обоснования конструктивной безопасности и живучести объектов, снижения рисков.

В рамках исследования конструктивной безопасности железобетонных конструкций разработаны методы оценки несущей способности, деформативности и трещиностойкости отдельных конструкций и конструктивных систем в условиях проявления коррозионных повреждений бетона и арматуры, повреждений узлов сопряжений конструкций, изменения конструктивной системы при её усилении. Решения задач конструктивной безопасности основываются на методе предельных состояний. С единых позиций выполнена оценка напряженно-деформированное состояние конструкций и определены резервы на всех этапах жизненного цикла объекта. Исследованы механизмы и предложены модели коррозионного и силового повреждения железобетона с учетом знака и уровня напряжений [3-6].

В последние годы обозначился интерес к проблеме живучести зданий и сооружений. Во многих отраслях техники сформированы методы и модели оценки живучести сложных систем. В соответствии с [1] под живучестью понимают свойство объекта противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии повреждений определенного вида или при отказе некоторых компонентов.

В строительной науке обозначены проблемы живучести зданий и сооружений и определены направления решения этих проблем, формируется терминология по данной тематике, так как в нормативных документах пока отсутствуют понятия и определения по вопросу живучести. В [7] предложено под живучестью конструкций понимать свойство конструкции сохранять общую несущую способность при локальных разрушениях, вызванных природными и техногенными воздействиями, по крайней мере, в течение некоторого времени. Многие исследователи связывают живучесть с сопротивлением зданий и сооружений прогрессирующему разрушению (обрушению) при аварийных воздействиях [3, 7, 9]. В Стандарте [2] дано определение прогрессирующему обрушению как последовательному (цепному) разрушению несущей

щих строительных конструкций и оснований, приводящему к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения.

Значимость исследований прогрессирующих обрушений определено Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» в соответствии, с которым при проектировании объектов повышенного уровня ответственности должна быть учтена аварийная ситуация, имеющая малую вероятность возникновения и небольшую продолжительность, но приводящая к достижению предельных состояний. Такими аварийными ситуациями определены взрывы, столкновения с аварией и (или) пожарами, а также отказ одной из несущих конструкций. К настоящему времени сформированы определенные подходы и методы оценки возможного прогрессирующего обрушения способы защиты зданий и сооружений [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Сформулирована общая методология снижения рисков прогрессирующих разрушений зданий и сооружений, основные положения которой следующие:

- предупреждение или полное исключение организационными методами возможности аварийного воздействия, например, взрывов в результате теракта, а именно такая рассматривается расчетная ситуация, при которой из конструктивной системы мгновенно удаляется один или несколько элементов;

- уменьшение объема разрушения объекта конструктивными методами: создание общей конструктивной неразрезности каркасов, введение в конструктивную схему дополнительных связей, непрерывное армирование элементов монолитных железобетонных перекрытий, исключение хрупкого разрушения отдельных элементов и узлов их сопряжения и другие;

- предотвращение прогрессирующего обрушения: на основании анализа выявляются конструктивные элементы, разрушение которых неизбежно приводит к прогрессирующему обрушению и причинению наибольшего ущерба объекту, персоналу и оборудованию. При проектировании обеспечивается «абсолютная» прочность данного элемента на действие аварийных нагрузок.

Экспериментально – теоретическими исследованиями установлено, что мгновенное разрушение элемента или связи конструктивной системы при действии эксплуатационной нагрузки приводит к динамическому догружению всех остальных элементов системы и, как следствие, к возможному прогрессирующему обрушению [3]. Расчеты конструктивных систем при разрушении элемента и возникновении опасности прогрессирующего обрушения развиваются по направлениям. Первое направление: высокоточный нелинейный динамический расчет; второе направление: приближенный динамический расчет в упруго-линейной постановке; третье направление: упрощенный расчет, основанный на применении эквивалентных статических нагрузок с введением коэффициента динамичности.

В [9] рассмотрено прогрессирующее обрушение по отношению к локальному разрушению отдельного конструктивного элемента, вызвавшему цепное обрушение, выделяют прогрессирующее обрушение и непропорциональное обрушение. Прогрессирующее обрушение определено как внезапное разрушение, независимо от причины, приведшее к перераспределению усилий и последующему разрушению других элементов до нового состояния равновесия, при котором часть конструктивной системы или все здание будут обрушены. При непропорциональном обрушении область прогрессирующего обрушения превышает допустимые размеры, установленные нормативными документами. Таким образом, при проектировании объектов нормируются расчетные ситуации с ограниченными областями локальных разрушений. В соответствии с [10, 11] зона локального разрушения несущих конструкций ограничивается площадью 80 квадратных метров на одном этаже. Аналогичные ограничения зон локального разрушения установлены нормами и других стран, например Европейскими нормами и нормами США [15, 16].

Вопросы живучести в основном рассматриваются применительно к статически неопределимым конструктивным системам зданий и сооружений. Целесообразно распространить требование живучести на отдельные железобетонные конструкции, не включенные в конструктивные системы, как свойство конструкции сохранять общую несущую способность при

локальных разрушениях в течение некоторого времени. Критерием живучести железобетонной в данной постановке является сопротивляемость конструкции хрупкому разрушению. На стадии проектирования изгибаемого элемента недопущение хрупкого разрушения обеспечивается ограничением высоты сжатой зоны. Для чего в своде правил по проектированию железобетонных конструкций введено известное обязательное условие $\xi \leq \xi_R$.

В [17] живучесть железобетонной конструкции рассматривается как остаточный ресурс на конкретном этапе её эксплуатации с учетом выявленных силовых и средовых повреждений. Для оценки живучести изгибаемого элемента предложены характеристики – параметр живучести, отражающий напряженно – деформированное состояние элемента, и предельная живучесть. Физический смысл ограничения параметра живучести предельным значением заключается в недопущении образования продольных трещин в бетоне сжатой зоны, что определяет хрупкий характер разрушения элемента.

При рассмотрении живучести конструктивных систем зданий и сооружений со статически неопределимой расчетной схемой при аварийных воздействиях (взрыв, механические воздействия и другие). На конструктивную систему здания оказывают влияние коррозионные повреждения железобетонных конструкций в результате длительной эксплуатации в агрессивных условиях. Коррозионные повреждения приводят к снижению силового сопротивления и жесткости конструкции, к развитию больших деформаций и трещин. В тоже время предположение о том, что коррозионные повреждения отдельных конструкций и узлов конструктивной системы могут явиться причиной прогрессирующего обрушения, представляется маловероятным. Так как коррозионные повреждения железобетонных конструкций развиваются во времени и легко диагностируются, а обязательным условием эксплуатации зданий и сооружений является установленная система технического обслуживания и ремонта.

Это подтверждается опытом обследования железобетонных конструкций зданий и сооружений [18].

На основании приведенного анализа можно сформулировать следующие положения:

1. Следует рассматривать живучесть железобетонной конструкции как свойство противостоять хрупкому разрушению. Живучесть конструктивных систем можно определить как способность системы противостоять прогрессирующему обрушению при аварийных нагрузках и воздействиях.

2. Расчет живучести железобетонных конструкций и конструктивных систем полностью вписывается в положения метода предельных состояний. Расчет по первой группе предельных состояний должен обеспечить конструкцию от разрушения любого характера и с учетом в необходимых случаях деформированного состояния конструкции, а конструктивную систему – от локального и прогрессирующего обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1990-07-01. М.: Издательство стандартов, 1990.
2. СТО 36554501. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [Текст]. – Введ. 2008-09-23. М.: НИЦ Строительство, 2008.
3. Бондаренко, В.М. Некоторые результаты анализа и обобщения научных исследований по теории конструктивной безопасности и живучести [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Ключева, В.И. Колчунов, Н.Б. Андросова // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – №4. – С. 3-13.
4. Меркулов, С.И. О развитии теории конструктивной безопасности эксплуатируемых зданий и сооружений [Текст] / С.И. Меркулов // Вестник отделения строительных наук. – М.: РААСН. – 2014. – №18. – С. 43-46.
5. Меркулов, С.И. Конструктивная безопасность эксплуатируемых железобетонных конструкций [Текст] / С.И. Меркулов // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – №4. – С. 53-54.
6. Бондаренко, В.М. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях [Текст] / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №2. – С. 28-31.
7. Назаров, Ю.П. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях [Текст] / Ю.П. Назаров, А.С. Городецкий, В.Н. Симбиркин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – №4. – С. 5-9.

8. Тамразян, А.Г. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: Научное издание. Под общ. ред. А.Г. Тамразяна. – М.: АСВ. – 304 с.
9. Тур, В.В. Проектирование конструктивных систем зданий в особых расчетных ситуациях [Текст] / В.В. Тур // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. – Курск: КГУ, 2010. – С. 166-187.
10. МНСН 4.19-05 Многофункциональные высотные здания и комплексы [Текст]. – М.: Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции г. Москвы, ОАО ЦНИИЭПжилища, 2005.
11. МГСН 4.19-2005 Временные нормы и правила. Проектирование многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве [Текст]. – Введ. 2005-12-28. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, 2005.
12. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения [Текст]. – Введ. 2005-05-11. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, МНИИТЭП, НИИЖБ, 2005.
13. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий [Текст]. – Введ. 1999-08-24. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, МНИИТЭП, 2005.
14. Алмазов, В.О. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. Монография / В.О. Алмазов, Кхой Као Зуй. – М.: АСВ. – 2013. – 128 с.
15. EN 1991-1-7 Part 1-7: General Actions – Accidental actions. CEN. 2003, pp. 69.
16. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defense (DoD), 2003, 176 p.
17. Скоробогатов, С.М. Живучесть как основа для определения долговечности изгибаемых железобетонных конструкций при обследовании [Текст] / С.М. Скоробогатов // Бетон и железобетон. – 2006. – №5. – С. 18-22.
18. Меркулов, С.И. Повреждения железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений [Текст] // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. – Курск: КГУ, 2012. – С. 147-150.

С.И. Меркулов

Курский государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»

E-mail: mersi.dom@yandex.ru

S. MERKULOV

ON THE DURABILITY ASSURANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Approaches to the problem of ensuring the survivability of structures and structural systems when designing buildings and structures. An overview of some studies on the survivability of structures and structural systems. Approaches to prevention of progressive collapse of buildings and structures. Some results of analysis of the survivability calculations of reinforced concrete structures and structural systems.

Keywords: reinforced concrete design, structural systems, brittle fracture, progressive damage, survivability.

BIBLIOGRAPHY

1. GOST 27.002-89. Nadezhnost' v tehnike. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija [Текст]. – Введ. 1990-07-01. М.: Izdatel'stvo standartov, 1990.
2. STO 36554501. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozhenija [Текст]. – Введ. 2008-09-23. М.: NIC Stroitel'stvo, 2008.
3. Bondarenko, V.M. Nekotorye rezul'taty analiza i obobshhenija nauchnyh issledovanij po teorii konstruktivnoj bezopasnosti i zhivuchesti [Текст] / V.M. Bondarenko, N.V. Kljueva, V.I. Kolchunov, N.B. Androsova // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №4. – С. 3-13.
4. Merkulov, S.I. O razvitii teorii konstruktivnoj bezopasnosti jekspluatiruemyh zdaniy i sooruzhenij [Текст] / S.I.Merkulov // Vestnik otdelenija stroitel'nyh nauk. – М.: RAASN. – 2014. – №18. – С. 43-46.
5. Merkulov, S.I. Konstruktivnaja bezopasnost' jekspluatiruemyh zhelezobetonnyh konstrukcij [Текст] / S.I. Merkulov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2009. – №4. – С. 53-54.
6. Bondarenko, V.M. Koncepcija i napravlenija razvitija teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdeystvij [Текст] / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – №2. – С. 28-31.

7. Nazarov, Ju.P. K probleme obespechenija zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij pri avariynnykh vozdeystviyah [Tekst] / Ju.P. Nazarov, A.S. Gorodeckij, V.N. Simbirkin // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2009. – №4. – S. 5-9.
8. Tamrazjan, A.G. Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychajnykh situacijah prirodnoho i tehnogennoho haraktera: Nauchnoe izdanie. Pod obshh. red. A.G. Tamrazjana. – M.: ASV. – 304 s.
9. Tur, V.V. Proektirovanie konstruktivnykh sistem zdaniy v osobykh raschetnykh situacijah [Tekst] / V.V. Tur // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i reshenija. Materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh chtenij. – Kursk: KGU, 2010. – S. 166-187.
10. MNSN 4.19-05 Mnogofunkcional'nye vysotnye zdaniya i komplekсы [Tekst]. – M.: Departament gradostroitel'noj politiki, razvitiya i rekonstrukcii g. Moskvy, OAO CNIIJePzhilishha, 2005.
11. MGSN 4.19-2005 Vremennye normy i pravila. Proektirovanie mnogofunkcional'nykh vysotnykh zdaniy i zdaniy-kompleksov v gorode Moskve [Tekst]. – Vved. 2005-12-28. M.: Pravitel'stvo Moskvy, Moskomarhitektura, 2005.
12. Rekomendacii po zashhite monolitnykh zhilykh zdaniy ot progressirujushhego obrusheniya [Tekst]. – Vved. 2005-05-11. M.: Pravitel'stvo Moskvy, Moskomarhitektura, MNIITJeP, NIIZhB, 2005.
13. Rekomendacii po predotvrashheniju progressirujushhih obrushenij krupnopanel'nykh zdaniy [Tekst]. – Vved. 1999-08-24. M.: Pravitel'stvo Moskvy, Moskomarhitektura, MNIITJeP, 2005.
14. Almazov, V.O. Dinamika progressirujushhego razrusheniya monolitnykh mnogojetazhnykh karkasov. Mono-grafija / V.O. Almazov, Khoj Kao Zuj. – M.: ASV. – 2013. – 128 s.
15. EN 1991-1-7 Part 1-7: General Actions – Accidental actions. CEN. 2003, pp. 69.
16. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defense (DoD), 2003, 176 p.
17. Skorobogatov, S.M. Zhivuchest' kak osnova dlja opredelenija dolgovechnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri obsledovanii [Tekst] / S.M. Skorobogatov // Beton i zhelezobeton. – 2006. – №5. – S. 18-22.
18. Merkulov, S.I. Povrezhdenija zhelezobetonnykh konstrukcij jekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenij [Tekst] // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i reshenija. Materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh chtenij. – Kursk: KGU, 2012. – S. 147-150.

S. Merkulov

Kursk state university, Kursk

Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Industrial and civil construction»

E-mail: mersi.dom@yandex.ru

УДК 69.036.3:696

БУЛГАКОВ А.Г., БУЗАЛО Н.С., ЕРМАЧЕНКО П.А.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИХ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Статья посвящена вопросам использования фотобиореакторов с выращиваемыми водорослями в качестве элемента городского строительства. Применение микроводорослевыми фотобиореакторов позволяет решить несколько задач: получение биотоплива третьего поколения, утилизации диоксида углерода, обеззараживание сточных вод, регенерация кислорода и очистка воды от трофических веществ. Была использована мультиагентная система, чтобы выявить наиболее эффективную стратегию развития городов с точки зрения применения локальных фотобиологических систем очистки. Рассматривается проблема многомерной оптимизации при описании механизма кластеризации в городском пространстве на основе использования настраиваемых клеточных автоматов, согласно законодательством о формировании экологических ниш в природе. Конструктивно, предлагается выполнить основные технологические узлы в виде полупрозрачных мембран. Фотобиореакторы с водорослями интегрируются в архитектурную оболочку здания. Форма конструкции оптимизирована на базе использования генетического алгоритма.

Ключевые слова: микроводорослевый фотореактор, дезинфекция сточных вод, параметрическая оптимизация, генетический алгоритм, мультиагентная система.

Одной из самых больших проблем растущих мегаполисов является утилизация органических отходов. Согласно опубликованным докладом «Всемирной программы оценки водных ресурсов» (WWAP) [1], сейчас более 1,2 млрд. людей живут в условиях постоянного дефицита пресной воды, и около 2 млрд. страдают от него регулярно. Продолжающаяся урбанизация усугубляет ситуацию, поскольку городские жители значительно более чувствительны к нехватке воды. В следующие несколько десятилетий ожидается, что городское население вырастет на 1,8 миллиарда человек (по сравнению с 2005 г.) и составит 60% всего населения мира. Около 95% этого роста составят жители развивающихся стран, в которых темпы строительства централизованных очистных сооружений не успевают за ростом городского населения.

Существующие системы утилизации отходов городов ориентированы на использование протяжённых канализационных сетей, что связано с колоссальными потерями воды, а также больших площадей очистных сооружений, которые деформируют естественные ландшафты. А учитывая положительную динамику темпов высотного строительства в современных городах, использование централизованных систем водоснабжения приводит к чрезмерному перерасходу электроэнергии на насосное оборудование. В развитых странах 2-3% всей потребляемой электроэнергии тратится на эксплуатацию очистных сооружений. Поэтому локальные системы очистки сточных вод являются оптимальным решением как для удалённых коттеджных посёлков, так и для небоскребов.

Выше перечисленные негативные факторы в целом присущи для крупных мегаполисов, но в развивающихся странах это проблема наиболее актуальна, поскольку там по экономическим причинам нет никакой возможности для организации централизованного сбора и очистки сточных вод. Мы представляем альтернативный подход организации локальных очистных сооружений интегрированных в плотную городскую застройку. В работе [2] было описана концепция фотобиологических очистных сооружений. Данное исследование отталкивалось от успешного опыта проектирования закрытых биологических систем экологического жизнеобеспечения, которые в 60-80-х годах прошлого века изначально создавались для длительных космических полетов [3]. Для систем такого типа одной из основных проблем являлось высокое

энергопотребление, что сдерживало их внедрение на космических станциях. Однако в земных условиях культивирование микроводорослей на очистных сооружениях канализации позволяет за счёт производства биотоплива третьего поколения обеспечить их энергонезависимость.

Содержащиеся в сточных водах соединения азота и фосфора являются жизненно необходимыми элементами для роста микроводорослей. В ближайшее время значительные объёмы фосфорных удобрений потребуются для обеспечения нужд растущего биоэнергетического сектора экономики. Однако, в отличие от соединений азота, синтезируемых из атмосферного воздуха, фосфорные соединения можно только добывать. В тоже время, истощение планетарных запасов фосфора является одной из наиболее серьёзных угроз продовольственной безопасности человечества. По разным оценкам его запасов осталось на 30-80 лет. Однако сейчас около половины используемого фосфора безвозвратно теряется. Эти потери в основном связаны с эрозией и выщелачиванием почв (20%), а также неэффективной переработкой сточных вод и биоразлагаемых отходов (30%) [4].

Имеющиеся в открытой печати литературные данные подтверждают целесообразность использования микроводорослей для очистки сточных вод с целью производства биотоплива третьего поколения, что позволяет производить на порядок больше энергии по сравнению с системами, работающими на избыточном активном иле. По мнению многих исследователей, культивирование микроводорослей являются одним из наиболее перспективных направлений создания самодостаточных биферосовместимых городов. На данный момент существует несколько проектов использующих подобные технологии.

Испанская фирма Aqualia являющаяся 3-ей по величине в мире водопроводной компанией реализует проект All-Gas, в рамках которого планируется выращивать водоросли на канализационных очистных сооружениях с целью производства дизельного топлива для муниципального транспорта. Проект стоимостью в 15,7 миллионов долларов, и занимающий 10,5 гектаров земли, уже в 2015 году планируют вывести на проектную мощность. По крайней мере, ещё 300 небольших городов Испании рассматривают возможность строительства подобных сооружений [5].

Первым в мире прототипом жилого дома, который по заверения разработчиков на 50% покрывает своё энергопотребление за счёт водорослей, выращиваемых непосредственно на фасаде самого здания, является проект BIQ House, представленное на международной выставке Hamburg International Building Exhibition 2013. Данный проект является совместной разработкой международной дизайнерской компании Agur, немецкой консультационной компании Strategic Science Consultants (SSC) и австрийской архитектурной компании Splitterwerk Architects. С солнечной стороны фасада здания с целью обеспечения энергетических установок биомассой установлены реакторы с микроводорослями. Они также позволяют использовать избыточную солнечную энергию в системе отопления. К тому же в жаркий период года прозрачные панели с водорослями защищают внутренние помещения от чрезмерного нагрева [6].

Французское архитектурного бюро X-TU при поддержке лаборатории CNRS «Gerea» из Университета Нанта запустило проект «Symbio2». На первом этапе эксперимента предусматривается установка фотобиореакторов на фасаде здания в городе Сен-Назер. Затем, основываясь на результатах полученных исследований, планируется монтаж реакторов на мусоросжигательном заводе Alcéade Nantes. Предполагается, что выделяемые при сжигании мусора тепло и диоксид углерода обеспечат оптимальные условия для культивирования микроводорослей [7].

Фотобиореакторы, по своей сути, играют роль солнечных панелей, преобразующих солнечную радиацию в энергию. Однако, при изготовлении конструкций из стекла и стали, установка фотобиореакторов обходится дороже чем фотогальванических элементов. Существенно снизить цену фотобиореакторов можно за счёт использования недорогих светопропускаемых плёнок, что было реализовано в проекте OMEGA (от Offshore Membrane Enclosure for Growing Algae), разработанном в Исследовательском центре Эймса (Моффед-Филд, Калифорния, США), при участии NASA. Данная технология предусматривает выращивания пресноводных водорослей в фото-биореакторах, которые представляют собой прозрачные гибкие пластиковые трубки, плавающие на морском шельфе. В процессе роста водоросли очищают

стоки, выделяя при этом кислород, а избыточная биомасса отбирается и перерабатывается в биотопливо. В настоящее время данные фотобиореакторы испытываются в Сан-Франциско; на них же отрабатываются попутные технологии – в частности совместное выращивание водорослей с культивированием мидий. На создание проекта OMEGA авторов вдохновили замкнутые системы жизнеобеспечения для длительных космических полётов, используя уникальный опыт создания которых, разработчики стремятся уменьшить потенциальные технические риски при строительстве крупномасштабных сооружений на Земле [8].

В рамках Milan Design Week 2014 были представлены модульные строительные блоки Urban Algae Conope, изготовленные из прозрачной тефлоновой плёнки (ETFE), с интегрированными фотобиореакторами. Разработанная ecoLogic Studio архитектурная оболочка, выполненная из данных блоков, будет построена к международной выставке Expo Milano 2015 для итальянского павильона. Данное инженерное сооружение сможет производить такое же количество кислорода, что и четыре гектара леса и почти 150 кг биомассы микроводорослей в день [9].

Фотобиологические очистные сооружения, интегрированных в архитектурную оболочку здания позволяют: получать биотопливо третьего поколения из микроводорослей, утилизировать диоксид углерода, очищать и обеззараживать сточные воды, рационально перерабатывать соединения фосфора, использовать солнечную радиацию в системах отопления и адаптивного освещения. Для экономии полезной площади здания основные технологические узлы фотобиологических очистных сооружений предложено вынести на фасад здания, выполнив их в виде гидropневматической системы из светопроницаемой мембраны (ETFE). Данное инженерное решение может быть интегрировано в уже существующие очистные сооружения, либо непосредственно в городскую застройку, поскольку за счёт рекуперации диоксида углерода и изготовления герметичной светопроницаемой архитектурной оболочки санитарная зона вокруг сооружений может быть значительно сокращена. На рисунке 1 показан возможный вариант конструкционного решения для локальных очистных сооружений.

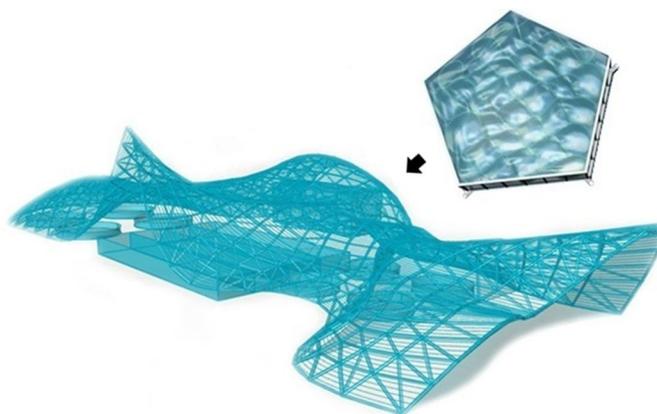


Рисунок 1 – Архитектурная оболочка для установки фотобиореакторов

Мы ориентируемся на разработку малых очистных сооружений, предназначенных для 20-30 человек. Основное отличие нашей системы является высокая степень закрытости потоков веществ. Таким образом, самая ответственная часть проекта состоит в том, чтобы сбалансировать все технологические процессы. Эта задача решается посредством использования достаточно точной математической модели фотобиологических очистных сооружений, основанной на нестационарных дифференциальных уравнениях, описывающих законы сохранения вещества и энергии в объёме основных сооружений. В дальнейшем предложенная математическая модель может быть применена в качестве основы для автоматизированной системы управления.

Параметрический подход к проектированию инженерных конструкций является наиболее подходящим для создания урбанизированных объектов отвечающих принципам биосферной совместимости. В этом случае поиск оптимальных решений, основывается на прототипировании многофакторной нелинейной системы, а процесс генерирования проекта подобен выращиванию живого организма, за счёт использования различных алгоритмов оптимизации

позволяющих решать в автоматизированном режиме сложные задачи формообразования. Например, обеспечить максимальную эффективность использования естественного освещения. Параметрические методы также позволяют автоматизировать многие строительные процессы, что должно положительно сказаться на стоимости строительства фотобиологических очистных сооружений. При этом дизайн архитектурной оболочки, полученный в результате использования алгоритмов параметрической оптимизации строительных конструкций, гармонично вписывается в природные ландшафты и имеет эстетически привлекательный внешний вид.

Архитектурные мембрана выполненные из ETFE (этилен-тетра-фтор-этилен) выдерживают перепад температуры от -80°C до 155°C . Эти оболочки прозрачны и обладают высокими теплозащитными свойствами. Они инертны к щелочной и кислотной среде и не теряет своих химических свойств в течение всего срока службы (примерно 25 лет). Благодаря антиадгезионным свойствам и очень гладкой поверхности мембран, они самоочищаются под действием дождя и снега. Это свойство является особенно ценным, учитывая склонность фотобиореакторов к биообрастанию.

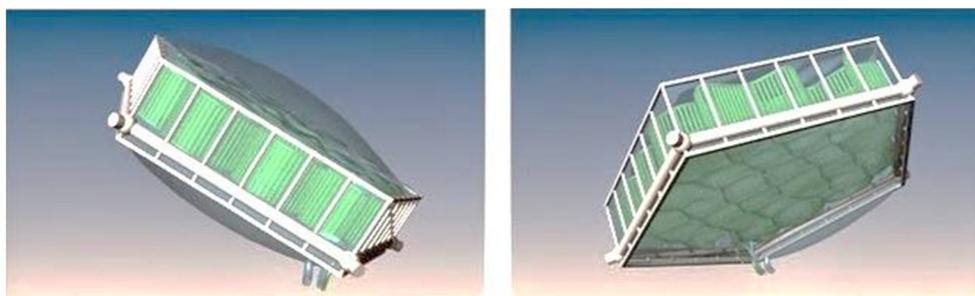


Рисунок 2 – Модульные строительные блоки с интегрированными фотобиореакторами

На эффективность работы фотобиологических очистных сооружений влияет сочетание многих внешних факторов, таких как: величина доступной солнечной радиации, объём биогенных элементов поступающих с органическими отходами, наличие источников диоксида углерода, количество потребителей тепловой энергии и др., распределение которых в городской среде является неоднородным и зачастую наличие одного фактора исключает присутствие других.

Использование инструмента подвижных клеточных автоматов позволяет решить многомерную задачу привязки проектируемых сооружений к существующей городской застройке. Данный алгоритм предложено реализовать с помощью рекуррентной схемы (рис. 3), которая описывает поведение различных клеточных автоматов с учётом влияния нескольких неравномерно распределённых в городской среде факторов [10].

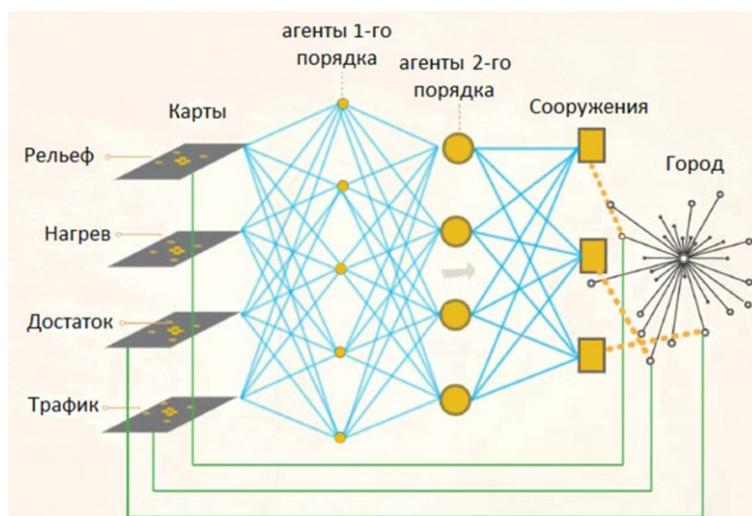


Рисунок 3 – Рекуррентная схема расчёта локализации сооружений

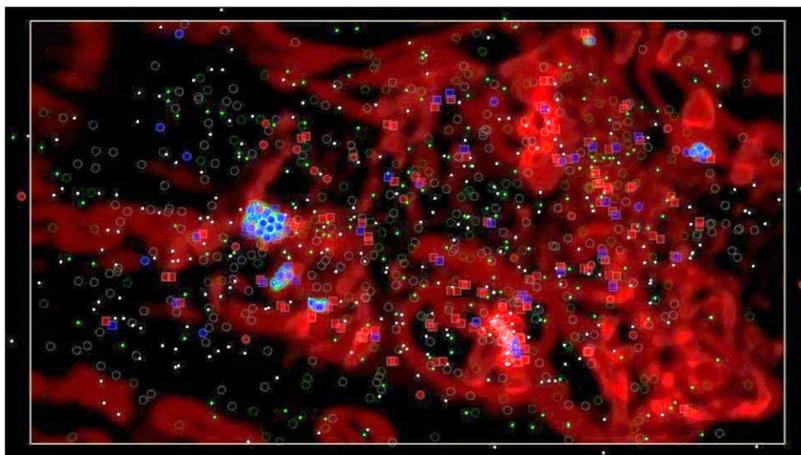


Рисунок 4 – Пример кластеризации подвижных клеточных автоматов

Для формирования кластеров из подвижных клеточных автоматов сделана попытка описания их поведения закономерностями характерными для природных экологических ниш. Принцип алгоритма сводится к следующему. Каждый фактор представлен на отдельной монохромной карте, где более яркий цвет соответствует более интенсивному воздействию. Важно отметить, что для различных задач оптимальными является различные интенсивности одного и того же фактора, и далеко не всегда максимальные. Подвижные клеточные автоматы (агенты 1-го порядка) при благоприятном сочетании факторов внешне среды замедляются. В противном случае их скорость увеличивается. Таким образом, они концентрируются в областях, где факторы среды принимают оптимальные значения. В тех местах, где концентрация подвижных автоматов превышает пороговый предел, возникают неподвижные агенты 2-го порядка, представляющий из себя прообразы будущих инженерного сооружения. Эти агенты способны, в свою очередь, изменять интенсивность факторов местности. Время жизни агентов первого порядка ограничено, однако, оно может изменяться в зависимости от концентрации в их окрестности агентов 1-го порядка.

Таким образом, используя данный подход, становится возможным определить локализацию фотобиологических очистных сооружений в местах, где обеспечивается благоприятное сочетание всех ключевых факторов. После того как была определена оптимальная локализация фотобиологических очистных сооружений в масштабе городской застройки, необходимо принять во внимание отбрасываемые окружающими зданиями тени, что позволит наиболее эффективно интегрировать фотобиологические очистные сооружения в существующую городскую среду.

Микроводорослями для фотосинтеза максимально используется только 5% солнечной радиации, а основная часть идет на нагрев. Чтобы избежать критического перегрева, который смертелен для живых организмов форма архитектурной оболочки была оптимизирована с помощью генетического алгоритма. С этой целью использовался плагин Heliotrope, предоставляющий собой набор геометрических инструментов солнечных анализа для среды программирования Rhino / Grasshopper. Он включает в себя параметрические компоненты расчета солнечных векторов для точно определённой даты, времени и места. Гелиотроп является очень точным инструментом, потому что использует геометрический анализ вместо анимации. Это делает его очень полезным инструментом интерактивного проектирования параметрической оптимизации. На рисунке 5 представлены варианты расчёта инсоляции не оптимизированной архитектурной оболочки.

В качестве целевой функции оптимизации в генетическом алгоритме был использован интегральный прирост биомассы в течение суток учитывающий изменении суточной и годовой инсоляции. Скорость роста микроводорослей гиперболические зависела от внутренних концентраций биогенных элементов (модель Друпа) освещенности и температуры.

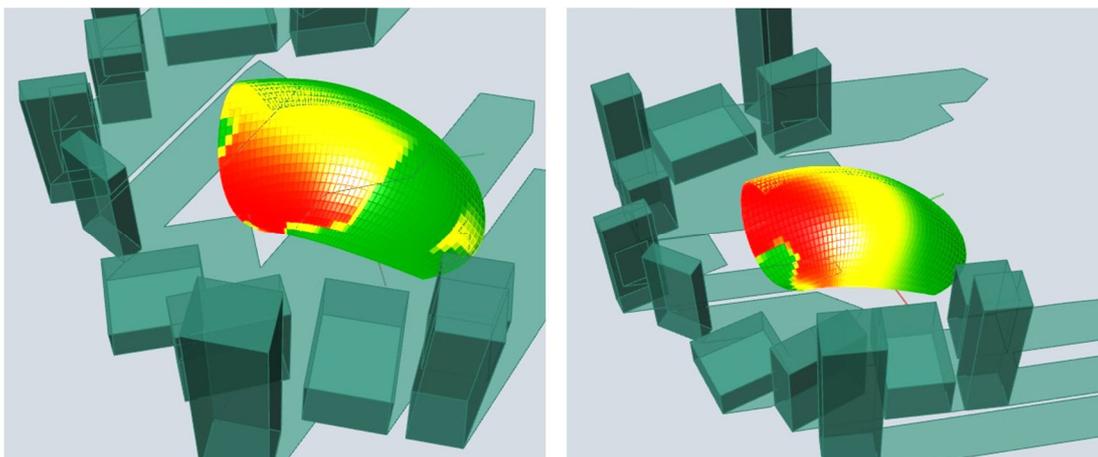


Рисунок 5 – Расчёт инсоляции архитектурной оболочки до оптимизации

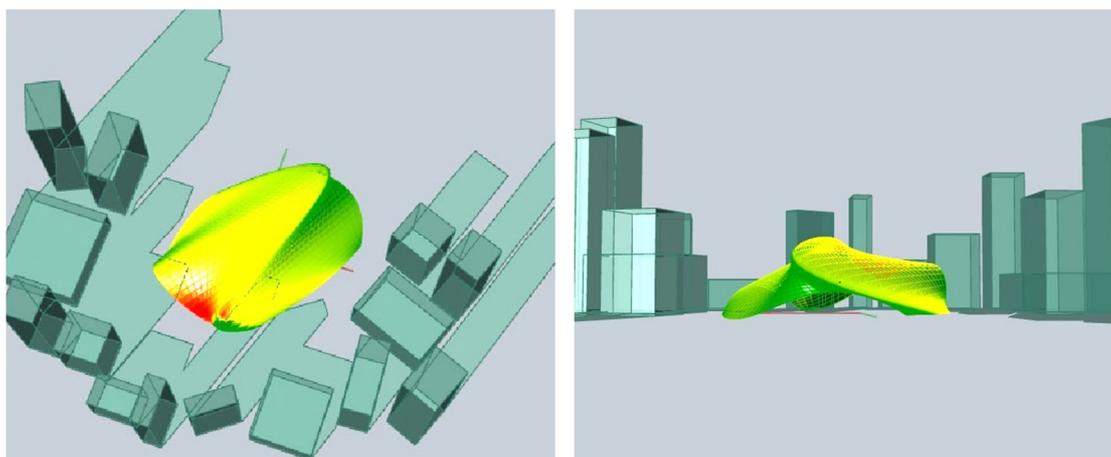


Рисунок 6 – Оптимизированная фотобиологическая архитектурная оболочка

Культивирование микроводорослей может перевернуть сферу очистки сточных вод. То, что некогда считалось побочным продуктом жизнедеятельности города, теперь может стать ценным ресурсом для обеспечения биосферной совместимости, поскольку соединения азота и фосфора, содержащиеся в сточных водах, являются необходимыми ресурсами для производства биотоплива третьего поколения из микроводорослей. Другими исследователями ранее уже была показана возможность за счёт выращивания микроводорослей на порядок повысить объём метана вырабатываемого из биомассы микроорганизмов, образующихся на канализационных очистных сооружениях. В данной же работе рассмотрены вопросы интеграции фотобиологических очистных сооружений непосредственно в городскую застройку. Важно отметить, что архитектурная оболочка фотобиологических очистных сооружений, полученная в результате параметрической оптимизации, представляет собой не просто наиболее эффективный компонент коммунальной инфраструктуры, но и современный арт-объект, позволяющий привлечь внимание к вопросам защиты окружающей среды.

В дальнейшем мы планируем в предложенном алгоритме оптимизации более детально учесть влияние рассеянного и отражённого света, а также спектрального состава излучения, поскольку это имеет ключевое значение для эффективности процессов фотосинтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP) Reports. UN-Documentation Centre on Water and Sanitation. On-line: http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/onu/en/listadoPer_Onu?&titulo=&sub=&spat=&pur=&typ=&spat2=&pub=WWAP&au=&lang2=&mont=0&year=0&lang=english&clave=&bas=&spat3=&inc=10&n

umpag=0, Accessed: 23/01/2015.

2. Buzalo N., Ermachenko P., Bock T., Bulgakov A., Chistyakov A., Sukhinov A., Zhmenya E. and Zakharchenko N. Mathematical Modeling of Microalgae-mineralization-human Structure within the Environment Regeneration System for the Biosphere Compatible City. *Procedia Engineering*, 85: 84–93, 2014. 1(2):123-345, 2014. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814018980, Accessed: 25/01/2015.

3. Nelson M., Pechurkin N.S., Allen J.P., Somova L.A., and Gitelson J.I. Bioengineering of Closed Ecological Systems for Ecological Research, Space Life Support and the Science of Biospherics, ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY in the Handbook of Environmental Engineering series, Chapter 11 in Volume 10, 2010, The Humana Press, Inc., Totowa, New York, 2010.

4. Consultative Communication on the Sustainable Use of Phosphorus. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 8.7.2013. On-line: <http://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/phosphorus/EN.pdf>, Accessed: 25/01/2015.

5. Co-financed by the EU Commission within the FP 7 programme, the project “ENERGY.2010.3.4-1: Bio-fuels from algae” On-line: <http://www.allgas.eu/Pages/AimofProject.aspx>, Accessed: 25/01/2015.

6. The Building Exhibition /Smart Material Houses / BIQ. On-line: <http://www.ibahamburg.de/en/themes-projects/the-buildingexhibition-within-the-building-exhibition/smartmaterial-houses/biq/projekt/biq.html>, Accessed: 25/01/2015.

7. Des capteurs solaires biologiques élaborés au laboratoire GENie des Procédés – Environnement – Agroalimentaire (GEPEA) bientôt sur les façades des bâtiments. On-line: http://www.univ-nantes.fr/1363880042335/0/fiche___actualite/&RH=PRES, Accessed: 25/01/2015.

8. Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA). On-line: <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html#.VN7C4ksoKes>, Accessed: 25/01/2015.

9. EcoLogicStudio Urban Algae Canopy Module ecoLogicStudio + Carlo Ratti. On-line: <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idc=at=3&idsubcat=59&idproj=129>, Accessed: 25/01/2015.

10. Ermachenko P., Bloschinskaya A., Hasyanova E., Timashev R., Gibilov A. Reflexive networks. Workshop Branchpoints. Open / Closed Cities 2013. Strelka Institute for Media, Architecture and Design. August 2 – 10 2013, Moscow, p. 7-8. http://issuu.com/katyalarina_ulab_spb/docs/open_closed_city_workshp_strelka_20.

А.Г. Булгаков

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
Доктор технических наук, профессор
E-mail: a.bulgakov@gmx.de

Н.С. Бузало

Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, г. Новочеркасск
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: buzalo.n.s@mail.ru

П.А. Ермаченко

Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, г. Новочеркасск
Инженер
E-mail: neo-ecology@mail.ru

A. BULGAKOV, N. BUZALO,
P. ERMACHENKO

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF PHOTOBIOLOGICAL ARCHITECTURAL SHELLS IN URBAN AREAS

The article deals with issues of the use of photoreactors with growing algae as an element of urban construction. Using microalgae photobioreactors can solve multiple tasks: getting a third-generation biofuels, carbon dioxide recycling, wastewater disinfection, oxygen regeneration, and water purification from nutrients. Multi agent system has been used to discover the most efficient urban strategy for local photobiological treatment plants. Project addresses the multi-dimensional optimization

problem by describing the mechanism of clustering in urban areas of movable cellular automata, in accordance with laws of the formation of ecological niches in nature. Structurally, we propose to make the main technological nodes from the translucent membrane. Photoreactors with algae are placed on the building's architectural shell. The construction form is optimized with using a genetic algorithm.

Keywords: microalgae photoreactor, wastewater disinfection, parametric optimization, genetic algorithm, multi agent system.

BIBLIOGRAPHY

1. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP) Reports. UN-Documentation Centre on Water and Sanitation. On-line: http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/onu/en/listadoPer_Onu?&titulo=&sub=&spat=&pur=&typ=&spat2=&pub=WWAP&au=&lang2=&mont=0&year=0&lang=english&clave=&bas=&spat3=&inc=10&numpag=0, Accessed: 23/01/2015.
2. Buzalo N., Ermachenko P., Bock T., Bulgakov A., Chistyakov A., Sukhinov A., Zhmenya E. and Zakharchenko N. Mathematical Modeling of Microalgae-mineralization-human Structure within the Environment Regeneration System for the Biosphere Compatible City. *Procedia Engineering*, 85: 84–93, 2014. 1(2):123-345, 2014. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814018980, Accessed: 25/01/2015.
3. Nelson M., Pechurkin N.S., Allen J.P., Somova L.A., and Gitelson J.I. Bioengineering of Closed Ecological Systems for Ecological Research, Space Life Support and the Science of Biospherics, ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY in the Handbook of Environmental Engineering series, Chapter 11 in Volume 10, 2010, The Humana Press, Inc., Totowa, New York, 2010.
4. Consultative Communication on the Sustainable Use of Phosphorus. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 8.7.2013. On-line: <http://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/phosphorus/EN.pdf>, Accessed: 25/01/2015.
5. Co-financed by the EU Commission within the FP 7 programme, the project “ENERGY.2010.3.4-1: Bio-fuels from algae” On-line: <http://www.allgas.eu/Pages/AimofProject.aspx>, Accessed: 25/01/2015.
6. The Building Exhibition /Smart Material Houses / BIQ. On-line: <http://www.ibahamburg.de/en/themes-projects/the-buildingexhibition-within-the-building-exhibition/smartmaterial-houses/biq/projekt/biq.html>, Accessed: 25/01/2015.
7. Des capteurs solaires biologiques élaborés au laboratoire GENie des Procédés – Environnement – Agroalimentaire (GEPEA) bientôt sur les façades des bâtiments. On-line: http://www.univ-nantes.fr/1363880042335/0/fiche_actualite/&RH=PRES, Accessed: 25/01/2015.
8. Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA). On-line: <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html#.VN7C4ksoKes>, Accessed: 25/01/2015.
9. EcoLogicStudio Urban Algae Canopy Module ecoLogicStudio + Carlo Ratti. On-line: <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idc at=3&idsubcat=59&idproj=129>, Accessed: 25/01/2015.
10. Ermachenko P., Bloshinskaya A., Hasyanova E., Timashev R., Gibilov A. Reflexive networks. Workshop Branchpoints. Open / Closed Sities 2013. Strelka Institute for Media, Architecture and Design. August 2 – 10 2013, Moscow, p. 7-8. http://issuu.com/katylarina_ulab_spb/docs/open_closed_city_workshp_strelka_20.

A. Bulgakov

Southwest state university, Kursk
Doctor of technical sciences, professor
E-mail: a.bulgakov@gmx.de

N. Buzalo

South-Russian state polytechnic university behalf of M.I. Platov, Novocherkassk
Candidate of technical sciences, associate professor
E-mail: buzalo.n.s@mail.ru

P. Ermachenko

South-Russian state polytechnic university behalf of M.I. Platov, Novocherkassk
Engineer
E-mail: neo-ecology@mail.ru

УДК 628.3

АЛЕКСЕЕВ М.И., ФОКИЧЕВА Е.А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

В статье рассматриваются экологические аспекты загрязнения водоемов биогенными элементами. Проводится исследование процессов очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений фосфора с использованием в качестве реагентов отходов производства. Приведены результаты исследований по эффективности удаления соединений фосфора из сточных вод в зависимости от дозы сульфата железа и фосфогипса и места ввода реагента в различные точки технологической схемы.

Ключевые слова: *сточные воды, эвтрофирование, удаление биогенных элементов, реагент, сульфат железа, фосфогипс, технологическая схема.*

Фосфор и азот являются важнейшими биогенными элементами, которые лимитируют развитие продуктивности водных объектов. Поступление избытка соединений фосфора и азота с водосбора приводит к резкому неконтролируемому приросту растительной биомассы водного объекта, что особенно характерно для непроточных и малопроточных водоемов. Происходит эвтрофирование или изменение трофического статуса водоема, сопровождающееся перестройкой всего водного сообщества и ведущее к преобладанию гнилостных процессов [1]. Азотсодержащие соединения присутствуют в поверхностных водах в следующих состояниях: растворенном, коллоидном и взвешенном. Под общим азотом понимают сумму минерального и органического азота в природных водах. Повышение концентрации ионов аммония и нитритов обычно указывает на свежее загрязнение, а увеличение содержания нитратов – на загрязнение в предшествующее время.

Под общим фосфором понимают сумму минерального и органического фосфора. Так же как и для азота, обмен фосфором между его минеральными и органическими формами, с одной стороны, и живыми организмами, с другой, является основным фактором, определяющим его концентрацию. Важное значение в установлении лимита этого элемента играет кратность разбавления сточных вод и, соответственно, биогенов в водоеме: если разбавление низкое, то даже небольшой объем поступления фосфора может привести к негативным последствиям. Сброс фосфора в водоем с низким разбавлением с концентрацией, превышающей 0,1 мг/л, легко приводит к эвтрофированию.

Для удаления соединений фосфора из сточных вод обычно используют биологические или химические (реагентные) методы. Применение в качестве реагентов отходов производства позволяет одновременно решать проблемы утилизации этих отходов и снижает себестоимость очистки этих стоков.

Объектами исследования процессов удаления соединений фосфора с использованием минеральных реагентов выбраны модельные растворы и хозяйственно-бытовые сточные воды города Вологды.

Постановка опытов осуществлялась на основе методов математического планирования эксперимента. При обработке результатов исследований применялся множественный регрессионный анализ, опыты проводились в нескольких повторностях, определялись погрешности измерений. Проводилось сопоставление полученных данных с результатами близких по характеру исследований, опубликованных в научно-технической литературе [2-12]. Исследования проб воды проводились стандартными методами по следующим параметрам: ортофосфаты, общий фосфор, общий азот, бихроматное химическое потребление кислорода (ХПК_{бихр}),

полное биологическое потребление кислорода (БПК_{полн}), взвешенные вещества (ВВ), аммиак и ионы аммония. Лаборатории, в которых проводились опытно-промышленные исследования, имеют государственную лицензию и аккредитацию. Достоверность полученных в результате работы результатов подтверждается использованием современных методов анализа и обобщения данных экспериментальных исследований, привлечением теоретических разработок в области коллоидной химии и технологии очистки сточных вод, сопоставлением полученных данных с результатами исследований в смежных областях, опубликованными в научной литературе.

В мировой практике очистки сточных вод за последние годы накоплен значительный опыт удаления соединений азота и фосфора, в России же до настоящего времени больше внимания уделялось вопросу трансформации и удаления азотных соединений. Интенсивное развитие промышленности, улучшение степени благоустроенности городов и поселков и их быстрый рост привели к тому, что несмотря на рост числа сооружений по очистке сточных вод, снижается эффективность очистки воды, в том числе и от биогенных элементов. Кроме того, повышение требований к степени очистки сточных вод вызывает необходимость строительства блока сооружений для глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов [13]. Основная задача при проектировании технологических схем по совместному удалению азота и фосфора – стабильное качество очистки от биогенных элементов при минимальных затратах и незначительном риске вторичного загрязнения водоприемников.

Целью исследований была разработка и исследование технологии глубокого удаления биогенных элементов из хозяйственно-бытовых сточных вод с использованием в качестве реагентов отходов производства, что позволяет решить экологические проблемы с их утилизацией и снизить стоимость реагентов.

Рассмотрим процесс удаления биогенных элементов из хозяйственно-бытовых сточных вод северо-западного региона на примере очистных сооружений канализации г. Вологды. Традиционный состав очистных канализационных сооружений представлен на рисунке 1.

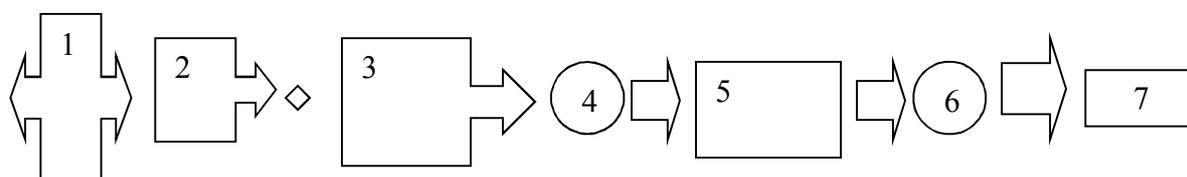
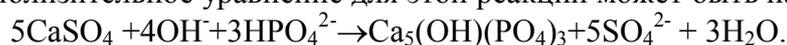


Рисунок 1 – Традиционный состав очистных канализационных сооружений
 1 – приемная камера; 2 – решетки; 3 – песколовки; 4 – первичный отстойник; 5 – аэротенк;
 6 – вторичный отстойник; 7 – водный объект

На очистных сооружениях канализации г. Вологды соединения азота удаляются с использованием стандартной биологической очистки, основанной на процессах нитрификации и денитрификации, причем данный метод позволяет снизить их содержание до нормативно-допустимого сброса. Соединения фосфора целенаправленно не удаляются, при этом имеет место превышение нормативно-допустимой концентрации по фосфору, что свидетельствует о недостаточной степени очистки сточных вод от соединений фосфора при использовании существующей технологии. Таким образом, необходим ввод дополнительных сооружений для глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов с использованием реагентов.

В качестве реагентов для удаления фосфора предлагается использовать следующие вещества, являющиеся отходами производства: сульфат железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и фосфогипс $\text{CaSO}_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$. Фосфогипс является отходом производства серной кислоты (ОАО «Аммофос», г. Череповец), вследствие чего имеет низкую себестоимость. Ион кальция в общем составе фосфогипса составляет в среднем 33% от массы в пересчете на сухое вещество. При использовании фосфогипса ион кальция реагирует с ионом фосфата в присутствии гидроксильного иона с образованием гидроксилапатита. Это вещество имеет переменный химический состав, но приблизительное уравнение для этой реакции может быть написано следующим образом:

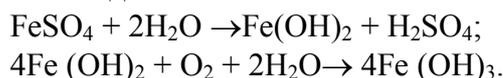


В таблице 1 представлены результаты экспериментов по удалению фосфора из хозяйственно-бытовых сточных вод при введении фосфогипса в разные точки технологической схемы (традиционная технологическая схема канализационных очистных сооружений приведена на рисунке 1).

Таблица 1 – Эффективность удаления фосфора фосфогипсом при введении реагента в разные точки технологической схемы

Отношение $C_{Ca}:C_p$	Эффективность удаления фосфора, %			
	Точка перед песколовкой Сисх.Р=3,323 мг/л	Точка перед первичными отстойниками Сисх.Р=2,95 мг/л	Точка перед аэротенками, Сисх.Р=2,72 мг/л	Точка перед вторичными отстойниками, Сисх.Р=2,45 мг/л
0,5	18	21,5	38,6	22,3
1	34	41,9	42,5	42,6
1,5	35,1	45,1	58	52,1
2	38,2	47,2	59,6	56,6
2,5	43,3	52,3	59,3	59,6
3	44,3	57,3	57,6	50,3
3,5	46,9	58,9	49,4	42,4
4	51,4	60,4	43,6	38,2
4,5	53,7	63,2	41,6	34,6
5	55,4	63,4	37,1	31
5,5	56,2	61,2	34,8	28,6
6	50,6	55,6	36,8	25,3
6,5	47,6	49,6	40,56	27,1
7	44,2	41,6	46,3	32,4
7,5	42,1	41,7	49,6	38,9
8	40,9	42,8	56,8	44,5
8,5	41	46,3	64,6	51,6
9	46,8	51,2	68,3	67,2
9,5	50,1	58,7	69,1	72,3
10	54,8	69,9	72,4	78,4
10,5	64,2	74,5	72,7	81
11	65,1	76,1	73,1	81,1
11,5	66,7	76,8	73,3	80
12	68,0	77,1	74	79,7

Сульфат железа является отходом производства некоторых предприятий Вологодской области (побочный продукт, образующийся при травлении разбавленной H_2SO_4 железных листов, проволоки и др.), что позволяет значительно снизить его себестоимость и транспортные расходы. Сульфат железа образуется из отработанных сернокислотных растворов после травления железа, а также растворением колчеданных огарков в H_2SO_4 в присутствии восстановителя. Уравнения гидролиза сульфата железа и последующего перехода иона железа из Fe^{2+} в Fe^{3+} имеют вид:



В таблицах 1 и 2 представлены результаты экспериментов по удалению фосфора из хозяйственно-бытовых сточных вод при введении реагентов в разные точки технологической схемы (традиционная технологическая схема канализационных очистных сооружений приведена на рисунке 1).

На основе проведенных опытов и представленных в таблице 1 результатов экспериментов можно сделать следующие выводы об использовании фосфогипса в качестве реагента:

- 1) преимуществом фосфогипса, как минерального реагента, является то, что он улучшает удобрительные свойства осадка и имеет невысокую стоимость;
- 2) при использовании в качестве реагента фосфогипса максимальный эффект дефосфо-

тации составляет 56%, что, как правило, не позволяет снизить содержание фосфора до требуемого нормативно допустимого сброса;

3) в ходе проведения опытов на модельных водных растворах, содержащих фосфор заданной концентрации эффективность удаления фосфатов фосфогипсом очень высока, а при проведении экспериментов на хозяйственно-бытовой сточной воде она значительно ниже вследствие того, что фосфогипс реагирует с другими примесями сточной воды.

Таблица 2 – Эффективность удаления фосфора сульфатом железа при введении реагента в разные точки технологической схемы

Отношение $C_{Fe}:C_p$	Эффективность удаления фосфора, %			
	Точка перед песколовкой Сисх. P=3,323 мг/л	Точка перед первичными отстойниками Сисх. P=2,95 мг/л	Точка перед аэротенками, Сисх. P=2,72 мг/л	Точка перед вторичными отстойниками, Сисх. P=2,45 мг/л
0,5	52,59	21,5	45,9	56,8
1	56	41,9	49,6	57,1
1,5	64	45,1	54,72	58,4
2	72	47,2	62,8	61,5
2,5	76	52,3	72,1	68,3
3	82	57,3	73,8	72,1
3,5	88	58,9	74,1	76,8
4	92	60,4	78,2	79,2
4,5	90	63,26	80,9	80,1
5	88	63,4	81,6	81,6
5,5	83	61,2	81,97	82,3
6	78,43	55,6	75,3	83,4
6,5	69,51	49,6	77,3	81,3
7	70,12	41,6	78	79,3
7,5	52,59	21,5	45,9	56,8
8	56	41,9	49,6	57,1
8,5	64	45,1	54,72	58,4
9	72	47,2	62,8	61,5
9,5	76	52,3	72,1	68,3
10	82	57,3	73,8	72,1
10,5	88	58,9	74,1	76,8
11	92	60,4	78,2	79,2
11,5	90	63,26	80,9	80,1
12	88	63,4	81,6	81,6

Таким образом, вследствие низкого эффекта дефосфотации применение фосфогипса, как реагента, рекомендуется ограниченно.

На основе проведенных опытов и представленных в таблице 2 результатов экспериментов можно сделать следующие выводы об использовании сульфата железа в качестве реагента:

1) при использовании сульфата железа (II) наиболее эффективным является введение реагента в виде раствора в канал перед песколовками (при введении реагента в песколовку снижение концентрации фосфора до ПДК обеспечивается при дозе реагента 19,24 г Fe^{2+}/m^3 (отношение $Fe^{2+}:P=3,6:1$, исходное содержание фосфора 3,323 мг/л));

2) так как песколовки аэрируемые, обеспечивается переход иона железа из Fe^{2+} в Fe^{3+} , а за счет турбулентного режима движения сточной воды, поступающей на песколовки, происходит хорошее перемешивание с раствором коагулянта, то есть не требуется строительство дополнительных сооружений. Согласно проведенным расчетам [14] количество кислорода, необходимое для перевода Fe^{2+} в Fe^{3+} в аэрируемой песколовке, составляет 4,37% от общего объема кислорода, подаваемого аэраторами, что удовлетворяет требованиям протекания технологического процесса;

3) высокий эффект удаления из сточных вод всех форм фосфора и общего азота объясняется особенностями формирования коллоидной мицеллы при коагуляции. В то же время коагулянт реагирует со щелочами, содержащимися в воде, образуя осадок из крупных хлопьев. Этот осадок адсорбирует некоторую часть органических соединений, содержащих фосфор [15].

При внедрении технологии удаления биогенных веществ сульфатом железа на ОСК г. Вологды балансировый расчет по движению вод и осадка будет иметь следующий вид (табл. 3).

Таблица 3 – Балансовый расчет по движению сточных вод и осадка на ОСК г. Вологды (по среднестатистическим характеристикам исходной воды)

№ п/п	Наименование сооружений и показателей	Концентрация загрязнений, мг/л		Объем осадка, м ³ /сут	Влажность осадка, %	Масса сухого вещества, т/сут.
		вход	выход			
1	Приемная камера					
	Расход, тыс. м ³ /сут.	110,588	110,588			
	ВВ	195,25	195,25			
	БПК ₅	193,25	193,25			
	[PO ₄ ³⁻]	11,89	11,89			
	[NH ₄ ⁺]	38,79	38,79			
2	Решетки			7,279	80	1,092
	Расход, тыс. м ³ /сут.	110,588	110,580			
	ВВ	195,25	189,25			
	БПК ₅	193,25	193,25			
	[PO ₄ ³⁻]	11,89	11,89			
	[NH ₄ ⁺]	38,79	38,79			
3	Песколовки			6,642	60	3,985
	Расход, тыс. м ³ /сут.	110,588	110,580			
	ВВ	189,16	151,33			
	БПК ₅	193,25	181,66			
	[PO ₄ ³⁻]	11,89	7,36			
	[NH ₄ ⁺]	38,79	30,81			
4	Первичные отстойники			275,859	95,8	12,049
	Расход, тыс. м ³ /сут.	110,587	110,311			
	ВВ	151,33	80,2			
	БПК ₅	181,66	128,31			
	[PO ₄ ³⁻]	7,36	2,783			
	[NH ₄ ⁺]	30,81	13,09			
5	Аэротенки					
	Расход, тыс. м ³ /сут.	110,311	150,54			
	ВВ	80,2	3080,2			
	БПК ₅	128,31	12,98			
	[PO ₄ ³⁻]	2,783	2,783			
	[NH ₄ ⁺]	13,09	6,325			
6	Вторичный отстойник			84769,8	99,6	342,47
	Возвратный активный ил			81914	99,6	330,933
	Расход, тыс. м ³ /сут.	150,54	109,888			
	ВВ	195,555	10,78			
	БПК ₅	12,98	12,98			
	[PO ₄ ³⁻]	2,783	2,783			
7	Илоуплотнитель			2855,53	99,6	11,536
	Уплотненный активный ил			423,041	96	11,536
	Иловая вода			2644,06		
8	Метантенки			698,90	97,3	23,585
9	ЦМО			680,31	97,1	23,585
	Фильтрат			584,1		
10	Иловые площадки			96,2	81	23,585
	Дренажная вода			876,15		
11	Площадки депонирования ила			96,2	81	23,585

Таким образом, в качестве реагента для удаления соединений фосфора из сточных вод предпочтительнее использовать сульфат железа. При этом лучший эффект дефосфотации обеспечивается при введении реагента в точку перед песколовками. Использование отходов

производства позволяет одновременно решить экологическую проблему с утилизацией отходов и проблему очистки сточных вод от биогенных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Cvetkova and M. Alekseev, Petersburg Influence the Environment Condition of the Baltik Sea or Not. World Applied Journal 23, 2013, (Problems of Architecture and Construction), pp: 41-44.
2. Barth E.F. Process design manual for phosphorus removal / E.F. Barth, J.M. Smith, C.A. Brunner. – U.S.: EPA, 1976. – 275 p.
3. Bever J. Elimination durch Simultanfällung mit Kalkhydrat erste Bemessungshinweise / J. Bever, N.P. Peschen // Korrespond. Abwasser. – 1991. – №2.
4. Bonzongo J.C. Kinetic model of the fixation of phosphates on particles of sediments/ J.C. Bonzongo, G. Martin, G. Bertru // Water S. Afr – 1992. – №18.
5. Brattebo H. Phosphorus removal by granular activated alumina / H. Brattebo // Water Res. – 1986. – №8.
6. Donker H.G.V., Opic P., De Vries H.P. P-Removal in completely mixed systems/ H.G.V. Donker, P. Opic, H.P. De Vries // Water Sci and Technol. – 1985. – №17.
7. Janssen P.D. Particles found in clogging layers of wastewater infiltration systems may cause reduction in infiltration rate enhance phosphorus adsorption / P.D. Janssen, T. Krogstad // Water Sci and Technol. – 1998. – №3.
8. Kayser R. Control of precipitant feed for simultaneous phosphate precipitation / R. Kayser, B. Teichgraber // 7 Eur. Abwasser und Abfallsymp. EWPCA. – 1987. – №1.
9. Halovani A.E. Elimination de l'azote et du phosphore dans un lagunage a haut rendement / A.E. Halovani, B. Picot, C. Casellas // Rev. Sci. Eau. – 1993. – №6.
10. Jedele K. Auslegung von Anlagen zur weitergehenden Phosphorelimination / K. Jedele, A. Bunkofer // Korrespond. Abwasser. – 1991. – №38.
11. Kruit I.J. Biologische P-eliminatie versus chemische P-eliminatie in een gemiddelde watersysteem / I.J. Kruit // Tijdschr. waterloopz en afvalwaterbehandel. – 1993. – №26 (12).
12. Loosdrecht M.C.M. Biologische defosfatering onder denitrificerende condities / M.C.M. Loosdrecht, T. Kuba // Tijdschr. waterloopz en afvalwaterbehandel. – 1992. – №19.
13. Алексеев, М.И. Удаление биогенных элементов из сточных вод животноводческих комплексов в целях предотвращения эвтрофирования водных объектов [Текст] / М.И. Алексеев, Е.А. Фокичева // Вестник гражданских инженеров – 2013. – №1(36). – С. 117-123.
14. Фокичева, Е.А. Дефосфотация высококонцентрированных сточных вод [Текст] / Е.А. Фокичева // Водоснабжение и санитарная техника – 2009. – №11. – С. 56-61.
15. Фокичева, Е.А. Обоснование места ввода реагента при очистке сточных вод от соединений фосфора с использованием сульфата железа [Текст] / Е.А. Фокичева // Вестник гражданских инженеров – 2008. – №4(17). – С. 92-97.

М.И. Алексеев

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург
Доктор технических наук, профессор кафедры «Водоотведение и экология»
E-mail: m.i.alekseev@mail.ru

Е.А. Фокичева

Вологодский государственный университет
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия»
E-mail: Eafokicheva2007@yandex.ru

M. ALEKSEEV, E. FOKICHEVA

THE USE OF WASTE WHEN WASTEWATER TREATMENT

The article discusses the environmental aspects of water pollution nutrient elements. Examines the processes of purification of domestic wastewater from compounds of phosphorus using as reagents waste. The graphs of the dependence of the efficiency of removal of phosphorus from wastewater from a dose of ferric sulfate and phosphogypsum and place of entry of the chemical into various points of the technological scheme.

Keywords: *sewage, eutrophication, reagent, ferric sulfate, phosphogypsum, technological scheme.*

BIBLIOGRAPHY

1. L. Cvetkova and M. Alekseev, Petersburg Influence the Environment Condition of the Baltik Sea or Not. World Applied Journal 23, 2013, (Problems of Architecture and Construction), pp: 41-44.
2. Barth E.F. Process design manual for phosphorus removal / E.F. Barth, J.M. Smith, C.A. Brunner. – U.S.: EPA, 1976. – 275 r.
3. Bever J. Elimination durch Simultanfallung mit Kalkhydrati erste Bemessungshiniece / J. Bever, N.P. Peschen // Korrespond. Abwasser. – 1991. – №2.
4. Bonzongo J.C. Kinetic model of the fixation of phosphates on particles of sediments/ J.C. Bonzongo, G. Martin, G. Bertru // Water S. Afr – 1992. – №18.
5. Brattebo H. Phosphorus removal by granular activated alumina / H. Brattebo // Water Res. – 1986. – №8.
6. Donker H.G.V., Opic P., De Vries H.P. P-Removal in completely mixed systems/ H.G.V. Donker, P. Opic, H.P. De Vries // Water Sci and Technol. – 1985. – №17.
7. Jenssen P.D. Particles found in clogging layers of wasterwater infiltration systems may cause reduction in infiltration rate enhance phosphorus adsorption / P.D. Jenssen, T. Krogstad // Water Sci and Tehnol. – 1998. – №3.
8. Kayser R. Control of precipitant feed for simultaneous phosphate precipitation / R. Kayser, B. Teichgraeber // 7 Eur. Abwasser und Abfallsymp. EWPCA. – 1987. – №1.
9. Halovani A.E. Elimination de l'azote et du phosphore dans un lagunage a haut rendement / A.E. Halovani, B. Picot, C. Casellas // Rev. Sci. Eau. – 1993. – №6.
10. Jedele K. Auslegung von Anlagen zur wietergehenden Phosphore-limination / K. Jedele, A. Bunkofer // Korrespond. Abwasser. – 1991. – №38.
11. Kruit I.J. Biologische P-eliminatie versus chemische P-eliminatie in een gemodificeers / I.J. Kruit // Tijdschr. watervoopz en afvalwaterbehandel. – 1993. – №26 (12).
12. Loosdrecht M.C.M. Biologische defosfaterling onder denitrificerende condities / M.C.M. Loosdrecht, T. Kuuba // Tijdschr. watervoopz en afvalwaterbehandel. – 1992. – №19.
13. Alekseev, M.I. Udalenie biogennyh jelementov iz stochnyh vod zhivotnovodcheskih kompleksov v celjah predotvrashhenija jevtrofirovaniya vodnyh ob#ektov [Tekst] / M.I. Alekseev, E.A. Fokicheva // Vestnik grazhdanskih inzhenerov – 2013. – №1(36). – S. 117-123.
14. Fokicheva, E.A. Defosfotacija vysokokoncentrirovannyh stochnyh vod [Tekst] / E.A. Fokicheva // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika – 2009. – №11. – S. 56-61.
15. Fokicheva, E.A. Obosnovanie mesta vvoda reagenta pri ochistke stochnyh vod ot soedinenij fosfora s ispol'zovaniem sul'fata zheleza [Tekst] / E.A. Fokicheva // Vestnik grazhdanskih inzhenerov – 2008. – №4(17). – S. 92-97.

M. Alekseev

Saint-Petersburg state architecture and construction university, Saint-Petersburg
Doctor of technical sciences, professor of the department «Sanitation and ecology»
E-mail: m.i.alexeev@mail.ru

E. Fokicheva

Vologda state university
Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Chemistry»
E-mail: Eafokicheva2007@yandex.ru

БЕЛОВ В.В., ОБРАЗЦОВ И.В.

КОМПЬЮТЕРНОЕ ОПТИМИЗИРОВАНИЕ ЗЕРНОВЫХ СОСТАВОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНО-МИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Изложены предпосылки проектирования оптимальных составов строительных смесей для получения бетонов на цементной связке, базирующиеся на закономерностях формирования полидисперсных структур, включая микро- и нануровень. Приведен выбор методов моделирования упаковок зернистых сыпучих систем и расчета оптимальной гранулометрии сырьевых смесей с наиболее плотной упаковкой зерен, обеспечивающих оптимальные параметры уплотнения смесей.

Ключевые слова: дисперсные минеральные вяжущие системы, компьютерное моделирование упаковок, методы расчета.

Проблема оптимизации структуры и свойств строительных композиционных материалов является первоочередной задачей технологов-проектировщиков, решение которой позволяет одновременно повысить экономичность, надежность и долговечность строительных композиционных материалов. С момента начала широкого использования строительных композитов делаются попытки получения аналитических зависимостей, связывающих свойства компонентов композиционных материалов и их концентрацию в смеси со свойствами готового композита. Получение таких зависимостей позволило бы рассчитывать концентрационно-гранулометрические характеристики смесей для изготовления материалов в зависимости от требований, которым должен соответствовать готовый материал. Решение первоочередной задачи оптимизации возможно за счет синергизма многих областей научного знания, в том числе технологии строительных материалов, физики, химии, математики, программирования и др. Применение средств вычислительной техники позволяет решать многие задачи современного строительного материаловедения в области математического моделирования, прогнозирования свойств, автоматизированных расчетов и др. Появление универсальных оболочек и всё более мощных алгоритмических языков программирования дает возможность использовать компьютер как средство, позволяющее автоматизировать процесс поиска оптимальных составов композитных материалов, построить модели структуры материала в объеме, применить физические законы и спрогнозировать изменение свойств материала в зависимости от внешних условий. Компьютерные модели, построенные на основании фактора случайности, позволяют достаточно полно описать структуру композитного материала, учитывая хаотичный характер распределения структурных элементов в объёме материала, что обосновывает подход к их изучению с позиций теории вероятностей и математической статистики.

Макроструктура бетона представляет собой плотно упакованные зерна заполнителя, раздвинутые и склеенные цементным тестом. В процессе формирования макроструктуры цементное тесто первоначально обмазывает зерна заполнителя, а затем заполняет его межзерновые пустоты с равномерной раздвижкой зерен. При увеличении объема клеящего вещества каркас заполнителя становится более решетчатым – упаковка зерен становится менее плотной [1].

Если рассматривать сырьевую смесь на макроуровне, то ее можно представить, как полидисперсную систему «заполнитель – вяжущая часть», в которой пространственный скелет образуют крупные зерна заполнителя, промежутки между которыми заполнены дисперсными частицами вяжущей части (рис. 1).

Упаковка крупных зерен формирует определенное поровое пространство, которое в свою очередь, определяет фактическое количество частиц вяжущей части, образующей в процессе твердения контактную зону или связующую матрицу, являющуюся с позиции механической прочности слабым структурным элементом [2]. Следовательно, для достижения плотной и прочной структуры необходимо выполнение двух условий: плотная упаковка зернового ске-

лета заполнителя и равномерное распределение связующего вещества в структуре материала, образующего прочные контакты между частицами заполнителя [3].

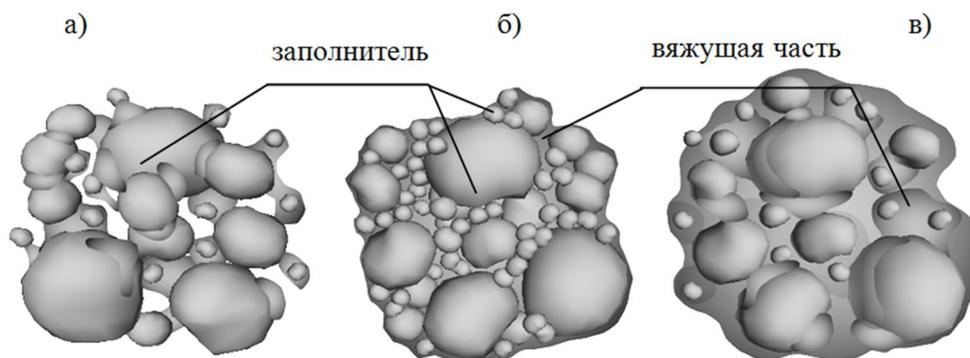


Рисунок 1 – Модель элементарной ячейки системы «заполнитель – вяжущая часть»: недостаток вяжущей части (а); плотная упаковка заполнителя (б); избыток вяжущей части (в)

Принцип формирования первоначальной структуры композитов на микроуровне отличается тем, что упаковка частиц определяется не только, и не столько действием сил гравитации, а в первую очередь действием поверхностных сил между частицами. С уменьшением масштабного уровня и по мере твердения бетона процессы структурообразования приобретают химико-физический характер, что выражается в образовании новых структурных элементов и их физическом взаимодействии, например, возникновении гидроминералов и их сближении друг с другом на расстояние атомарного взаимодействия [4, 5]. В результате физико-химических процессов объем матричного материала уменьшается, что приводит к возникновению усадочных деформаций и формоизменению границ раздела системы [6].

Разработка специальных экспериментальных и расчетных методик проектирования зерновых составов полидисперсных систем с плотной упаковкой частиц чрезвычайно актуальна как с практической, так и с научной точек зрения, так как позволяет определять и обосновывать оптимальные составы цементно-минеральных смесей из условия их минимальной пустотности, как из набора реальных компонентов известной гранулометрии, так и из набора определенных фракций. Распространенным подходом к исследованию полидисперсных систем является моделирование их структуры с помощью системы твердых сфер [7]. В рамках такой модели задача нахождения состава заполнителя композиционного материала, обладающего наибольшей плотностью, сводится к задаче о плотной пространственной упаковке сферических частиц [8]. Для описания наиплотнейших полидисперсных упаковок частиц в ограниченном объеме применяются известные эталонные гранулометрические кривые – Фуллера, Болоея, Гуммеля, Функа-Дингера и др.

Авторами данной работы проведено сравнительное исследование плотнейших полидисперсных упаковок, рассчитанных по эталонным гранулометрическим кривым. Построены компьютерные модели шаровых упаковок в ограниченном элементарном объеме (рис. 2).

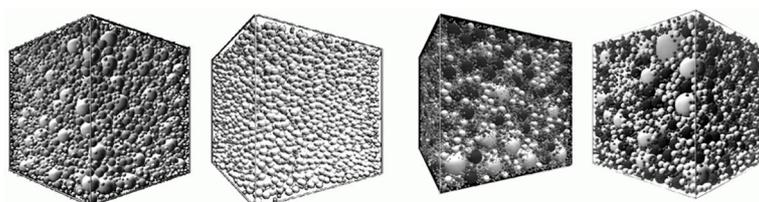


Рисунок 2 – Компьютерные модели плотных упаковок шаров с распределением размеров по формулам «идеальных» гранулометрических кривых

С помощью компьютерного моделирования и экспериментальной проверки модельных минеральных смесей установлено, что наибольшей плотностью упаковки отличаются поли-

дисперсные составы, рассчитанные по формулам «идеальных» гранулометрических кривых Функа-Дингера и Боломея. В уравнении Функа-Дингера (1) необходимо учитывать коэффициент формы зерен α .

$$\frac{G_{np}}{100} = \alpha + (1 - \alpha) \frac{X^n - D_{min}^n}{D_{max}^n - D_{min}^n}, \quad (1)$$

где G_{np} – проход частиц, %, через сито размером X , мм; D_{max} – наибольшая крупность зерна в смеси, мм; D_{min} – наименьшая крупность зерна в смеси, мм; n – коэффициент распределения.

Коэффициент α в уравнении (1) оказывает особое влияние на системы с прерывистой гранулометрией. К примеру, для двухфракционных систем значение коэффициента α составляет 0,1. Расчет зернового состава двухфракционной песчаной смеси по уравнению Функа-Дингера с соблюдением данного условия соответствует экспериментально найденным соотношениям фракционного состава модельной двухфракционной песчаной смеси. Коэффициент n оказывает влияние в основном на содержание средних фракций, и на основании экспериментов можно утверждать, что более точные результаты получаются при использовании этого коэффициента, равного 0,5.

Разработана методика расчета оптимального гранулометрического состава зерновой структуры строительного композита и компьютерная программа (рис. 3), позволяющая производить расчет оптимального гранулометрического состава цементно-минеральной смеси, включающей несколько исходных компонентов.

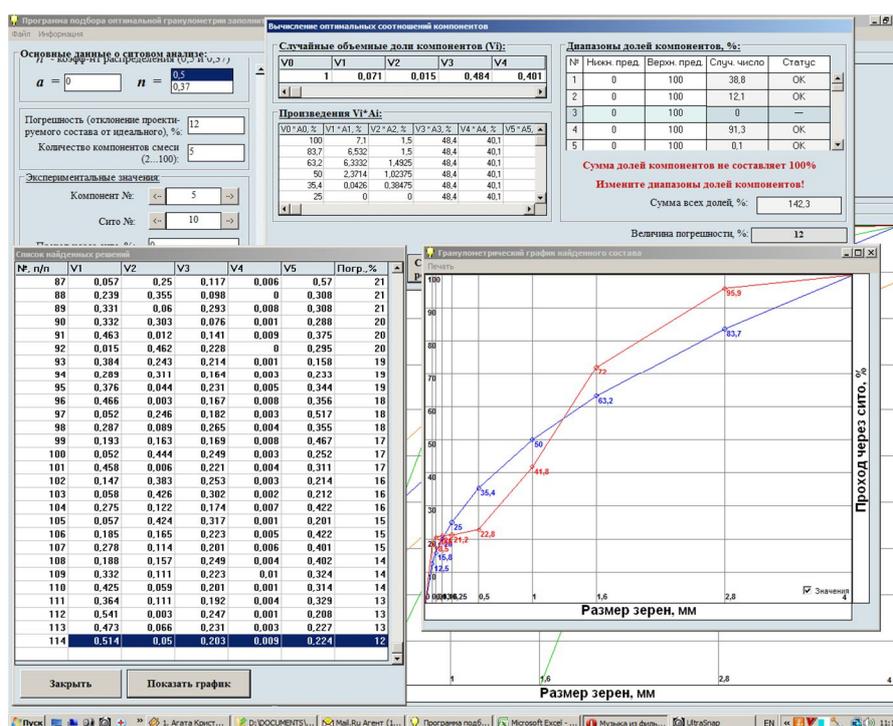


Рисунок 3 – Окно программы оптимизации зернового состава

В программе предусмотрена возможность автоматического поиска оптимального решения. В процессе расчета программа перебирает все возможные соотношения компонентов, последовательно уменьшая область расхождения расчетного состава с эталонным, заданным «идеальной» гранулометрической кривой. Результатом работы программы является список рассчитанных составов и величина расхождения расчетного состава с эталонным, на основании которого можно выбрать оптимальный состав, наиболее приближенный к эталону.

Вспомогательной функцией программы является возможность корректировки рассчитанного зернового состава смеси путем учета дополнительных корректирующих компонентов – «узких» фракций материала (рис. 4).

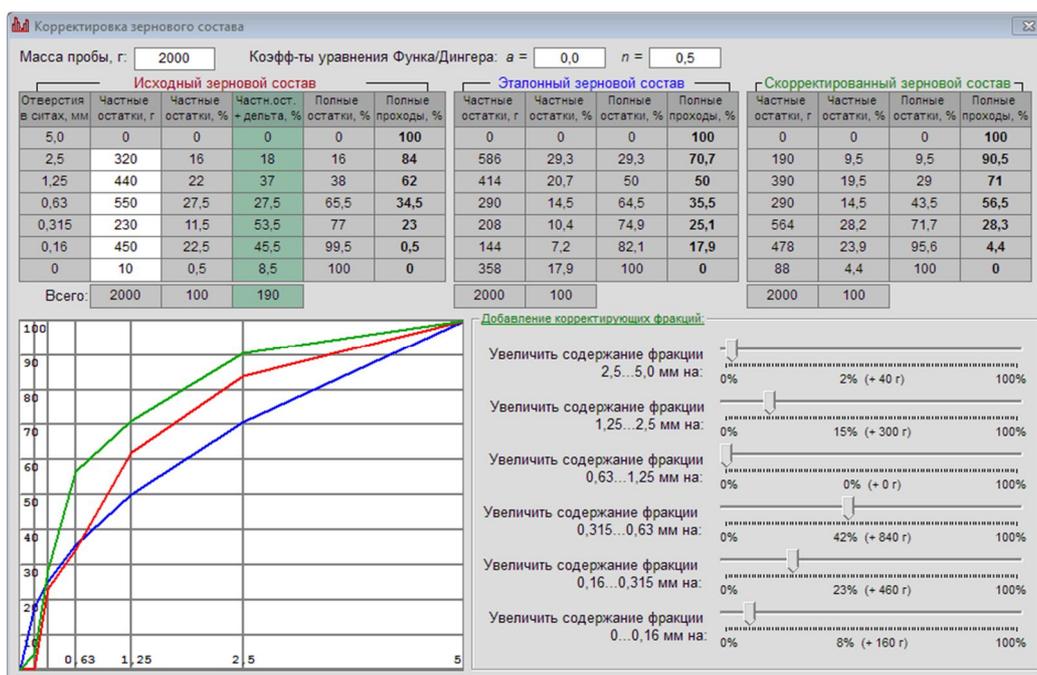


Рисунок 4 – Окно расчетной корректировки зернового состава

На программный продукт получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617267 «Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя строительного композита» от 29.10.2010 г.

На основе цементно-минеральных смесей оптимального зернового состава (рис. 5), рассчитанного с помощью разработанной программно-расчетной методики, получены составы тяжелого бетона с улучшенными технико-эксплуатационными характеристиками и пониженным расходом цемента.

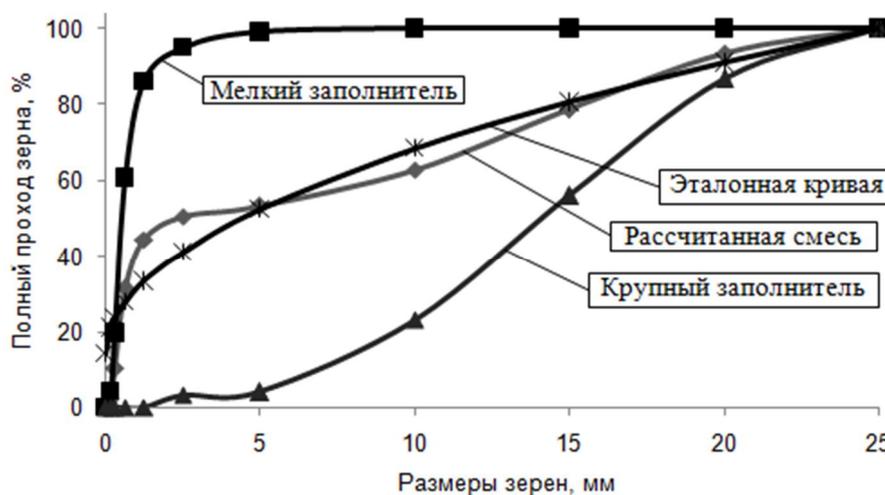


Рисунок 5 – Зерновые составы исходных компонентов и рассчитанной минеральной смеси

Производился подбор оптимального зернового состава заполнителей и вводился минеральный тонкомолотый компонент в вяжущую часть с целью снижения расхода вяжущего при достижении требуемых показателей контрольного состава бетона. Введение тонкомолотого известняка с удельной поверхностью 500 м²/кг в вяжущую часть сырьевой смеси позволило создать дополнительную возможность экономии цемента за счет оптимального сочетания гранулометрических характеристик минеральной добавки с гранулометрическими характеристиками цемента и достижения более плотной упаковки частиц на тонкодисперсном уровне. Были запроектированы два состава бетона заданного класса. Расчет оптимального соотношения

крупного и мелкого заполнителей производился с помощью описанной выше компьютерной программы подбора оптимальной гранулометрии. Опытный состав №1 характеризовался 10-процентным снижением расхода цемента при соответствующем увеличении расхода заполнителей с подобранным оптимальным гранулометрическим составом. Опытный состав №2 отличался от состава №1 тем, что в него с целью оптимизации гранулометрического состава вяжущей части на микроуровне вводилась тонкомолотая минеральная добавка известняка в количестве 14,9%. При этом появилась возможность дополнительного снижения расхода цемента примерно на 5% за счет замены этого количества цемента соответствующим количеством тонкомолотой минеральной добавкой. Таким образом, общее снижение расхода цемента в составе №2 по сравнению с заводским составом составило 15%.

В таблице 1 приведены основные технико-эксплуатационные характеристики полученных составов бетона.

Таблица 1 – Технико-эксплуатационные характеристики контрольного и экспериментальных составов бетона

№ п/п	Класс бетона по прочности	Марка бетона по водонепроницаемости	Марка бетона по морозостойкости	ОК, см	Плотность бетонной смеси, кг/м ³	Расход цемента, кг/м ³	Возраст образцов, сут.	Плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа
Контрольный состав	В20	W2	F75	14	2 431	340	7	2 307	19,5
							28	2 313	24,3
Опытный состав №1	В20	W2	F150	14	2 446	305	7	2 280	19,3
							28	2 289	24,6
Опытный состав №2	В20	W2	F300	14	2 400	289	7	2 268	18,4
							28	2 283	24,3

Оптимизация гранулометрии заполнителя бетонной смеси позволила получить более экономичный по сравнению с производственным состав бетона класса В20 (с 10-процентным снижением расхода цемента), обладающий при этом повышенной маркой по морозостойкости F150 и заданной маркой по водонепроницаемости W2. Оптимизация одновременно зерновой структуры заполнителя и вяжущей части сырьевой смеси за счет оптимальной добавки тонкомолотого известняка позволила получить еще более экономичный состав бетона класса В20 с 15-процентным снижением расхода цемента, обладающий наибольшей маркой по морозостойкости F300 и заданной маркой по водонепроницаемости W2, что значительно улучшает параметры долговечности и эксплуатационной надежности бетона, изготовленного по предлагаемым технологии и рецептуре, и при этом позволяет существенно снизить расход наиболее дефицитного и дорогостоящего компонента бетона.

Ожидаемый экономический эффект от применения составов тяжелого бетона на основе смеси заполнителей оптимального гранулометрического состава и минеральной карбонатной добавки в среднем составил 12% в стоимостном выражении из расчета сырьевых материалов на 1 м³ бетонной смеси. На основании результатов испытаний можно утверждать, что предлагаемые составы и программно-расчетную методику подбора зернового состава заполнителя можно рекомендовать для широкого внедрения в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумков, А.И. Формирование и оптимизация макроструктуры тяжелого бетона [Текст] / А.И. Шумков // Технологии бетонов. – 2008. – №7. – С. 52-53.
2. Бердов, Г.И. Пути совершенствования технологии и свойств строительных материалов [Текст] / Г.И. Бердов, В.Н. Зырянова // Известия вузов. Строительство. – №4. – 2010. – С. 51-61.
3. Белов, В.В. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси [Текст] / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Строительные материалы. – 2009. – №9. – С. 88-90.
4. Кучеренко, А.А. Порошковая технология бетона [Текст], часть 2 / А.А. Кучеренко // Технологии бетонов. – 2009. – №1. – С. 58-60.

5. Рамачадран, В. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение [Текст] / В. Рамачадран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн // Пер. с англ. Т.М. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой: под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с. – Перевод изд.: Concrete science: Treatise on Current Research / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, Y.Y. Beaudoin / Nevden.

6. Выровой, В.Н. О некоторых особенностях описания структуры бетона как сложноорганизованного материала [Текст] / В.Н. Выровой, А.Н. Гергега, Т.В. Острая, В.Г. Суханов // Мат-лы международного конгресса Наука и инновации в строительстве SIB-2008. Том 1. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Книга 1 (А-Н). – ВоронежЮ, 2008. – С. 82-86.

7. Аникеенко, А.В. Структурные особенности плотных упаковок твердых сфер. Критические плотности [Текст] / А.В. Аникеенко, Н.Н. Медведев // Журнал структурной химии. – 2007. – Том 48. – №4. – С. 798-805.

8. Белов, В.В. Компьютерная трехмерная модель хаотичной упаковки частиц композиционного материала [Текст] / В.В. Белов, И.В. Образцов, А.Г. Реунов // Мат-лы IV Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общ. ред. Королева Е.В. – Пенза: ПГУАС, 2009. – С. 4.

В.В. Белов

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

Доктор технических наук, проректор по инновационному развитию, заведующий кафедрой «Производство строительных изделий и конструкций»

Тел.: +7 (4822) 52-62-29

E-mail: vladim-bel@yandex.ru

И.В. Образцов

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

Инженер Центра научно-образовательных электронных ресурсов

E-mail: sunspire@list.ru

V. BELOV, I. OBRAZCOV

COMPUTER OPTIMIZATION OF GRAIN COMPOSITIONS BUILDING COMPOSITES BASED ON CEMENT-MINERAL MIXTURES

The article deals with preconditions of designing of optimal building blends compositions in order to obtain concrete on the cement binding, based on polydisperse structures formation regularity including micro- and nanolevel. The choice of methods of modeling of granular loose systems packing and calculation of optimal grading of raw blends with the densest grains packing, providing optimal parameters for blends compaction is given.

Keywords: *disperse mineral binding systems, computer modelling of packings, calculation methods.*

BIBLIOGRAPHY

1. Shumkov, A.I. Formirovanie i optimizacija makrostruktury tjazhelogo betona [Текст] / A.I. Shumkov // Tehnologii betonov. – 2008. – №7. – С. 52-53.
2. Berdov, G.I. Puti sovershenstvovanija tehnologii i svojstv stroitel'nyh materialov [Текст] / G.I. Berdov, V.N. Zyrjanova // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – №4. – 2010. – С. 51-61.
3. Belov, V.V. Formirovanie optimal'noj makrostruktury stroitel'noj smesi [Текст] / V.V. Belov, M.A. Smirnov // Stroitel'nye materialy. – 2009. – №9. – С. 88-90.
4. Kucherenko, A.A. Poroshkovaja tehnologija betona [Текст], chast' 2 / A.A. Kucherenko // Tehnologii betonov. – 2009. – №1. – С. 58-60.
5. Ramachadran, V. Nauka o betone: Fiziko-himicheskoe betonovedenie [Текст] / V. Ramachadran, R. Fel'dman, Dzh. Bodujen // Per. s angl. T.M. Rozenberg, Ju.B. Ratinovoj: pod red. V.B. Ratinova. – М.: Стройиздат, 1986. –

278 s. – Perevod izd.: Concrete science: Treatise on Current Research / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, Y.Y. Beaudoin / Hevden.

6. Vyrovoy, V.N. O nekotoryh osobennostyah opisaniya struktury betona kak slozhnoorganizovannogo materiala [Tekst] / V.N. Vyrovoy, A.N. Gerega, T.V. Ostraja, V.G. Suhanov // Mat-ly mezhdunarodnogo kongressa Nauka i innovacii v stroitel'stve SIB-2008. Tom 1. Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya i tehnologii. Kniga 1 (A-N). – VoronezhJu, 2008. – S. 82-86.

7. Anikeenko, A.V. Strukturnye osobennosti plotnyh upakovok tverdyh sfer. Kriticheskie plotnosti [Tekst] / A.V. Anikeenko, N.N. Medvedev // Zhurnal strukturnoj himii. – 2007. – Tom 48. – №4. – S. 798-805.

8. Belov, V.V. Komp'yuternaja trehmernaja model' haotichnoj upakovki chastic kompozicionnogo materiala [Tekst] / V.V. Belov, I.V. Obrazcov, A.G. Reunov // Mat-ly IV Vserossijskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Pod obshh. red. Koroleva E.V. – Penza: PGUAS, 2009. – S.4.

V. Belov

Tver state technical university, Tver

Doctor of technical sciences, vice-rector for innovative development, head of the department «Production of building products and structures»

Ph.: +7 (4822) 52-62-29

E-mail: vladim-bel@yandex.ru

I. Obrazcov

Tver state technical university, Tver

Engineer of the center of research and educational electronic resources

E-mail: sunspire@list.ru

ГАГАРИН В.Г., КОРКИНА Е.В.,
ШМАРОВ И.А., ПАСТУШКОВ П.П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ СТЕКЛА НА СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРОПУСКАНИЕ СВЕТА

Проведено определение спектральных коэффициентов светопропускания стекол производства ООО «Пилкингтон Гласс» с мультифункциональным покрытием, без покрытия и стеклопакета со стеклом с мультифункциональным покрытием. На основании этого определения предложена методика расчета условного спектрального коэффициента светопропускания стеклопакета со стеклом с мультифункциональным покрытием.

Ключевые слова: низкоэмиссионное покрытие, мультифункциональное покрытие, спектральный коэффициент светопропускания, спектрофотометр.

Введение.

В современных окнах используются стеклопакеты со стеклами с низкоэмиссионными свойствами покрытий. Многофункциональным покрытием называется покрытие стекла с солнцезащитными и низкоэмиссионными свойствами. В стеклопакете оно применяется в качестве наружного стекла с покрытием, обращенным внутрь стеклопакета. В современных нормативных документах по расчету естественной освещенности помещения (СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*; СП 23-102-2003. Естественное освещение жилых и общественных зданий) отсутствуют данные по влиянию такого остекления на светопропускание.

Исследованию светопропускания стекол с низкоэмиссионными покрытиями посвящены работы [1-4]. Однако результаты этих исследований не учитываются при расчетах коэффициента естественной освещенности (КЕО). Определению спектрального коэффициента пропускания стекла с мультифункциональным покрытием SunCool 70/40 производства ООО «Пилкингтон Гласс» посвящена данная статья.

Экспериментальные исследования.

Для исследования были использованы образцы стекол производства ООО «Пилкингтон Гласс» без покрытия и с мультифункциональным покрытием. Образцы стекол без покрытия имели толщину 6 мм, размером 80×80 мм. Образцы стекол с мультифункциональным покрытием SunCool 70/40 толщиной 4 мм, размером 50×50 мм. Образец однокамерного стеклопакета со стеклом с мультифункциональным покрытием SunCool 70/40 и вторым стеклом без покрытия, расстояние между стеклами 16 мм.

Экспериментальное определение светопропускания стекол и образца стеклопакета определялось в НИИСФ РААСН на спектрофотометре СФ-256 УВИ. Испытуемые образцы стекол помещались в камеру спектрофотометра, после чего проводилось измерение спектрального коэффициента светопропускания в диапазоне длин волн от 380 нм до 1100 нм с шагом 10 нм. Результаты измерений представлялись в виде графика (рис. 1, рис. 2) и таблицы со значениями спектрального коэффициента светопропускания при соответствующих значениях длин волн. Вывод результатов измерений проводился в специализированном программном обеспечении.

Результаты исследований.

1. Исследование спектральных характеристик стекол без покрытия и с мультифункциональным покрытием.

Значения спектрального коэффициента светопропускания безцветного прозрачного стекла без покрытия $\tau_{БП}(\lambda)$ незначительно изменяются в видимой части спектра и составляют от 0,77 до 0,9.

Значение спектрального коэффициента светопропускания стекла с покрытием $\tau_{СП}(\lambda)$ снижены при малых длинах волн видимого диапазона фиолетовой области и при больших длинах волн в красном диапазоне видимого спектра. В ИК области оно мало, что соответствует назначению стекла с низкоэмиссионными свойствами.

На основании полученных экспериментальных данных получен интегральный коэффициент светопропускания по формуле ГОСТ Р 54164-2010 «Стекло и изделия из него. Методы определения оптических характеристик. Определение световых и солнечных характеристик» (модифицированный аналог стандарта ISO 9050:2003):

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} \tau(\lambda) \cdot D_{\lambda} \cdot V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_{\lambda} \cdot V(\lambda) \Delta\lambda}, \quad (1)$$

где D_{λ} – относительное спектральное распределение мощности стандартного источника света D_{65} ; $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания остекления; $V(\lambda)$ – спектральная эффективность освещения для дневного зрения, характеризующая стандартного наблюдателя для фотометрии; величина $D_{\lambda} \cdot V(\lambda)$ принимается в соответствии с ГОСТ Р 54164-2010; $\Delta\lambda$ – интервал длин волн.

По результатам таких расчетов интегральный коэффициент светопропускания для стекол без покрытия составил $\tau_{БП}=0,886\pm 0,003$, а для стекол с покрытиями $\tau_{СП}=0,824\pm 0,002$.

Мультифункциональное покрытие представляет собой электропроводные слои, светопропускание которых описывается методами нелинейной оптики [5]. Соответственно, принцип суперпозиции коэффициентов светопропускания для стекол с такими покрытиями не действует. Тем не менее, для практических целей, можно ввести величину условного коэффициента светопропускания покрытия $\tau_{Усл}$. Данный коэффициент можно рассчитать:

- путем деления спектрального коэффициента светопропускания стекла с покрытием на соответствующий спектральный коэффициент стекла без покрытия $\tau'_{Усл}(\lambda) = \tau_{СП}(\lambda) / \tau_{БП}(\lambda)$, с последующей обработкой результата с целью получения условного интегрального коэффициента светопропускания покрытия по формуле 1. Полученный коэффициент $\tau'_{Усл} = 0,930$.

- путем деления интегрального коэффициента светопропускания стекла с покрытием на соответствующий интегральный коэффициент стекла без покрытия. Полученный коэффициент $\tau''_{Усл} = \tau_{БП} / \tau_{СП} = 0,930$;

Распределение по длинам волн условного спектрального коэффициента светопропускания покрытия $\tau'_{Усл}(\lambda)$ представлено на рисунке 1. Вид кривой $\tau'_{Усл}(\lambda)$ показывает, что покрытие особенно эффективно в ИК области, где оно снижает инфракрасное излучение в 1,5-7 раз.

При сравнении значений $\tau'_{Усл}$ и $\tau''_{Усл}$ видно, что их значения совпадают, поэтому можно принять условный интегральный коэффициент светопропускания мультифункционального покрытия равным $\tau_{Усл} = 0,93$.

На сайте фирмы-производителя исследованных образцов стекол ООО «Пилкингтон Гласс» отсутствуют данные по светопропусканию стекол с таким покрытием, поскольку такое покрытие считается мягким и стекла не могут использоваться без стеклопакета.

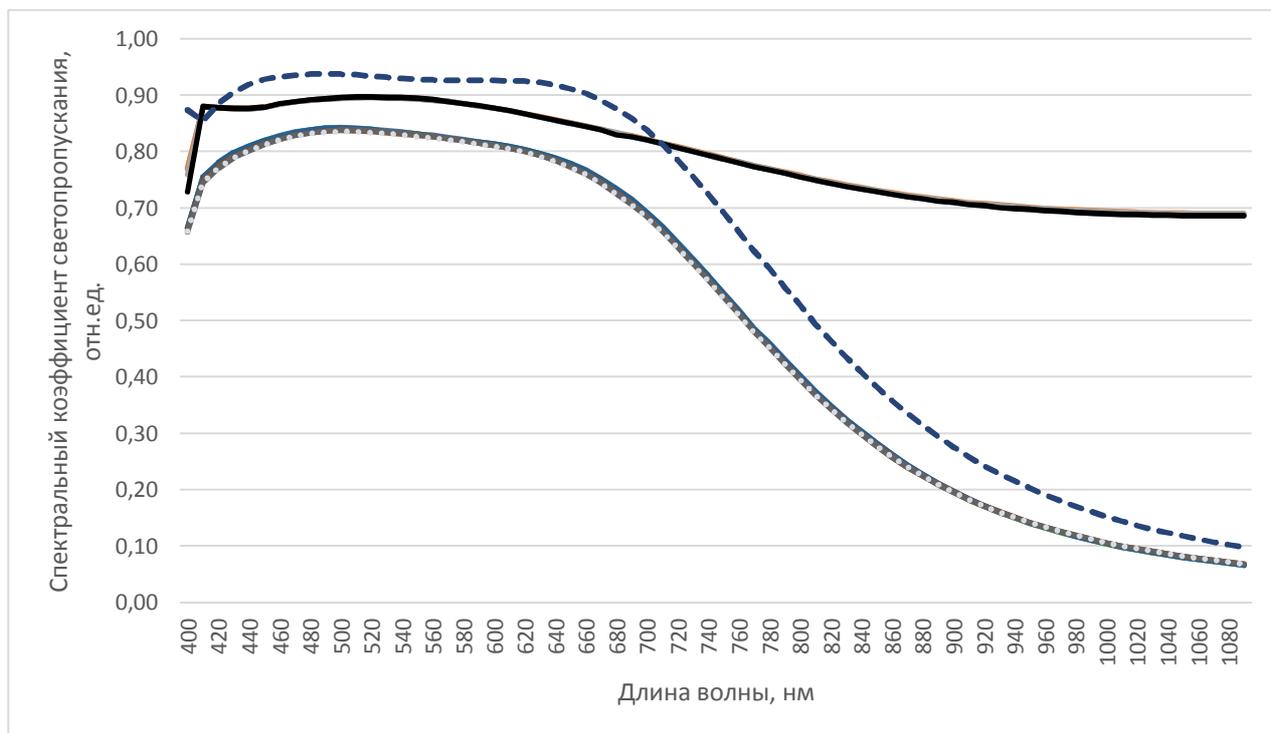


Рисунок 1 – Спектральные коэффициенты стекол без покрытия (сплошная линия), стекол с покрытиями (мелкий пунктир), условный спектральный коэффициент покрытия (пунктир)

2. Исследование спектральных характеристик стеклопакета со стеклом с мультифункциональным покрытием.

Результаты измерения спектрального коэффициента светопропускания стеклопакета $\tau(\lambda)$ со стеклом с мультифункциональным покрытием SunCool 70/40 представлены на графике (рис. 2). Для сравнения построено спектральное распределение произведения спектрального коэффициента стекла без покрытия и стекла с мультифункциональным покрытием (т.е. условный спектральный коэффициент стеклопакета $\tau'_{усл}(\lambda) = \tau_{БП}(\lambda) \cdot \tau_{СП}(\lambda)$). Как видно из графиков рисунка 2 спектральный коэффициент стеклопакета $\tau(\lambda)$ и условный спектральный коэффициент стеклопакета $\tau'_{усл}(\lambda)$ достаточно близки. При расчете их интегральных значений получено, что интегральный коэффициент стеклопакета равен $\tau = 0,733 \pm 0,001$, а условный интегральный коэффициент стеклопакета равен $\tau'_{усл} = 0,731$, что подтверждает возможность перемножения спектральных коэффициентов стекол, входящих в состав стеклопакета. Для проверки возможности перемножения интегральных коэффициентов стекол, входящих в состав стеклопакета, используем данные, полученные путем обработки результатов измерений стекол без покрытия и с покрытием, по формуле 1: $\tau''_{усл} = \tau_{БП} \cdot \tau_{СП} = \tau_{БП} \cdot \tau_{БП} \cdot \tau_{П} = 0,886 \cdot 0,824 = 0,73$. Как видно, полученный результат также согласуется с интегральным коэффициентом светопропускания стеклопакета $\tau = 0,733$. Таким образом, спектральный и интегральный коэффициенты стеклопакета могут быть найдены путём перемножения аналогичных коэффициентов светопропускания стекол, входящих в него.



Рисунок 2 – Спектральный коэффициент стеклопакета со стеклом с мультифункциональным покрытием (сплошная линия) $\tau(\lambda)$; произведение спектральных коэффициентов стекол без покрытия и с покрытием (пунктир) $\tau'_{\text{усл}}(\lambda) = \tau_{\text{БП}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{СП}}(\lambda)$.

Проверка полученного результата.

Для проверки полученного результата можно использовать данные, полученные расчетом по программе Spectrum On-line, размещенной на сайте фирмы-производителя. В таблице 1 приведены значения интегрального коэффициента светопропускания стеклопакета, включающего стекло с мультифункциональным покрытием Suncool 70/40. Из таблицы видно, что интегральный коэффициент светопропускания стеклопакета с этим стеклом толщиной 4 мм равен 0,72, тогда относительная погрешность определенного в данной работе коэффициента светопропускания стеклопакета равна 1,8%, что незначительно и может быть объяснено погрешностями измерения приборов. В таблице так же приведены коэффициенты наружного отражения стеклопакетов $\rho_{\text{нар}}$.

Таблица 1 – Примеры характеристик пропускания и отражения стеклопакетами с использованием мультифункционального стекла Suncool 70/40

Стеклопакет	τ , отн. ед.	$\rho_{\text{нар}}$, отн. ед.
4 мм Suncool 70/40– 16 мм Ar – 4 мм Optifloat Clear	0,72	0,10
6 мм Suncool 70/40– 16 мм Ar – 4 мм Optifloat Clear	0,71	0,10
6 мм Suncool 70/40– 16 мм Ar – 4 мм Optifloat Clear-12 мм Ar – 4 мм Optifloat Clear	0,65	0,14

Заключение

Определены коэффициенты светопропускания стекла без покрытия, стекла с покрытием Suncool 70/40, стеклопакета со стеклом Suncool 70/40 производства фирмы ООО «Пилкингтон Гласс» по методике стандарта ГОСТ Р 54164-2010.

Введено понятие условного спектрального коэффициента светопропускания покрытия, определённого на основании полученных результатов измерений для рассматриваемого по-

крытия. Условный коэффициент светопропускания покрытия резко снижается в ИК области, что соответствует назначению стекла.

Показано, что спектральный и интегральный коэффициенты светопропускания стеклопакета могут быть найдены перемножением соответствующих коэффициентов светопропускания стекол, входящих в него, что показывает возможность расчета светопропускания стеклопакетов со стеклами с покрытиями по приближенным формулам без учета эффектов нелинейной оптики.

Результаты расчета интегрального коэффициента светопропускания стеклопакета сопоставлены с результатами расчета по программе, размещенной на сайте производителя. Получено хорошее совпадение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чесноков, А.Г. Анализ оптических и тепловых характеристик вариантов остекления [Текст] / А.Г. Чесноков, С.А. Чесноков // Окна и двери, 1997. – №5. – С. 10-13.
2. Закируллин, Р.С. Селективное регулирование светопропускания стекла и остекленных конструкций [Текст] / Р.С. Закируллин // Вестник ОГУ. 2011. – №6 (125)/июнь. – С. 172-180.
3. Томилина, Е.А. Метод контроля и способы повышения светопропускания стекол оконных блоков [Текст]. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 2005.
4. Куприянов, В.Н. Пропускание ультрафиолетовой радиации оконными стеклами при различных углах падения луча [Текст] / В.Н. Куприянов, Ф.Р. Халикова // Жилищное строительство. – 2012. – №6. – С. 64-65.
5. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М., 1973. – 720 с.

В.Г. Гагарин

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва
Доктор технических наук, профессор
E-mail: gagarinvg@yandex.ru

Е.В. Коркина

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва
Научный сотрудник
E-mail: elena.v.korkina@gmail.com

И.А. Шмаров

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва
Кандидат технических наук
E-mail: shmarovigor@yandex.ru

П.П. Пастушков

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва
Кандидат технических наук
E-mail: pavel-one@mail.ru

V. GAGARIN, E. KORKINA,
I. SHMAROV, P. PASTUSHKOV

INVESTIGATION OF MULTIFUNCTIONAL COATING ON THE GLASS ON THE SPECTRAL TRANSMITTANCE OF LIGHT

Estimation of spectral coefficients of the light transmission of glass production LLC "Pilkington glass" with multifunction coating, no coating and double-glazed glass with multifunction coating was carried out. Based on this definition, the method of calculation of the conditional spectral transmittance of the double-glazed glass with multifunction coating is proposed.

Keywords: *low-emissivity coating, multifunctional coating, the spectral transmittance, the spectrophotometer.*

BIBLIOGRAPHY

1. Chesnokov, A.G. Analiz opticheskikh i teplovykh karakteristik variantov osteklenija [Tekst] / A.G. Chesnokov, S.A. Chesnokov // Okna i dveri, 1997. – №5. – S. 10-13.
2. Zakirullin, R.S. Selektivnoe regulirovanie svetopropuskaniya stekla i osteklennykh konstrukcij [Tekst] / R.S. Zakirullin // Vestnik OGU. 2011. – №6 (125)/ijun'. – S. 172-180.
3. Tomilina, E.A. Metod kontrolja i sposoby povyshenija svetopropuskaniya stekol okonnykh blokov [Tekst]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. – Novosibirsk, 2005.
4. Kuprijanov, V.N. Propuskanie ul'trafioletovoj radiacii okonnymi steklami pri razlichnyh uglah padenija lucha [Tekst] / V.N. Kuprijanov, F.R. Halikova // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2012. – №6. – S. 64-65.
5. Born, M. Osnovy optiki [Tekst] / M. Born, Je. Vol'f. – M., 1973. – 720 s.

V. Gagarin

Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and construction sciences, Moscow
Doctor of technical sciences, professor
E-mail: gagarinvg@yandex.ru

E. Korkina

Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and construction sciences, Moscow
Researcher
E-mail: elena.v.korkina@gmail.com

I. Shmarov

Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and construction sciences, Moscow
Candidate of technical sciences
E-mail: shmarovigor@yandex.ru

P. Pastushkov

Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and construction sciences, Moscow
Candidate of technical sciences
E-mail: pavel-one@mail.ru

ГУСЕВ Б.В., ФАЙВУСОВИЧ А.С.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ БЕТОНА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ

В статье рассматриваются процессы выщелачивания (коррозии) в поровом пространстве бетона. Эти процессы определяются по диффузионному или фильтрационному процессу выщелачивания. В таблицах и на графиках представлены различные условия такого переноса или выщелачивания.

Ключевые слова: бетон, процессы выщелачивания, фильтрация, диффузия, растворимость, концентрация.

Методика проведения экспериментальных исследований

Физико-математическая модель процессов выщелачивания бетона, использованная при разработке методики исследований, основывается на следующих исходных предпосылках [1]:

1. принимается пространственная система пористости, включающая продольные фильтрационные поры и примыкающие к ним по нормали капилляры. Принимается, что фильтрационные поры имеют одинаковые размеры и расположены на равных друг от друга расстояниях в шахматном порядке. В соответствии с указанным для расчетов может быть выделен структурный элемент цилиндрической формы с фильтрационной порой в центре, к которой в радиальном направлении примыкают капилляры. Причем в капиллярах имеет место диффузионный перенос, а в поре – преимущественно фильтрационный;

2. в предположении о квазистационарности процесса выделяется плоский элемент с координатой x_i в фильтрационной поре которого на протяжении временного интервала t_j поддерживается постоянная концентрация выщелачиваемого вещества;

3. для указанного плоского элемента решается вспомогательная задача типа Стефана с подвижной границей, т.е. с учетом фазового перехода, определяющая скорость процесса выщелачивания. Принимается, что процесс лимитируется диффузионным переносом вещества от границы фазового перехода к фильтрационной поре;

4. показано, что для описания процесса у поверхностного слоя бетона исходное уравнение может быть упрощено при использовании линеаризированной функции источника (выщелачивание в дистиллированной воде) и может быть записано в виде [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_0 \frac{\partial C}{\partial x} + q(t) \quad (1)$$

(индексы при переменных опущены).

$$q(t) = \frac{2D_{ref} \tilde{C}}{\frac{2D_{ref} \tilde{C}}{m_0} t + r_0^2} \quad D_{1ef} = D\varepsilon_f \quad D_{ref} = D\varepsilon_r \quad \tilde{C} = C_d$$

где D_{ref} , D_{1ef} – эффективные коэффициенты диффузии в продольном и радиальном направлении; C – концентрация жидкой фазы; V_0 – скорость фильтрации; \tilde{C} – усредненная концентрация на начальном участке выщелачивания; C_d – растворимость выщелачиваемого компонента; m_0 – реакционная емкость бетона (концентрация выщелачиваемого компонента).

Аналитическое решение соответствующей краевой задачи с использованием уравнения (1). Непосредственное использование решения, полученного в следующем виде:

$$C(x, t) = C_r - Nx - \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(\frac{-D_{ef} \mu_n^2}{l^2} t\right) \sin \mu_n \frac{x}{l} - m_0 \mu \ln\left(\frac{a_2 t}{b} + 1\right) e^{-\alpha(l-x)} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left[-\left(\frac{D_{ef} \mu_n^2}{l^2} + 2\beta\right) t - \left(\frac{D_{ef} \mu_n^2}{l^2} + \beta\right) \frac{b}{a_2}\right] \sin \mu_n \frac{x}{l} \quad (2)$$

для обработки экспериментальных данных и для практических целей представляет определенные неудобства. Дальнейшее упрощение связано с учетом систематического измерения концентраций фильтрата. Поэтому на каждом временном интервале процесс может рассматриваться в качестве квазистационарного. То же относится к конструкциям сооружения при систематических наблюдениях. Тогда на основе аналитического решения может быть построена полуэмпирическая модель в виде [2]:

$$\theta(x, t) = A(x) \ln\left(\frac{D\varepsilon_r}{r_0^2} \cdot \frac{\tilde{C}}{m_0} t + 1\right). \quad (3)$$

Значение $\theta(x, t)$ может быть представлено в виде:

$$\theta(x, t) = \frac{n(x, t)}{m_0} \quad 0 \leq \theta(x, t) \leq 1, 0,$$

где $\theta(x, t)$ – степень нейтрализации бетона; $n(x, t)$ – концентрация твердой фазы, перешедшей в жидкую; $A(x)$ – функция, характеризующая распределение концентраций выщелачиваемого компонента по длине пути фильтрации.

Решения однородного уравнения при условии квазистационарности имеет вид:

$$C = C_1 - (C_1 - C_2) \frac{\rho^{\beta x} - 1}{\rho^{\beta l} - 1}.$$

$$\beta = \frac{V_0}{D_{ef}},$$

где C_1, C_2 – концентрации жидкой фазы в начале и конце пути фильтрации ($x = 0$ и $x = l$); l – длина пути фильтрации.

В случае испытаний образца с учетом равномерного выщелачивания по высоте $A = const$.

В решении (3) использовано два безразмерных комплекса:

$$Fo = \frac{D\varepsilon_r}{r_0^2} t; \quad \Pi_2 = \frac{\tilde{C}}{m_0},$$

где Fo – критерий Фурье.

Кроме того, при переходе от испытываемого образца к реальному объекту используется еще один комплекс:

$$\Pi_3 = \frac{V_0 t}{L} \text{ или } \Pi_3 = \frac{t}{t_0}; \quad t_0 = \frac{L}{V_0}.$$

Здесь L – характерный размер (длина зоны выщелачивания). Π_3 – безразмерное время. Отметим, что при использовании обобщенных параметров отпадает необходимость в исследовании влияния каждого параметра в отдельности, они могут изменяться произвольно.

При разработке методики проведения исследований соблюдались определенные требования, основные из которых сводится к следующему:

- для соблюдения закона Дарси (ламинарности течения) требуется, чтобы среда была мелкозернистой. Поэтому для исключения каких-либо осложняющих факторов для испытаний применялись образцы размером $d=100$ мм и $h=50$ мм, изготовленные из мелкозернистого бетона. Размеры образцов соответствуют также требованиям ГОСТ Р 52804. Боковая поверхность образцов изолировалась эпоксидной смолой, а рабочие поверхности

обрабатывались абразивным материалом для удаления цементной пленки, характеризующейся структурными характеристиками, отличными от основного объема;

- известно, что проницаемость бетонов существенно зависит от степени гидратации цемента (в данном случае портландцемента). Испытания образцов бетона проводились после 2-х лет выдержки в естественных условиях;

- в натуральных условиях процессы выщелачивания протекают в течение десятилетий, поэтому важно проведение ускоренных испытаний. В рассматриваемом случае проведения ускоренных испытаний обеспечивалось использованием в качестве растворителя дистиллированной воды и применением бетонов с повышенными значениями пористости с разной степенью уплотнения бетона. Для изготовления образцов применялись смеси состава 1:2,89 и $\omega/c = 0,673$. В качестве заполнителя использовался песок $M_{кр} = 1,35$, а вяжущего портландцемент М400. Расход цемента $4,60 \text{ кН/м}^3$. Продолжительность виброуплотнения различалась в пределах 10 сек. для получения коэффициентов фильтрации в достаточно широком интервале значений. Величина гидростатического напора была принята постоянной и равной $i = 80$ ($i = H/h$, где H, h – соответственно высота столба воды и образца). Продолжительность опытов была принята равной 100 суткам. Однако при исчезающе малых скоростях фильтрации продолжительность сокращалась до 80 суток. В экспериментах определялось количество фильтрата на каждом временном интервале и соответствующее содержание ионов Ca^{2+} на основе химической реакции нейтрализации;

- известно также, что в процессе испытаний вследствие набухания бетона, связанного с перекристаллизацией продуктов гидратации, происходит изменение коэффициентов фильтрации k_{ϕ} . Указанное обстоятельство учитывалось при разработке методики исследований;

- при разработке программы исследований, а также для обработки и анализа результатов эксперимента использовались полученные в аналитическом решении два безразмерных комплекса, что позволило представить результаты экспериментов в простой и удобной для практического применения форме.

Результаты экспериментальных исследований

При обработке экспериментальных данных учитывалось, что скорость фильтрации изменяется во времени. Поэтому степень нейтрализации определялась на каждом временном i -ом временном интервале и общая, соответствующая текущему значению времени.

$$\theta_i(t) = \frac{V_i C_i t_i}{m_0 h},$$

где $V_i C_i$ – значение скорости и концентрации на i -ом интервале; $m_0 = 6,57 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$.

Значение m_0 рассчитывалось по ГОСТ Р 52804. Соответственно $\theta(t)$ равно:

$$\theta(t) = \sum_{i=1}^n \frac{V_i C_i t_i}{m_0 h}.$$

Обработка результатов экспериментов производилась на основе зависимости (3) с учетом $A = const$.

На основе выполненных измерений скоростей фильтрации установлена зависимость, определяющая изменение ее во времени. На основе обработки экспериментальных данных было получено, что скорость фильтрации при $t \leq 100$ суток описывается зависимостью:

$$V = V_0 e^{-\lambda t},$$

где V_0 – скорость в начальный момент времени, λ – эмпирический коэффициент. Частично результаты экспериментальных исследований показаны на рисунке 1 и приведены в таблице 1.

Из них следует, что с учетом различия величины V_0 и изменения коэффициента фильтрации k_ϕ во времени значения V изменяются в достаточно широком интервале.

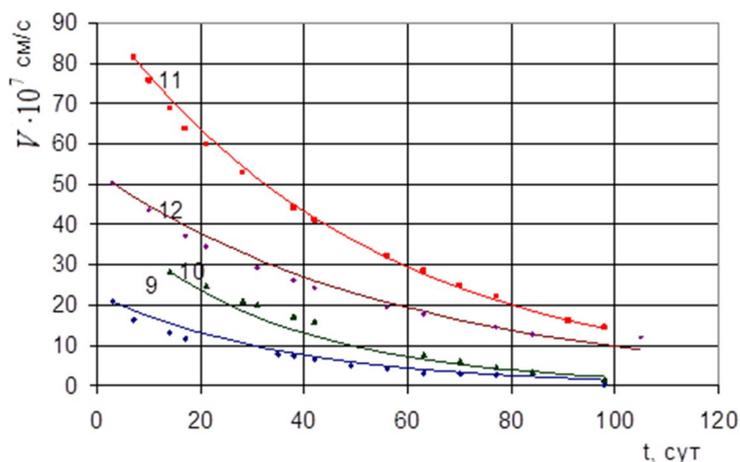


Рисунок 1 – Зависимость скорости фильтрации от продолжительности процесса

Таблица 1 – Характеристика параметров процесса фильтрации

Номер образца	$V_0, \frac{см}{с}$	$k_\phi, \frac{см}{с}$	λ
9	$22,743 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-8}$	0,0272
10	$42,974 \cdot 10^{-7}$	$5,37 \cdot 10^{-8}$	0,0298
11	$93,152 \cdot 10^{-7}$	$10,18 \cdot 10^{-8}$	0,0192
12	$52,84 \cdot 10^{-7}$	$6,61 \cdot 10^{-8}$	0,0168

На основании обработки результатов экспериментальных исследований с использованием зависимости (3) установлено, что все эксперименты можно разделить на две группы. К первой относятся эксперименты, в которых скорость выщелачивания не зависит от скорости фильтрации (рис. 2).

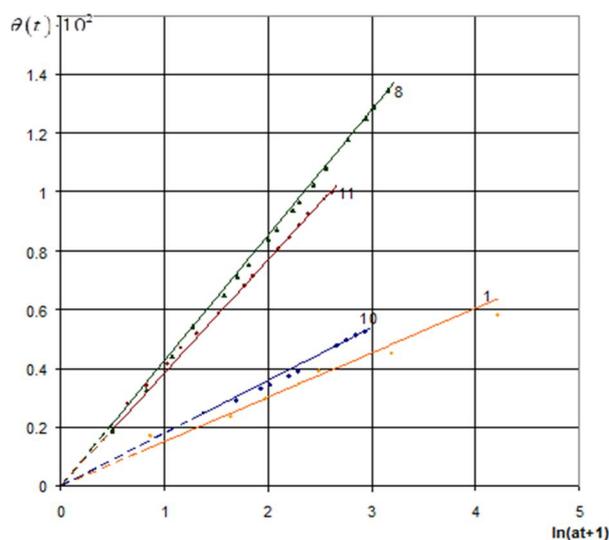


Рисунок 2 – Зависимость степени нейтрализации бетона от параметров процесса (область I)

$$\theta_1 = 0,144 \cdot 10^{-3} \ln(0,688t + 1); \theta_8 = 0,436 \cdot 10^{-3} \ln(0,213t + 1);$$

$$\theta_{10} = 0,175 \cdot 10^{-3} \ln(0,21t + 1); \theta_{11} = 0,385 \cdot 10^{-3} \ln(0,128t + 1).$$

Указанное означает, что процессы фильтрации лимитируются диффузионным переносом.

К другой группе относятся эксперименты, в которых в процессе четко выделяются две области. Причем граничному значению t_0 соответствует критическое значение скорости фильтрации $V_{кр}$. В области I ($t < t_0$) процесс лимитируется диффузионным, а при $t \geq t_0$ – фильтрационным переносом (рис. 3, табл. 2).

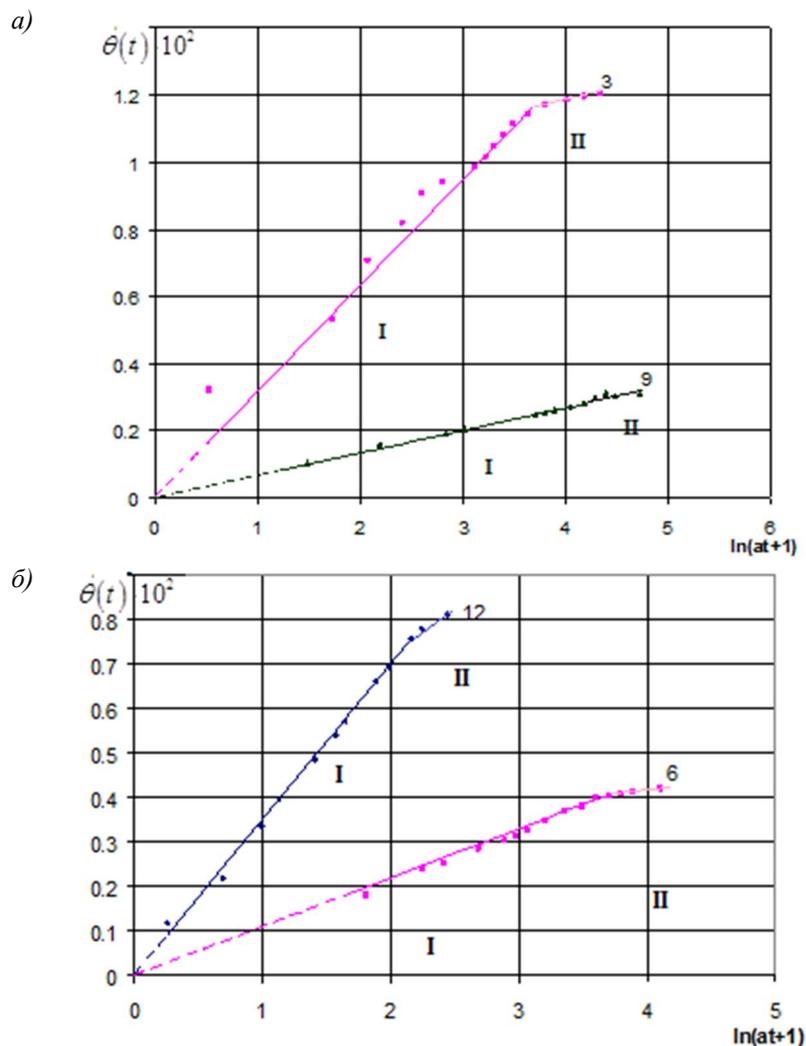


Рисунок 3 – Зависимость степени нейтрализации бетона от параметров процесса

Таблица 2 – Характеристика параметров процесса выщелачивания

Номер образца	Область I $V > V_{кр}, (t < t_0)$	$V_{кр}, \frac{см}{с}$	$t_0, \text{сут}$
3	$\theta = 0,309 \cdot 10^{-3} \ln(0,777t + 1)$	$38,84 \cdot 10^{-7}$	49
9	$\theta = 0,065 \cdot 10^{-3} \ln(1,145t + 1)$	$4,696 \cdot 10^{-7}$	58
6	$\theta = 0,106 \cdot 10^{-3} \ln(0,568t + 1)$	$8,64 \cdot 10^{-7}$	70
12	$\theta = 0,347 \cdot 10^{-3} \ln(0,1t + 1)$	$14,493 \cdot 10^{-7}$	77

Для области II: ($V \leq V_{кр}, (t \geq t_0)$), $\theta_3(t) = 0,619 \cdot 10^{-3} \cdot V_{кр} \frac{1 - e^{-\lambda \tau}}{\lambda}$.

Здесь и в дальнейшем под диффузионным понимается массоперенос в капиллярах, расположенных перпендикулярно к фильтрационным порам. Таким образом, процесс выщелачивания после достижения критической скорости фильтрации $V = V_{кр}$ характеризуется двумя областями, которые описываются следующими зависимостями:

$$\theta(t) = \theta_I(t) + \theta_{II}(t); \tag{4}$$

$$\theta_I(t) = A \ln(\alpha t + 1) \quad t < t_0; \tag{5}$$

$$\theta_{II} = \frac{CV_{кр}}{m_0} \frac{(1 - e^{-\lambda \tau})}{\lambda}; \quad \tau = t - t_0; \quad \tau \geq 0.$$

Здесь A – эмпирический коэффициент.

Зависимости, показанные на рисунке 2 и полученные на основе зависимости (3), характеризуют верхнюю границу области I. Принципиально важно, что теоретическая зависимость функции источника $\theta(t)$ (4) и экспериментальная (5) полностью совпадают. Из анализа зависимостей (3, 4) следует, что ниже кривой скорости выщелачивания (рис. 4) располагается область II.

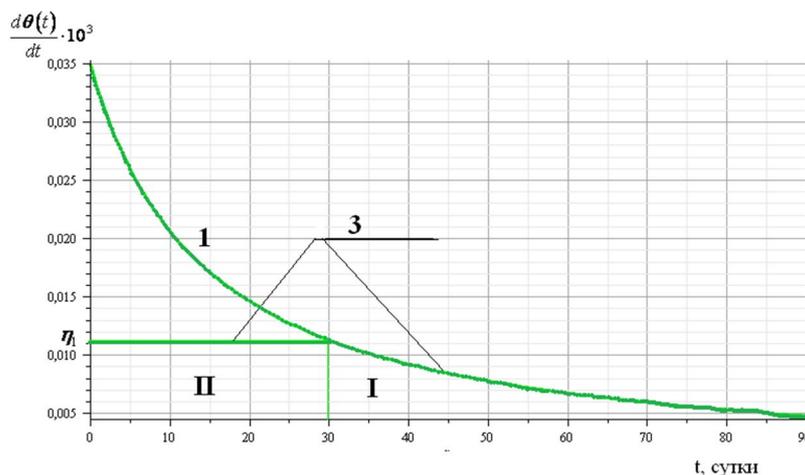


Рисунок 4 – Зависимость скорости выщелачивания от продолжительности процесса

$$1 - \frac{d\theta}{dt} = \frac{0,035}{0,07t + 1}; \quad 3 - \text{ скорости выщелачивания в областях I, II.}$$

Обозначим:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \eta.$$

В данном случае $\eta = const$. Каждому последовательному значению η_i соответствует значение t_i , при котором лимитирующий фильтрационный режим сменяется диффузионным. На рис.4 значению η_1 соответствует значение t_1 . Соответственно значение θ_I на (рис. 5):

$$\theta_I = \eta_1 t_1.$$

Совокупность точек θ_i определяет нижнюю, границу области I (кривая 2, рис. 5). Наличие двух границ, положение которых известно, позволяет описать процессы выщелачивания в случае смены лимитирующих режимов. В области II процесс описывается зависимостями:

$$\eta_{II} = \frac{CV}{m_0 h} = const; \tag{6}$$

$$\theta_{II}(t) = \frac{CVt}{m_0h}; t < t_1. \quad (7)$$

В области II процесс протекает линейно (см. рис. 5). При достижении значения $\theta_1(t_1)$ происходит смена режима, и процесс протекает далее в области I. Для построения соответствующей зависимости следует кривую 1, проходящую через точку k , которой соответствует время t_0 , сместить по горизонтали в точку n . Указанное означает переход к новой переменной τ .

$$\tau = t + t_1 - t_0.$$

Соответственно:

$$\theta_I(t) = A \ln n \frac{\alpha\tau + 1}{\alpha\tau_0 + 1} \quad \tau \geq \tau_0. \quad (8)$$

Кривая 3 показана на рисунке 5.

Аналогичным путем может быть построена такая же зависимость для других значений A и α .

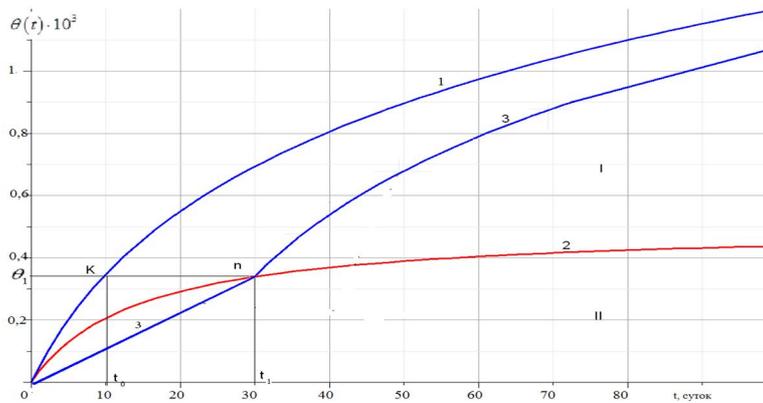


Рисунок 5 – Зависимость размеров областей выщелачивания от параметров процесса

$$1 - \theta_I(t) = 0,5 \ln(0,07t + 1); 2 - \theta_{II}(t) = \frac{0,035t}{0,07t + 1}; 3 - \text{процесс выщелачивания в области I и II.}$$

Рассмотрим возможности практического использования полученных зависимостей (6-8). В случае, когда имеются экспериментально установленные значения η_{II} (6), дальнейшие расчеты выполняются по рассмотренной схеме. Возможен вариант, когда скорость фильтрации рассчитывается по формуле Дарси, а соответствующее значение концентраций неизвестно.

Значение скорости в соответствии с законом Дарси:

$$V = -k_\phi \frac{H}{h}; k_\phi = \frac{k_0 g}{\nu}. \quad (9)$$

где k_0 – коэффициент проницаемости, g – ускорение силы тяжести; ν – кинетическая вязкость жидкой фазы.

Используя зависимости (5) и (6) находим значение концентрации C_1 в точке их пересечения ($t = t_1$).

$$\frac{C_1 V_1}{m_0 h} = \frac{A \alpha_0 \cdot \frac{C_1}{m_0}}{\left(\alpha_0 \frac{C_1}{m_0} t + 1\right)}.$$

$$\text{Здесь учтено: } \alpha = \alpha_0 \frac{C_1}{m_0}.$$

Откуда следует:

$$C_1 = \frac{m_0}{t_1} \left(\frac{Ah}{V_1} - \frac{1}{\alpha_0} \right).$$

$$\theta_{II}(t) = \frac{C_1 V_1 t}{m_0 h}.$$

$$\theta_{II}(t) = \frac{V_1 t}{t_1} \left(\frac{A}{V_1} - \frac{1}{\alpha h_0} \right) t \leq t_1.$$

Значение V_1 определяется из (9). Переход от $\theta(t)$ к количеству фильтрата осуществляется с учетом (7). Соответственно переход из области II в область I осуществляется по зависимости (8).

Из вышеизложенного следует, что для определения границ обеих областей выщелачивания следует экспериментально определить значения $\theta(t)$ и $\frac{d\theta(t)}{dt}$ при значениях скорости

фильтрации (гидростатического напора), не влияющих на скорость выщелачивания. Результаты целесообразно представлять в виде схем, представленных на рисунках 4 и 5. При этом кривая на рисунке 4 и кривая на рисунке 5 характеризуют верхнюю границу области выщелачивания, в которой лимитирующей является стадия диффузионного массопереноса. Нижняя граница указанной области определяется на основе зависимости, представленной на рис (4). Вполне очевидно, что ниже кривой располагается область, в которой процесс выщелачивания лимитируется скоростью фильтрации. Пусть скорость выщелачивания равна η_1 , тогда во временном интервале $0 \leq t \leq t_1$ процесс лимитируется скоростью фильтрации, а при $t \geq t_1$ протекает в соответствии с кривой и определяется диффузионным переносом. Задавая различные значения η_i и определяя по графику (рис. 4) соответствующие значения t_i можно построить кривую 2 (см. рис. 5), которая характеризует нижнюю границу области, лимитируемой диффузионным переносом. Соответственно ниже располагается область, в которой процесс выщелачивания определяется фильтрационным переносом. Из анализа представленных на рисунке (4), (5) материалов следует возможность смены фильтрационного режима выщелачивания диффузионным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Б.В. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства [Текст] / Б.В. Гусев, В.И. Кондращенко, Б.П. Маслов, А.С. Файвусович. – М.: Научный мир, 2006. – С. 169-278.
2. Левадная, С.И. Прогнозирование долговечности бетона плотин ГЭС при фильтрации [Текст] / С.И. Левадная, А.С. Файвусович, В.И. Снисаренко // Науковий вісник ЛНАУ. Серія «Технічні науки». – Луганськ, 2010. – №14. – С. 238-249.

Б.В. Гусев

Российская инженерная академия, г. Москва
Доктор технических наук, президент Российской инженерной академии

А.С. Файвусович

Луганский национальный аграрный университет
Доктор технических наук, профессор

B. GUSEV, A. FAIVUSOVICH

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PROCESSES OF CONCRETE LEACHING DURING FILTRATION

The article covers processes of leaching (corrosion) in pore space of concrete. These processes are being defined by diffusion or filtrational process of leaching. Tables and flowcharts represent various conditions of such carry or leaching.

Keywords: concrete, leaching processes, filtration, diffusion, solubility, concentration.

BIBLIOGRAPHY

1. Gusev B.V. Formirovanie struktury kompozicionnyh materialov i ih svojstva [Tekst] / B.V. Gusev, V.I. Kondrashenko, B.P. Maslov, A.S. Fajvusovich. – M.: Nauchnyj mir, 2006. – S. 169-278.
2. Levadnaja, S.I. Prognozirovanie dolgovechnosti betona plotin GJeS pri fil'tracii [Tekst] / S.I. Levadnaja, A.S. Fajvusovich, V.I. Snisarenko // Naukovij visnik LNAU. Serija «Tehnichni nauki». – Lugans'k, 2010. – №14. – S. 238-249.

B. Gusev

Russian engineering academy, Moscow

Doctor of technical sciences, president of the Russian engineering academy

A. Faivusovich

Lugansk national agrarian university

Doctor of technical sciences, professor

ЕРЕМКИН А.И., АВЕРКИН А.Г.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ КОНТАКТНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Предложены модифицированные методики определения площади поверхности тепло-массопереноса в контактном аппарате в режимах увлажнения, охлаждения, осушения воздуха водой, а также осушения воздуха твердым сорбентом на основе числа единиц переноса. Число единиц переноса определяют методом графического интегрирования с применением $I-d$ -диаграммы влажного воздуха как для оценки теплового, так и массообменного процесса.

Ключевые слова: методика расчета, контактный аппарат, поверхность тепло-массопереноса, число единиц переноса, метод графического интегрирования, силикагель

В системах кондиционирования воздуха (СКВ) контактные аппараты применяют для тепловлажностной обработки воздуха водой при создании микроклимата помещений различного назначения и др.

Контактные аппараты конструктивно выполняют в виде камер форсуночного распыления, сотового орошения [1]. В них воздушный поток непосредственно контактирует с водой путем распыления воды с помощью механических форсунок, применения орошаемой насадки (листовой, кольцевой и др.). В результате теплообмена воздух при этом может увлажняться, охлаждаться, или осушаться.

Использование для расчета контактных аппаратов базовых уравнений теплообмена в большинстве случаев затруднено из-за невозможности прямого определения величины поверхности тепло-массопереноса.

Оценка эффективности работы и теплотехнический расчет камер форсуночного распыления и других контактных аппаратов осуществляется с применением коэффициентов эффективности и основаны на графических построениях процесса тепловлажностной обработки воздушного потока на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха [1, 2].

Коэффициенты эффективности, характеризующие отношение теплообмена в реальном процессе к максимально возможному теплообмену при различной ориентации идеальных процессов, не были получены в результате какого-либо математического вывода или анализа [2].

Анализ данных методик показал, что в их основе применяются функциональные зависимости и эмпирические уравнения, полученные на экспериментальных стендах, имитирующие определенный тип оросительных форсуночных камер. Типовые зависимости отражают особенности аэродинамической обстановки в дождевом пространстве оросительной камеры, являются ее технической характеристикой и приводятся в справочниках и каталогах фирм – производителей данного оборудования. Каждая методика в отдельности посвящена расчету определенного класса оросительных форсуночных камер.

Е.В. Стефановым был предложен метод оценки эффективности работы форсуночных камер при обработке экспериментальных данных с помощью чисел единиц переноса явной теплоты NTU_y и полной теплоты NTU [2, 3]. Эти показатели широко применяются для расчетов процессов и аппаратов химической технологии как в зарубежных странах [4], так и в России [5].

Предлагается использовать метод оценки эффективности работы контактных аппаратов для тепловлажностной обработки воздуха с помощью чисел единиц переноса для их конструктивного и поверочного расчета.

В отечественной литературе для показателя числа единиц переноса принято буквенное обозначение – N или n [5]. Символ N_t будет нами применяться для обозначения числа единиц переноса полной теплоты, символ n_t – для обозначения числа единиц переноса явной теплоты, n_m – для обозначения числа единиц переноса массы.

Определение чисел единиц переноса рекомендуется производить графическим методом, в частности, методом графического интегрирования [5].

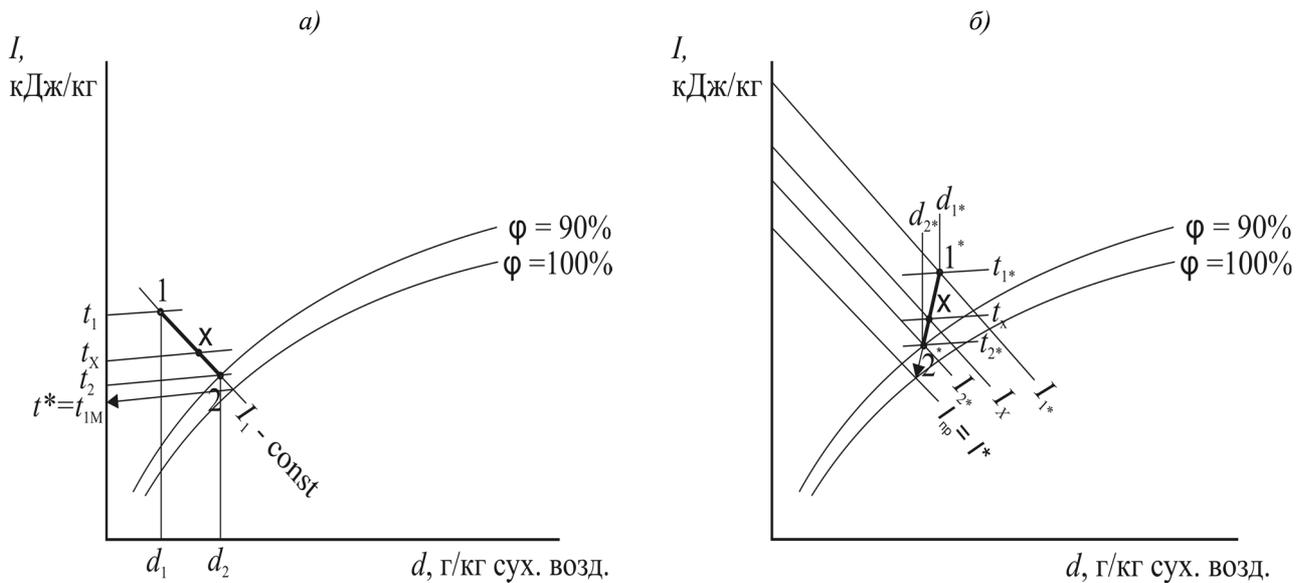
Данный метод включает следующие этапы.

Этап 1 – построение рабочей и равновесной линий процесса в соответствующей системе координат.

В качестве системы координат предлагается использовать *I-d*-диаграмму влажного воздуха [6]. Для контактных аппаратов графическими построениями на *I-d*-диаграмме являются:

- кривая насыщенного воздуха $\varphi = 100\%$ (равновесная линия);
- прямая линия процесса, характеризующая тепловлажностную обработку воздуха (рабочая линия).

На рисунке 1, а, б представлены графические построения на *I-d*-диаграмме влажного воздуха для определения рабочих и равновесных величин [6].



**Рисунок 1 – Определение равновесных (t^*) и рабочих (t_x) значений температуры, равновесных (I^*) и рабочих (I_x) значений энтальпии воздуха:
а – адиабатическое увлажнение и охлаждение воздуха (1 – 2);
б – осушение и охлаждение воздуха в политропических условиях ($1^* - 2^*$)**

В качестве базового варианта на рисунке 1, а приведено построение адиабатического (изоэнтальпийного) процесса охлаждения и увлажнения воздуха в виде прямой 1 – 2. Точка 1 характеризует начальное состояние воздуха, т.е. на входе в контактный аппарат, точка 2 отвечает конечному состоянию воздуха, т.е. на выходе из аппарата. Схематично в виде стрелок показано определение равновесных значений температуры воздуха для точек 1, 2 и для промежуточных X – точек. Определение рабочих и равновесных значений энтальпии воздуха приведено на рисунке 1, б.

На основе этих данных строятся графические зависимости: $1/(t - t^*) = f(t)$; $1/(I - I^*) = f(I)$.

Этап 2 – построение графической зависимости $\frac{1}{Y - Y^} = f(Y)$ на основе рабочей и равновесной линий процесса* (рис. 2).

Здесь Y, Y^* – соответственно, рабочие и равновесные параметры, характеризующие состояние воздушного потока при тепловлажностной обработке воздуха.

В качестве рабочих и равновесных параметров предлагается определять [6]:

- температуру (для оценки явного теплообмена);
- энтальпию (для оценки полного теплообмена);

- парциальное давление водяного пара, влагосодержание (для оценки массообменного процесса).

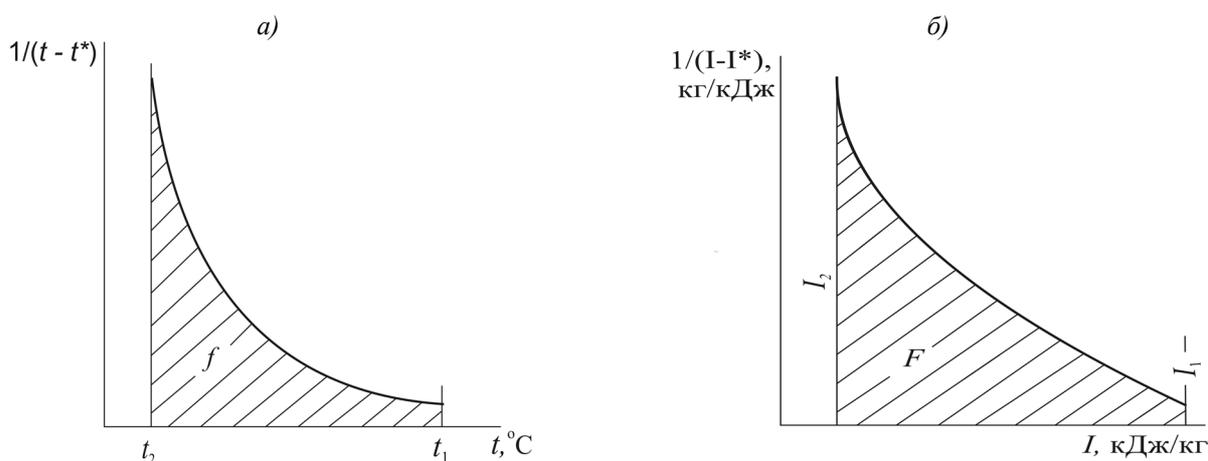


Рисунок 2 – Графические зависимости к определению числа единиц переноса:
 а - зависимость $1/(t - t^*) = f(t)$; б – зависимость $1/(I - I^*) = f(I)$

Определение равновесных парциальных давлений водяного пара при увлажнении и осушении воздуха рекомендуются осуществлять на основе графических построений на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха, приведенных на рисунке 3.

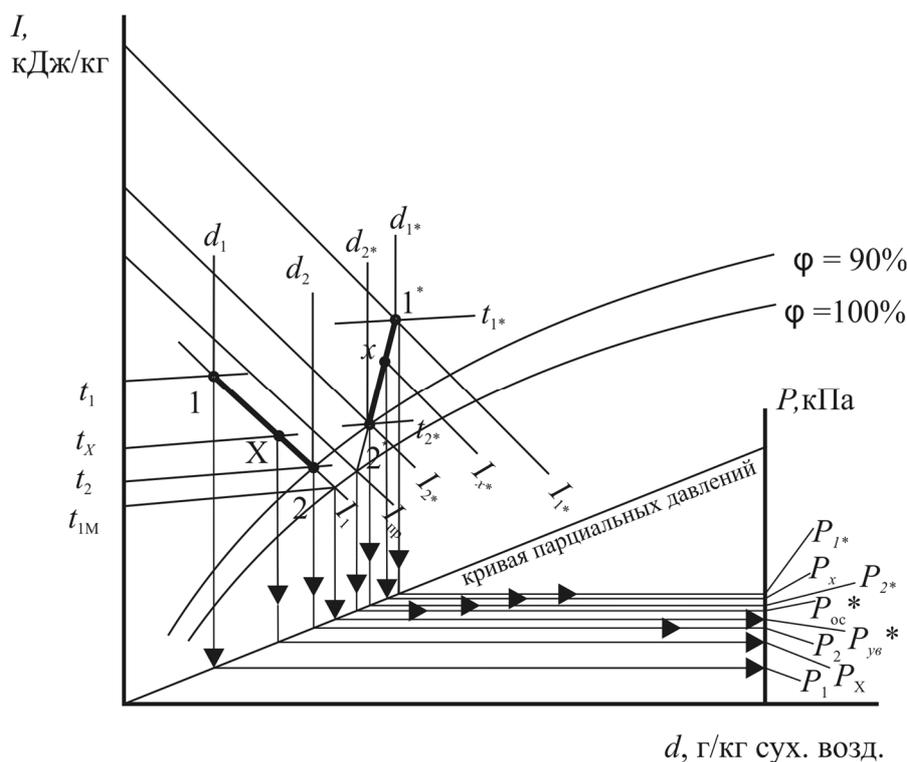


Рисунок 3 – Графические построения для определения рабочих и равновесных парциальных давлений водяного пара в режиме адиабатического увлажнения (линия 1-2), политропического осушения воздуха (линия 1*-2*) в контактном аппарате

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: P_1, P_2, P_x – рабочие парциальные давления водяного пара в режиме адиабатического увлажнения воздуха, кПа; $P_{ув}^*$ – равновесное парциальное давление водяного пара в режиме адиабатического увлажнения воздуха, кПа; P_{1^*}, P_{2^*}, P_x^* – рабочие парциальные давления водяного пара в режиме политропического

осушения воздуха, кПа; P_{oc}^* – равновесное парциальное давление водяного пара при осушении воздуха, кПа.

В результате анализа полученных данных, представленных на рис. 3, осуществляют построение графической зависимости $\frac{1}{P - P^*} = f(P)$ для рассматриваемых режимов тепловлажностной обработки воздуха (типовые построения для теплообмена приведены на рисунке 2).

Этап 3 – определение числа единиц переноса n_t , или N_t , или n_m по уравнениям:

$$n_t = \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{t - t^*} = f m_1 m_2; \quad (1)$$

$$N_t = \int_{I_2}^{I_1} \frac{dI}{I - I^*} = F m_3 m_4; \quad (2)$$

$$n_{m(p)} = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P - P^*} = f_p m_5 m_6, \quad (3)$$

где t, t^* – соответственно, рабочая (текущая) и равновесная температура воздуха, °С (рис. 1, а); I, I^* – соответственно, рабочая (текущая) и равновесная энтальпия воздуха, кДж/кг (рис. 1, б); P, P^* – соответственно, рабочее (текущее) и равновесное парциальное давление водяных паров в воздушном потоке, кПа (рис. 3); f, F, f_p – площадь криволинейной трапеции в принятых величинах (рис. 2); $m_1, m_2; m_3, m_4; m_5, m_6$ – соответственно, масштабы измеряемых величин по оси абсциссы и ординаты (рис. 2).

В работах [3, 6] показано:

$$n_t = \frac{\alpha F}{Gc} = \frac{t_1 - t_2}{\Delta t_p}; \quad (4)$$

$$N_t = \frac{\beta_c F}{G} = \frac{I_1 - I_2}{\Delta I_p}; \quad (5)$$

$$n_{m(d)} = \frac{\beta_d F}{G} = \frac{d_1 - d_2}{\Delta d_p}; \quad (6)$$

$$n_{m(p)} = \frac{\beta_p P_6 F}{0.622 G} = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P_p}, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); $\beta_c, \beta_d, \beta_p$ – коэффициенты массоотдачи, отнесенные, соответственно, к разности концентраций, влагосодержаний и парциальных давлений, кг/м² (ед. дв. силы); F – поверхность тепло- и массообмена, м²; G – расход воздуха, кг/с; c – теплоемкость влажного воздуха, Дж/(кг·°С); t, I, d, P – соответственно, температура, °С; энтальпия, кДж/кг, влагосодержание воздуха, г/кг сух. возд. и парциальное давление водяных паров, кПа (индекс 1 отвечает начальному состоянию, индекс 2 – конечному состоянию воздуха); Δt_p – средняя разность температур между воздухом и водой (движущая сила процесса), °С; ΔI_p – средняя разность энтальпий между воздухом и водой (движущая сила процесса), кДж/кг; Δd_p – средняя разность влагосодержаний воздуха и водой (движущая сила процесса), г/кг; ΔP_p – средняя разность парциальных давлений водяных паров у поверхности водной фазы и в воздухе, кПа; P_6 – барометрическое давление, кПа.

Определение кинетических коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в уравнениях (4)-(7) осуществляется на основе теории подобия с применением тепловых и диффузионных критериев подобия [5].

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad (8)$$

$$\beta = \text{Nu}' \frac{D}{l}, \quad (9)$$

где l – определяющий линейный размер, м; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); D – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе, м²/с; Nu, Nu' – соответственно, критерий Нуссельта для теплового и диффузионного (массообменного) процесса.

Критерии Нуссельта определяют по критериальным уравнениям, приведенным в [5, 6]. Для расчета тепло- и массообмена с поверхности капель в условиях вынужденной конвекции предлагается использовать следующие уравнения (при Re = 1...220) [7]:

$$\text{Nu} = 2 + 1,07\text{Re}^{0,48}\text{Pr}^{0,33}\text{Gu}^{0,175}; \quad (10)$$

$$\text{Nu}' = 2 + 0,85\text{Re}^{0,52}(\text{Pr}')^{0,33}\text{Gu}^{0,135}, \quad (11)$$

где Re – критерий Рейнольдса; Pr, Pr' – соответственно, критерий Прандтля тепловой и диффузионный; Gu – критерий Гухмана.

Определяющие критерии вычисляют по формулам:

$$\text{Re} = \frac{vl\rho}{\mu} = \frac{vl}{\nu}; \quad (12)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c}{\lambda} = \frac{\nu}{a}; \quad (13)$$

$$\text{Gu} = \frac{T_c - T_m}{T_c}; \quad (14)$$

$$\text{Pr}' = \frac{\mu\rho}{D}, \quad (15)$$

где ν – линейная скорость воздушного потока, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; μ , – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); a – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с; T_c – температура воздушного потока по сухому термометру, К; T_m – температура воздушного потока по мокрому термометру, К.

Этап 4 – определение поверхности теплообмена:

требуемая поверхность теплообмена в контактном аппарате, отвечающая отрезку 1-2 (рис. 1), в соответствии с уравнением (4) равна:

$$F = \frac{Gcn_t}{\alpha}, \quad (16)$$

требуемая поверхность массообмена для рассматриваемого процесса на основе уравнения (7):

$$F = \frac{0,622Gn_m}{\beta P P_G}. \quad (17)$$

Для полной оценки тепло- и массопереноса в аппаратах СКВ Стефанов Е.В. ввел понятие о совершенстве процесса [2]:

$$\xi' = \frac{n_t}{n_m}. \quad (18)$$

Процесс тепло- и массообмена в аппарате считается совершенным, если $\xi' = 1$. Отмечается [3], что на практике встречаются случаи, когда $\xi' \neq 1$. Такие случаи возникают при различии площадей поверхности тепло- и массообмена. Приведенная методика дополнительно позволяет проводить анализ подобных ситуаций.

В качестве базового оборудования в СКВ могут применяться осушители на основе твердых сорбентов, т.е. адсорбентов. Типовые аппараты называют адсорберами. На практике широкое распространение получили адсорберы с неподвижным слоем адсорбента [5, 8].

Эффективным адсорбентом водяных паров является силикагель, т.е. гидратированный аморфный кремнезем. Его формула SiO₂·nH₂O. Это зернистое стекловидное вещество, получаемое путем обработки жидкого стекла минеральной кислотой. Для осушения воздуха приме-

няют силикагель марки КСМ с размерами зерен 1...3 мм [8].

Конечным состоянием процесса адсорбции, как и других массообменных процессов, является равновесное состояние.

Зависимость равновесного влагосодержания силикагеля от параметров осушаемого воздуха приведена на рисунок 4 [6].

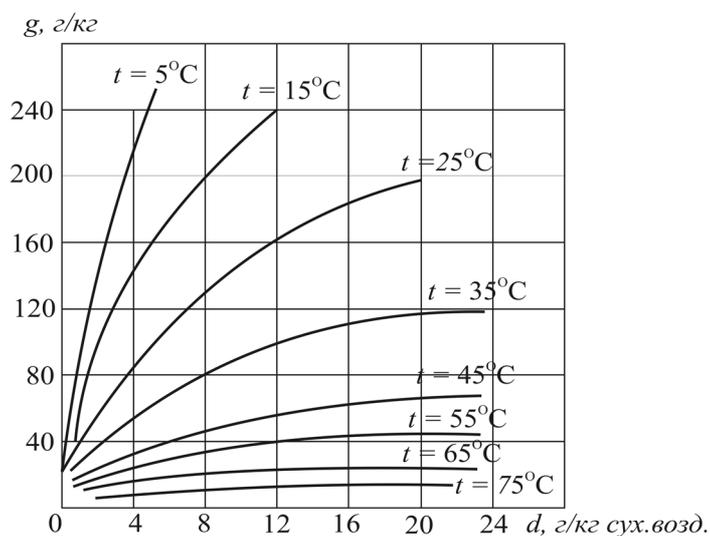


Рисунок 4 – Изотермы адсорбции процесса осушения воздуха силикагелем:
 g – равновесное влагосодержание силикагеля, г/кг; d – влагосодержание воздуха, г/кг сух. возд.;
 t – температура воздуха, °C

Осушение воздуха силикагелем сопровождается выделением теплоты адсорбции и теплоты смачивания, что способствует повышению температуры рабочих тел, т.е. силикагеля и воздушного потока. При отводе теплоты из адсорбера процесс сорбции водяных паров может протекать изотермически, при отсутствии отвода теплоты процесс является изоэнтальпийным или адиабатическим, и луч процесса на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха изображают по линии $I = \text{const}$ [6]. Особенности сорбционного процесса необходимо учитывать при применении методики расчета типового оборудования.

В то же время анализ методов расчета адсорберов с неподвижным слоем адсорбента показывает, что в качестве базовой кривой автоматически предлагается изотерма адсорбции, т.е. условия процесса не конкретизируются [5]. Очевидно, при изоэнтальпийном процессе осушения воздуха в качестве базовой кривой нужно использовать изоэнтальпу (адиабату) адсорбции.

Для графического построения изоэнтальпы адсорбции водяных паров из воздушного потока силикагелем авторы предлагают применить $I-d$ -диаграмму влажного воздуха, на которой дополнительно нанесены изолинии D^* равновесного влагосодержания силикагеля марки КСМ (рис. 5).

Как указывалось выше, в химической технологии разработаны методы расчета оборудования на основе числа единиц переноса [5]. Эту методологию предлагается использовать для описанных выше условий.

Методика включает следующую последовательность операций [6]:

- задаются исходные данные (адсорбер работает без отвода теплоты; расход воздуха для осушения G , кг/с; начальные параметры воздуха, например, температура t_1 , °C, относительная влажность ϕ_1 , % или другие сочетания двух параметров воздуха: температура t_1 , °C, влагосодержание d_1 , г/кг; температура t_1 , °C, энтальпия I , кДж/кг и т.д.; конечный параметр воздуха после осушения, например, температура t_2 , °C или влагосодержание d_2 , г/кг сух.возд.).

- строится процесс осушения воздуха на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха, например, отрезок прямой 1-2 (рис. 5).

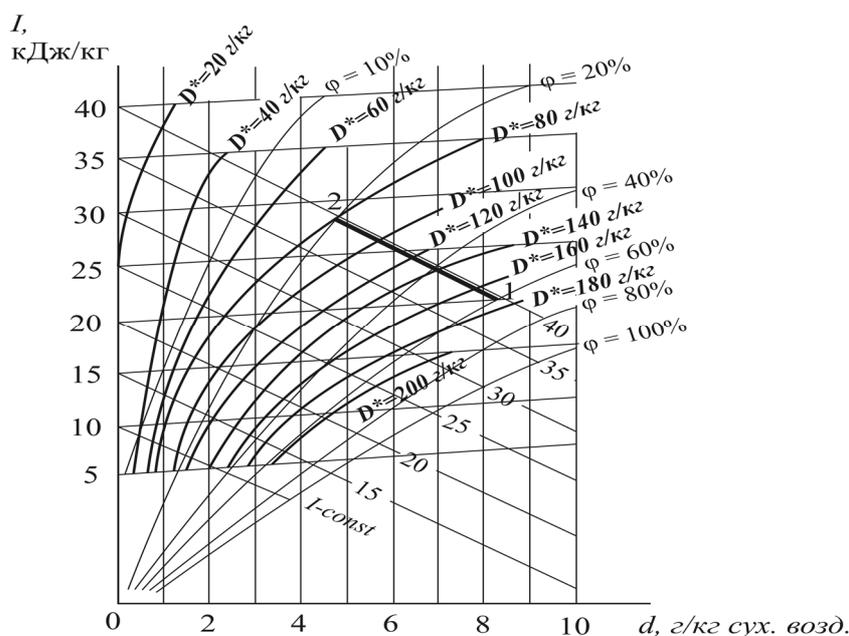


Рисунок 5 – I-d-диаграмма влажного воздуха с изолиниями равновесного влагосодержания силикагеля (D^*)

- определяется диаметр адсорбера D_a :

$$D_a = \sqrt{\frac{G}{0,785 \cdot \rho \cdot v}}, \tag{19}$$

где v – скорость воздуха в сечении адсорбера, м/с ($v = 0,25 \dots 0,30$ м/с) [5, 6];

- определяется высота слоя сорбента (силикагеля) H :

$$H = n h, \tag{20}$$

где n – число единиц переноса; h – высота единицы переноса, м.

а) определяется число единиц переноса.

В соответствии с рекомендациями [6] на основе рисунка 5 осуществляют построение равновесной линии (в данных условиях изохэнтальпы адсорбции) и рабочей линии процесса (рис. 6).

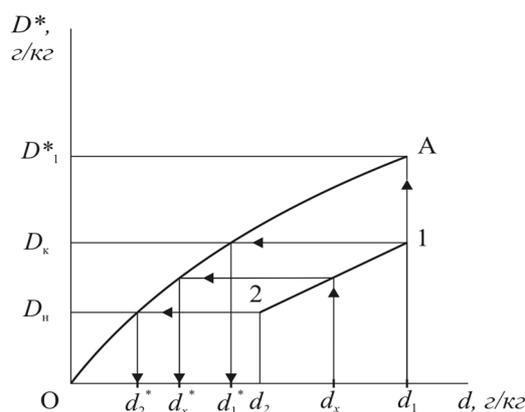


Рисунок 6 – Изоэнтальпа адсорбции (OA) и рабочая линия процесса (1 – 2): d, D^* – влагосодержания воздуха и соответствующие равновесные влагосодержания силикагеля

Расчет числа единиц переноса осуществляют по формуле:

$$n = \int_{d_2}^{d_1} \frac{\partial(d)}{d - d^*}, \tag{21}$$

где d, d^* – текущее (рабочее) и равновесное влагосодержание осушаемого воздуха, г/кг сух. возд.

На рисунке 6 показано в виде стрелок определение равновесных влагосодержаний воздуха для соответствующих рабочих влагосодержаний.

Для численного определения числа единиц переноса по формуле (21) строят графическую зависимость осушения воздуха силикагелем:

$$\frac{1}{d-d^*} = f(d). \quad (22)$$

Общий вид графической зависимости приведен на рисунке 7.

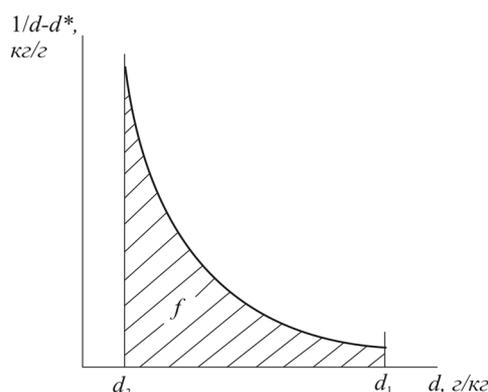


Рисунок 7 – Зависимость $1/(d-d^*)=f(d)$

Число единиц переноса численно равно:

$$n = f \cdot M_1 \cdot M_2, \quad (23)$$

где f – площадь криволинейной трапеции, M_1, M_2 – соответственно, масштаб величин по оси абсцисс и ординат.

б) *определяется высота единицы переноса.*

Расчет производится по формуле:

$$h = \frac{G}{S_c \beta_y}, \quad (24)$$

где S_c – площадь сечения слоя адсорбента, m^2 ; β_y – объемный коэффициент массоотдачи в воздухе, c^{-1} .

$$S_c = 0,785 D_a^2; \quad (25)$$

$$\beta_y = \frac{Nu' D}{d_3^2}, \quad (26)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр зерна силикагеля, м.

Диффузионный критерий Нуссельта (Nu') определяется в зависимости от численного значения модифицированного критерия Рейнольдса – Re :

$$Re = \frac{v d_3 \rho}{\mu \epsilon_H}, \quad (27)$$

где ϵ_H – порозность неподвижного слоя адсорбента ($\epsilon_H = 0,3$ [5]).

$$\text{При } Re < 2, Nu' = 0,51 Re^{0,85} (Pr')^{0,33}. \quad (28)$$

$$\text{При } Re = 2 - 30, Nu' = 0,725 Re^{0,47} (Pr')^{0,33}. \quad (29)$$

$$\text{При } Re > 30, Nu' = 0,395 Re^{0,64} (Pr')^{0,33}. \quad (30)$$

Другие конструктивные размеры адсорбера (общая высота, высота крышек аппарата и т.д.) находятся в определенных соотношениях от вычисленных основных параметров: диамет-

ра и высоты слоя адсорбента [5, 6].

Выводы

Усовершенствованы и научно обоснованы методики расчета контактных аппаратов при обработке воздуха водой, осушителей воздуха с применением твердого сорбента (силикагеля) на основе числа единиц переноса. Определение числа единиц переноса осуществляется методом графического интегрирования, необходимые расчеты предлагается производить на основе графических построений процессов обработки воздуха на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха и ее модификации, на которой нанесены изолинии равновесного влагосодержания силикагеля. Методики позволяют раздельно рассчитать и выполнить сравнительную оценку требуемой поверхности для реализации теплообменного и массообменного процесса, проводить поверочные и конструктивные расчеты контактных аппаратов тепловлажностной обработки воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин, О.Я. Отечественное оборудование для создания систем вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст]: Каталог / О.Я. Кокорин, А.М. Дерипасов. – М.: ИКФ «Каталог», 2002. – 91 с.
2. Стефанов, Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха [Текст] / Е.В. Стефанов. – Санкт-Петербург: «АВОК-Северо-Запад», 2005. – 400 с.
3. Полушкин, В.И. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Ч.1. Теоретические основы создания микроклимата здания [Текст] / В.И. Полушкин, О.Н. Русак, С.И. Бурцев и др. – Санкт-Петербург: Профессия, 2002. – 160 с.
4. Кейс, В.И. Компактные теплообменники [Текст] / В.И. Кейс, А.Л. Лондон. – М.: Энергия, 1967. – 222 с.
5. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
6. Аверкин, А.Г. Тепловлажностная обработка воздуха в системах вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.Г. Аверкин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 188 с.
7. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / А.В. Нестеренко. – М.: «Высшая школа», 1971. – 460 с.
8. Сотников, А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Теория, техника и проектирование на рубеже столетий [Текст] / А.Г. Сотников. – Санкт-Петербург: «АТ-PUBLICHING», 2005. – 504 с.

А.И. Еремкин

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»
Тел.: +7 (8412) 92-94-10
E-mail: eremkin@pguas.ru

А.Г. Аверкин

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
Тел.: +7 927 371 01 32
E-mail: algraw@mail.ru

A. EREMKIN, A. AVERKIN

CALCULATON TECHNIQUE IMPROVEMENT CONTACTORS FOR STEAM CURING AIR

A modified method of determining the surface area of heat and mass transfer in the contactor in the humidification mode cooling, dehumidification water and air drying solid sorbent based on the

number of transfer units. Number of transfer units is determined by graphical integration using I-d Diagram for moist air as to assess the thermal and mass transfer processes.

Keywords: *methods of calculation, contact apparatus, the surface heat and mass transfer, the number of transfer units, the method of graphical integration, silica gel.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kokorin, O.Ja. Otechestvennoe oborudovanie dlja sozdanija sistem ventiljicii i kondicionirovanija vozduha [Tekst]: Katalog / O.Ja. Kokorin, A.M. Deripasov. – M.: IKF «Katalog», 2002. – 91 s.
2. Stefanov, E.V. Ventiljacija i kondicionirovanie vozduha [Tekst] / E.V. Stefanov. – Sankt-Peterburg: «AVOK-Severo-Zapad», 2005. – 400 s.
3. Polushkin, V.I. Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie vozduha. Ch.1. Teoreticheskie osnovy sozdanija mikroklimata zdanija [Tekst] / V.I. Polushkin, O.N. Rusak, S.I. Burcev i dr. – Sankt-Peterburg: Profes-sija, 2002. – 160 s.
4. Kejs, V.I. Kompaktnye teploobmenniki [Tekst] / V.I. Kejs, A.L. London. – M.: Jenergija, 1967. – 222 s.
5. Kasatkin, A.G. Osnovnye processy i apparaty himicheskoj tehnologii [Tekst] / A.G. Kasatkin. – M.: OOO TID «Al'jans», 2004. – 753 s.
6. Averkin, A.G. Teplovlazhnostnaja obrabotka vozduha v sistemah ventiljicii i kondicionirovanija [Tekst] / A.G. Averkin. – Penza: PGUAS, 2011. – 188 s.
7. Nesterenko, A.V. Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventiljicii i kondicionirovanija vozduha [Tekst] / A.V. Nesterenko. – M.: «Vysshaja shkola», 1971. – 460 s.
8. Sotnikov, A.G. Processy, apparaty i sistemy kondicionirovanija vozduha i ventiljicii. Teorija, tehnika i proektirovanie na rubezhe stoletij [Tekst] / A.G. Sotnikov. – Sankt-Peterburg: «AT-PUBLICHING», 2005. – 504 s.

A. Eremkin

Penza state university of architecture and construction, Penza
Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Heat and ventilation»
Ph.: +7 (8412) 92-94-10
E-mail: eremkin@pguas.ru

A. Averkin

Penza state university of architecture and construction, Penza
Doctor of technical sciences, professor of the department «Heat and ventilation»
Ph.: +7 927 371 01 32
E-mail: algraw@mail.ru

КАЛЬГИН А.А.

СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Определены основные принципы проектирования систем управления процессом производства. Показана универсальная схема проектирования сложных систем по принципу самодостаточности структуры и полноты функциональных внутренних связей между отдельными ее элементами. Разработана обобщенная схема взаимодействия для широкого класса кибернетических систем. Таким образом, функциональная иерархия выступает в качестве известного рабочего алгоритма проектирования систем автоматического управления.

Ключевые слова: проектирования систем управления, алгоритм автоматического управления, функциональная иерархия.

Использование микропроцессорных и микроэлектронных средств позволяет реализовать некоторые общие идеи проектирования систем управления.

До определенного времени системы управления обслуживали, как правило, функционально обособленные технические устройства или их составные части и проектировались как одно целое с ними, образуя локальные подсистемы. Современные тенденции отражают структурное и функциональное усложнение самих средств автоматизации, которые могут решать разнородные задачи, относящиеся к различным уровням структурной иерархии управляемой системы со своими особенностями технологической взаимосвязи и соподчиненности локальных подсистем, способами достижения целевых функций.

При разработке систем управления сложными объектами необходимо опираться на некоторые общие принципы проектирования, используя единый методологический аппарат, обосновывающий этапы, научные и инженерные орудия проектирования.

Для достижения поставленной цели каждая система должна быть определенным образом организована, т.е. обладать присущими только ей структурой и способом функционирования. Последнее означает заданную, предписанную систему взаимосвязей между элементами.

Так, системы автоматического регулирования обладают структурой, включающей в себя обязательный минимально необходимый набор определенным образом действующих функциональных элементов (датчик, объект управления, элемент сравнения, исполнительный механизм и регулирующий орган), которые обеспечивают реализацию процесса управления с заданными качественными характеристиками.

«Большие» системы – детище комплексной автоматизации и развития электронных вычислительных машин, отличаются от прежних «малых» технических систем не только количественно – обилием частей и органов, но и качественно – иным более высоким уровнем организации, иными более сложными функциональными взаимосвязями этих частей и органов. Разнообразие оборудования и сложность функций, таких систем, требуют особого подхода при формировании их структуры и отыскания функциональных связей между отдельными элементами. Необходимо учитывать уровень сложности структурного представления системы, при котором, с одной стороны, не теряются специфические черты, свойственные именно данному уровню, а с другой стороны, появляется возможность сформулировать общие принципы проектирования с единым методологическим аппаратом.

На рисунке 2 дана универсальная схема проектирования сложных систем по принципу самодостаточности структуры и полноты функциональных внутренних связей между отдельными ее элементами.

Механизм образования многоуровневой системы управления опирается на такие исходные понятия как глобальный критерий управления, объект, управляющая система. Выяв-

ляется состав такой системы в виде определенным образом взаимосвязанных обобщенных функциональных элементов высшего уровня представления. Принцип выделения элементов в первую очередь исходит из учета влияния объекта на формирование системы управления.

Несмотря на разнообразие реальных форм взаимосвязи объекта и системы управления, можно указать на обобщенную схему такого взаимодействия для широкого класса кибернетических систем (рис. 2). Характер связей и количество структурных элементов системы определяются единственным образом, исчерпывают собой отношения объекта и системы управления, представляя полный набор, необходимый для ее функционирования.

Разбиение системы управления на функциональные элементы производится по принципу последовательного зависимого порождения, когда на очередном шаге синтеза выделяются только элементы, связанные с уже выделенными на предыдущем шаге.

Так как параметры объекта и среды оказывают непосредственное влияние на выбор критериев и, в первую очередь, глобального, который служит связующим звеном с системой управления более высокого уровня, то он и будет первым выделенным элементом.

Глобальный критерий является функцией переменных управления и ограничений, фиксирование которых как параметров определяет состав обобщенных функций управления (ОФУ) качеством, производительностью и пр. Эти функции управления самого высокого ранга. Реализация обобщенных функций производится на основе критериев, в качестве которых выступают значения параметров, фиксированных на предыдущем этапе декомпозиции системы управления. Дальнейшая декомпозиция приводит к формированию многоуровневой иерархии чередующихся на смежных уровнях локальных критериев и функций управления.

Система локальных функций и критериев порождает систему информации, которая необходима для их реализации.

Формирование структуры и выбор типов технических средств определяются особенностями системы информации и перечнем функций управления, подлежащих автоматизации. Она включает в себя группу средств контроля, анализа текущих значений параметров, исполнительных устройств, устройств запоминания, хранения подготовки, переработки, передачи, выдачи и представления информации.

Структура аппарата управления определяется особенностями объекта, но не непосредственно, а через функции, информацию и технические средства.

Приведенное разложение системы управления на отдельные элементы, придерживается такой последовательности, при которой каждый вновь образуемый элемент является результатом возникновения предыдущих. Тонкими стрелками на рисунке 2 показана последовательность выделения отдельных элементов и их взаимовлияние. При этом элемент считается выделенным на очередном этапе синтеза, если на него указывают сразу все стрелки элементов, выделенных на предыдущем этапе.

Синтезированная структура позволяет проследить последовательность прохождения управляющих сигналов через элементы системы в процессе ее функционирования (толстые линии на рис. 2).

Для каждого из выделенных элементов системы могут быть сформулированы общие требования к принципам внутренней структуризации, особенностям функционирования и связям типа вход-выход. При этом требования носят не локальный, а системный характер, учитывая в первую очередь характер межэлементных связей.

Ставится ограниченная задача создания системы многоуровневого автоматического управления технологическими процессами непрерывного действия. Поэтому основной интерес при ее разработке представляют не все функциональные элементы структуры (рис. 2).

Сжатие структуры при учете только выделенных свойств, связанных с реализацией систем автоматического управления (САУ), может быть произведено за счет исключения из рассмотрения блока аппарата управления (см. рис. 2).

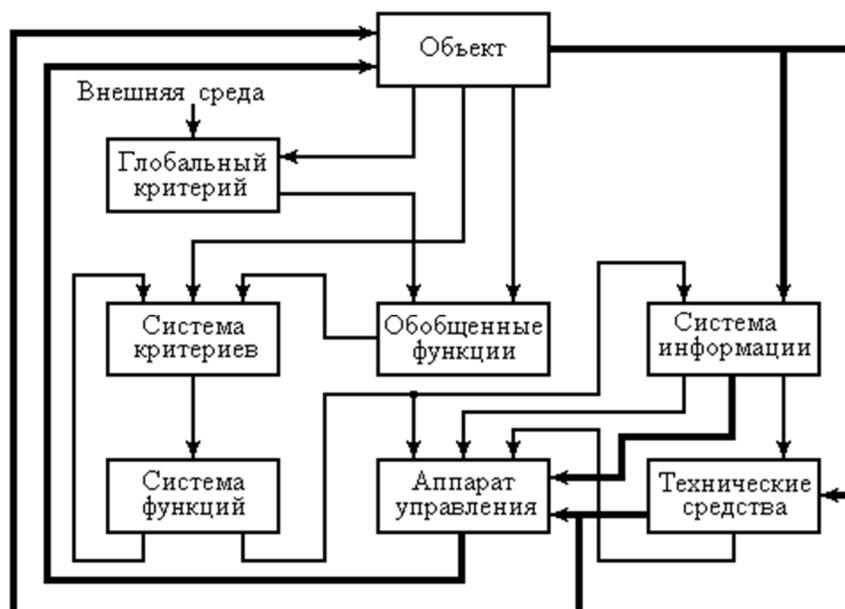


Рисунок 2 – Обобщенная схема взаимодействия информационно – управляющей системы

Такой стратифицированный подход позволяет учитывать на каждом уровне представления системы ряд характерных особенностей и переменных, законов и принципов, с помощью которых и описывается поведение системы. Важнейшим, является понятие многоуровневой иерархической структуры, которое позволяет конкретизировать класс систем со специфическими свойствами. Можно указать несколько существенных характеристик, свойственных только иерархическим системам. К ним относятся последовательное вертикальное расположение подсистем, составляющих данную систему (вертикальная декомпозиция); приоритет действий, или право вмешательства подсистем верхнего уровня; зависимость действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций. Следует обратить внимание на существенные структурные различия между традиционно рассматриваемыми в теории управления динамическими моделями «вход – выход» и многоуровневыми системами.

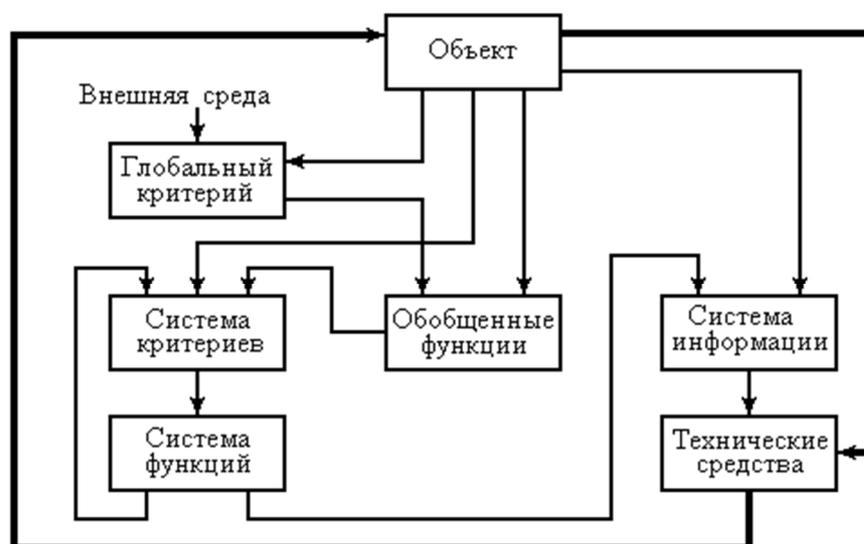


Рисунок 2 – Обобщенная схема взаимодействия элементов САУ

Это различие сохраняется даже, если в одноуровневой системе ввести взаимные связи и представить ее как многопараметрическую с корректирующими связями. Специфичность свойств многоуровневых систем определяет и специфичность подходов к их проектированию и алгоритму функционирования, которые должны опираться на ряд положений системного

характера. Систему надо проектировать как целое, а не начинать с процесса и затем просто добавлять необходимые управления. Наиболее современный подход состоит в том, что при проектировании технологии учитывается и наличие управляющих подсистем.

Общесистемный подход не делает в этом смысле никаких различий.

Из всего разнообразия структурных понятий, относящихся к многоуровневым системам, остановимся на наиболее существенных, таких как: функциональная иерархия, закон необходимого разнообразия, непрерывный ряд моделей [1, 2].

Понятие функциональной иерархии или функциональной многослойной иерархии принятия решений, представляет собой концептуальную схему выявления существенных функций в сложной системе принятия решений. Однако это не только отправной момент для рационализации проблемы выбора функций различных уровней. Такой подход оказывается плодотворным и при выборе методов автоматизации конкретных технологий.

Функциональную иерархию можно представить тремя взаимосвязанными иерархически соподчиненными интеллектуальными уровнями: выбора, обучения и самоорганизации, каждый из которых очерчивает свои границы интеллектуального пространства научных подходов при решении задач управления технологическими объектами. Дается как бы интеллектуальный алгоритм достижения поставленной цели.

Уровень выбора предполагает при проектировании систем автоматического управления определение такого способа действия Y при заданных выходных функциях объекта X и функции оценки J , который бы позволил получать результат G , удовлетворяющий выбранной функции оценки в условиях неопределенностей F , отражающих незнание зависимости между способом действия и его результатом. То есть для множества альтернативных действий X возможных результатов на выходе Y , в условиях воздействия множества неопределенностей F , необходимо оценить с помощью функции J множество величин F , которые могут быть связаны с характеристиками качества работы системы.

Множество неопределенностей отражает в себе как структурные особенности организации технологического процесса, конструктивные особенности технических средств, так и изменения физикомеханических характеристик материальных потоков.

Если множество F состоит из единственного элемента или является пустым, т.е. относительно результата на выходе для данного действия y нет неопределенности, выбор может основываться на оптимизации: найти такое y в Y , чтобы величина $f = J(y, x(y))$ была меньше, чем $f = J(y, x(y))$ для любого другого действия $y \in Y$.

Решение задачи на уровне обучения предполагает конкретизацию и по возможности сужение множества неопределенностей F , с которым имеет дело слой выбора, и приближение результата X к заданному значению функции оценки J . Если система и окружающая среда стационарны, то множество неопределенностей может быть предельно сужено, что соответствует идеальному обучению.

Таким образом, цель второго уровня насколько возможно сузить множество неопределенностей и упростить тем самым решение задачи на уровне выбора.

Дальнейшее улучшение качественных параметров системы может быть достигнуто на уровне самоорганизации изменением стратегии обучения на втором уровне.

Таким образом, функциональная иерархия выступает в качестве известного рабочего алгоритма проектирования систем автоматического управления. Однако, это чисто внешнее сходство. Функциональная иерархия представляет собой универсальное понятие и может быть применено при проектировании не только локальных подсистем управления, но и систем более высокого уровня организации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месерович, М. Теория иерархических многоуровневых систем [Текст] / М. Месерович, Д. Макол. – М.: Мир, 1973.

2. Михайлович, В.С. Методы последовательной оптимизации [Текст] / В.С. Михайлович, К.И. Кукса. – М.: Наука, 1983.

А.А. Кальгин

ОАО «Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова», г. Москва

Доктор технических наук, профессор

Тел.: +7 (495) 490 36 05

E-mail: Alexander.kalgin@mail.ru

A. KALGIN

**SYSTEMATIC DESIGN HIERARCHICAL CONTROL
SYSTEMS PROCESS OF PRODUCTION
OF CONCRETE MIXES**

The basic principles of design using hierarchical control systems. Shows the universal scheme design of complex systems on the principle of self-sufficiency and completeness of the functional structure of the internal connections between the individual elements. The generalized scheme of interaction for a wide class of cybernetic systems. Thus functional hierarchy acts as a known working algorithm design of automatic control systems.

Keywords: *design of control systems; algorithm for automatic control, functional hierarchy.*

BIBLIOGRAPHY

1. Meserovich, M. Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnyh sistem [Tekst] / M. Meserovich, D. Makol. – М.: Mir, 1973.
2. Mihajlovich, V.S. Metody posledovatel'noj optimizacii [Tekst] / V.S. Mihajlovich, K.I. Kuksa. – М.: Nauka, 1983.

A. Kalgin

Academy of municipal economy behalf of K.D. Pamfilova, Moscow

Doctor of technical sciences, professor

Ph.: +7 (495) 490 36 05

E-mail: Alexander.kalgin@mail.ru

КУПРИЯНОВ В.Н.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ СТЕН С ОГРАНИЧЕНИЕМ КОНДЕНСАЦИИ В НИХ ПАРООБРАЗНОЙ ВЛАГИ

Исследованы закономерности конденсации парообразной влаги в наружных стенах. Показано, что в каждом конструктивном решении конденсация влаги начинается при «своем» значении температуры наружного воздуха. Введено понятие «температура начала конденсации», которая зависит от конструкции стены и свойств материалов функциональных слоев. Представленные в работе принципы проектирования предполагают их использование в процессе проектирования наружных стен без дополнительных экспериментов. Выполнение принципов проектирования позволит ограничить, а для некоторых климатических районов полностью исключить конденсацию водяного пара в наружных стенах.

Ключевые слова: конструкция стены, свойства материалов конденсация, температура, влажность воздуха, упругость водяного пара.

В действующих нормативных документах по проектированию теплозащиты наружных стен основное внимание уделено оценке расчетных сопротивлений теплопередаче на стадии выполнения проекта (требуемое $R_{ТО}^{TP}$, нормируемое $R_{ТО}^{НОРМ}$ приведенное $R_{ТО}^{ПП}$). Изменению сопротивления теплопередаче наружных стен при эксплуатации за счет конденсации в них водяного пара уделено недостаточное внимание. В нормах отсутствуют рекомендации о правилах проектирования наружных стен, которые позволили бы снижать объемы конденсата и, следовательно, негативное воздействие влаги как на снижение теплозащиты, так и на коррозионные процессы.

Традиционно вероятность конденсации парообразной влаги в ограждениях определяется по методу Фокина – Власова путем построения распределений E_i и e_i по сечению ограждения при одном значении температуры наружного воздуха t_n . Величина t_n в этих расчетах принимается с тем или иным обоснованием, и вывод о наличии или отсутствии конденсации зависит от степени обоснованности при выборе t_n . В работе [1] было показано, что величина t_n при расчетах по методу Фокина – Власова у разных авторов может различаться на десятки градусов, следовательно, вывод о наличии или отсутствии конденсации будет диаметрально противоположный.

В нашей работе [2] было предложено развитие метода Фокина – Власова с учетом физических процессов переноса тепла и влаги через ограждение, которые определяются свойствами материалов.

В эксплуатационных условиях в наружных стенах протекают два основных физических процесса: теплопередача и диффузия парообразной влаги (паропроницание). Сопротивление теплопередаче слоев ограждения (R_{Ti}) определяет распределение температуры по сечению ограждения (τ_i), которая в свою очередь позволяет оценить распределение максимальной упругости водяного пара (E_i) по тем же сечениям. Сопротивление паропроницанию слоев ограждения (R_{Pi}) определяет распределение действительной упругости водяного пара (e_i) по сечению ограждения. Конденсация водяного пара возникает в тех сечениях ограждения, в которых E_i будет равно e_i , то есть относительная влажность воздуха в порах материала (φ_i) будет равна 100%. Распределение E_i и e_i по сечению наружной стены будет изменяться при изменении температуры наружного воздуха t_n . Суть предложенного метода заключается в построении не единичных распределений E_i и e_i по сечению ограждения при одном значении t_n , а построения зависимости разности ($E_i - e_i$) в широком диапазоне эксплуатационных температур t_n по характерным сечениям наружной стены.

Результаты расчета представляются в табличной форме или графически в виде веера зависимостей ($E_i - e_i$) от t_n по заданным сечениям наружной стены.

В качестве примера на рисунке 1 приведены зависимости разности ($E_i - e_i$) от t_n по характерным сечениям конструкции стены состоящей из: 1) внутренней штукатурки 15 мм,

2) кладки из силикатного кирпича 380 мм, 3) утеплителя *Rockwool* 100 мм, 4) эффективного керамического кирпича 120 мм.

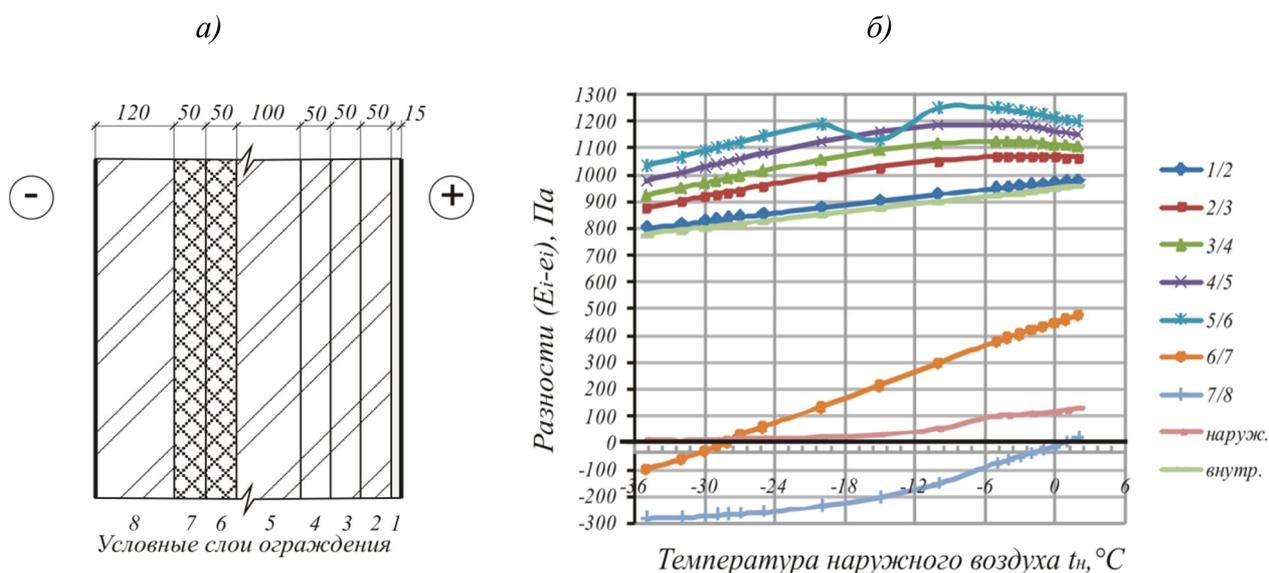


Рисунок 1 – Конструкция наружной стены (а) и зависимости разности $(E_i - e_i)$ по различным сечениям от температуры наружного воздуха (б)

Из рисунке 1 видно, что если разность $(E_i - e_i) > 0$, то в этих сечениях при этих значениях t_n конденсация влаги отсутствует, то – есть влажность воздуха в порах материала $\varphi_i < 100\%$, а если разность $(E_i - e_i) \leq 0$, то в этих сечениях при этих значениях t_n идет процесс конденсации парообразной влаги, так как $\varphi = 100\%$.

Конденсация начинается в сечении ближайшем к наружной поверхности, как правило, на границе утеплителя и наружного облицовочного слоя в виде плоскости конденсации. При дальнейшем понижении t_n конденсация продолжается в толще утеплителя распространяясь на другие сечения в сторону внутренней поверхности стены, т.е. образуется зона конденсации.

Максимальную температуру наружного воздуха, при которой начинается конденсация парообразной влаги в сечении ближайшем к наружной поверхности, предлагается назвать **температурой начала конденсации** $t_{нк}$ конкретной конструкции наружной стены, и определить её как основную теплофизическую характеристику ограждения, наряду с известными характеристиками $R_{то}$ и $R_{по}$.

Для обоснования включения величины $t_{нк}$ в число основных теплофизических параметров наружных стен проведем совместный анализ годового хода температур наружного воздуха и величины $t_{нк}$ конкретного ограждения рисунке 2.

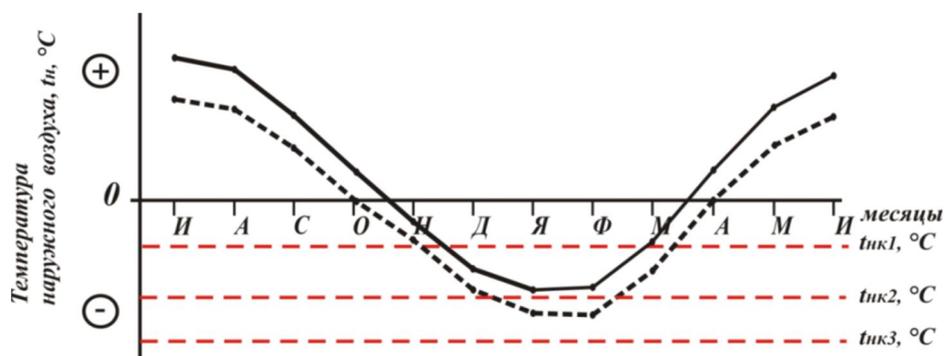


Рисунок 2 – Сопоставление температуры начала конденсации $t_{нк}$ с годовым ходом температуры наружного воздуха t_n

Можно видеть, что при значении $t_{нк1}$ календарная продолжительность конденсации, т.е. постоянное увлажнение, составит несколько месяцев. За этот период в ограждении накопится определенное количество конденсированной влаги. При $t_{нк2}$ конденсат будет образовываться только в ночное время за счет суточных понижений температуры на меньшем интервале времени, а при $t_{нк3}$ конденсация будет возникать эпизодически на протяжении действия волн холода, т.е. постоянное увлажнение конденсированной влагой будет исключено. При $t_{нк2}$ и $t_{нк3}$ количество конденсата будет небольшим и его влияние на теплозащитные свойства ограждений будет, также, незначительным.

Таким образом, снижение величины температуры начала конденсации ($t_{нк}$) является основной задачей при конструировании наружных стен.

В работах [2,3] исследованы закономерности конденсации водяного пара в 15-и основных конструктивных типах наружных стен: однослойных, двухслойных без наружных облицовочных слоев (моделирование вентфасадов), двухслойных с тонким слоем наружной штукатурки (так называемый «мокрый фасад») и многослойных. Получено, что величина $t_{нк}$ в зависимости от конструктивного решения изменяется от $+2,5^{\circ}\text{C}$ до -16°C , а для двухслойной конструкции без облицовочного слоя конденсация не наступает до температуры $t_{н} = -40^{\circ}\text{C}$. Из этого следует, что каждое конструктивное решение наружной стены имеет собственное значение температуры начала конденсации $t_{нк}$.

Таким образом, формируя конструкцию наружной стены и подбирая материалы с определенными свойствами, можно снижать величину $t_{нк}$, а следовательно сокращать календарную продолжительность конденсации, объем конденсата и негативное воздействие конденсированной влаги.

На основании вышеизложенного можно сформулировать основные принципы конструирования наружных стен с ограничением конденсации в них парообразной влаги.

Первый принцип касается взаимного расположения материальных слоев с целью исключения торможения парообразной влаги при её прохождении от внутренней поверхности стены до наружной. Фокин К.Ф. рекомендовал слои с высоким сопротивлением паропрооницанию располагать у внутренней поверхности стены, а с низким – у наружной. Более подробно этот принцип сформулировал Роджерс Т.С., который оперирует понятием «паропрооницаемость слоя» – G_i . Паропрооницаемость слоя является величиной обратной сопротивлению паропрооницаемости слоя $G_i = 1/R_{пi}$ мг/($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$) и характеризует не количество влаги проходящей через данный слой в эксплуатации, а «пропускную способность слоя».

Расположение материальных слоев в порядке возрастания их паропрооницаемости от внутренней поверхности стены до наружной обеспечит беспрепятственное прохождение водяного пара через наружную стену:

$$G_{вн} < G_1 < G_2 < \dots < G_{н}. \quad (1)$$

К сожалению, не у Фокина К.Ф. не у Роджера Т.С. сопротивление паропрооницанию слоев не рассматривается совместно с сопротивлением теплопередаче этих же слоев.

Второй принцип касается подбора соотношения между сопротивлениями теплопередаче ($R_{тi}$) и паропрооницанию ($R_{пi}$) материальных слоев ограждения. Как было показано в начале статьи параметры $R_{тi}$ и $R_{пi}$ «с разных сторон» формируют распределение E_i и e_i по сечению наружной стены, поэтому совместное рассмотрение и регулирование соотношений между $R_{тi}$ и $R_{пi}$ на стадии **проектирования** стены позволит изменять для этой конструкции величину $t_{нк}$.

Поскольку каждый материальный слой стены имеет оба параметра соотношения между $R_{тi}$ и $R_{пi}$ по сечению ограждения будем рассматривать на графике, на котором одна ось представляет собой сопротивление теплопередаче, а другая – сопротивление паропрооницанию в относительных единицах, когда $R_{то}$ и $R_{по}$ всего ограждения принимаются за единицу.

В качестве примера на рисунке 3 представлены траектории соотношений между $R_{тi}$ и $R_{пi}$ для однослойной (рис. 3, а) и многослойной (рис. 3, б) конструкции наружной стены. На данном рисунке внутренняя поверхность обозначена т. О, а наружная – т. А. По оси T виден

относительный вклад материальных слоев в сопротивление теплопередаче стены, а по оси Π – в сопротивление паропроницанию.

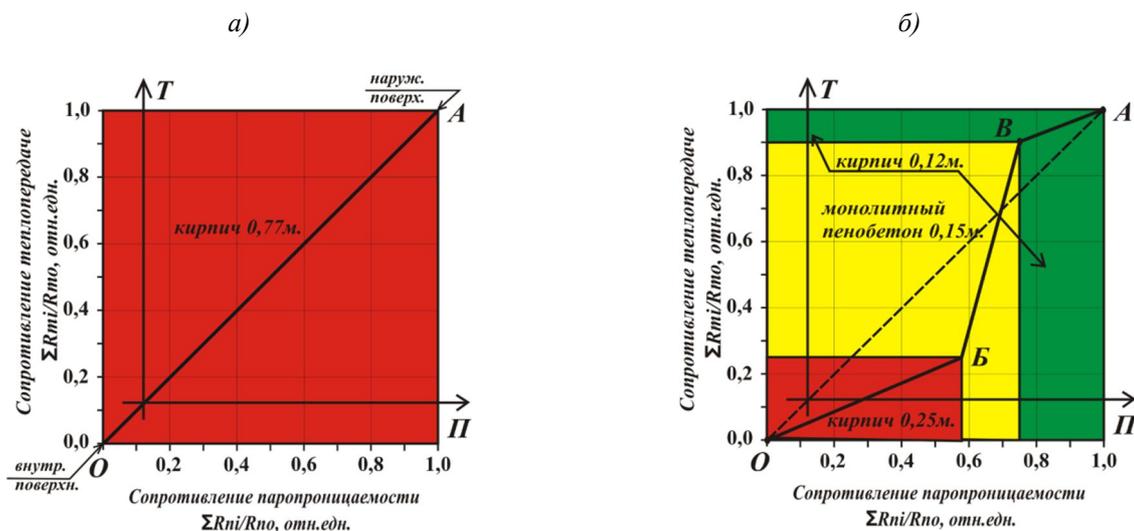


Рисунок 3 – Графики соотношений между сопротивлениями теплопередаче и сопротивлениями паропроницанию: а – в однослойной кирпичной конструкции; б – в трехслойном ограждении

Однослойная конструкции имеет одинаковую пористость по всему сечению стены, поэтому траектория соотношений на графике предоставляет собой диагональ, которая указывает на равномерное увеличение сопротивления теплопередаче и сопротивления паропроницанию по сечению стены. В многослойной конструкции каждый слой имеет собственную пористость, поэтому траектория соотношений представляет собой ломаную линию с изломами на границах слоев, что указывает на неравномерность нарастания по сечению стены сопротивлений теплопередаче паропроницанию. Расположение траектории зависит от количества материальных слоев, их взаимного расположения и свойств использованных материалов.

По расположению траектории соотношений между $R_{тi}$ и $R_{пi}$ можно ориентировочно оценить величину температуры начала конденсации $t_{нк}$. Так, в работе [4] на основе анализа модельных конструкций стен со специально заданными траекториями соотношений $R_{тi}$ и $R_{пi}$ получено:

- если траектория соотношений расположена ниже диагонали пропорциональности, что указывает на опережающее нарастание доли $R_{пi}$ по отношению к нарастанию доли $R_{тi}$ от внутренней поверхности стены до наружной, то конденсация влаги происходит в диапазоне низких температур наружного воздуха (от -14 до -35°C);

- если траектория соотношений расположена выше диагонали пропорциональности, что указывает на опережающее нарастание доли $R_{тi}$ по отношению к нарастанию доли $R_{пi}$ от внутренней поверхности стены до наружной, то конденсация влаги происходит при температурах выше -12°C , и может достигать положительных значений температур наружного воздуха.

Определяющее значение для оценки $t_{нк}$ имеют свойства наружного облицовочного слоя, а именно его сопротивление паропроницанию. В соответствии с неравенством (1) (первый принцип конструирования) наружный облицовочный слой должен иметь наибольшую пористость. С точки зрения долговечности наружный облицовочный слой должен быть плотным, прочным и атмосферостойким, то есть возникает определенное противоречие между обеспечением паропроницания стены и её атмосферостойкостью. Решение данного противоречия успешно разрешается в двухслойных конструкциях с воздушной прослойкой перед наружным облицовочным слоем (так называемый вентфасад), когда водяные пары выходят из стены в воздушную прослойку и удаляются из нее через неплотности в облицовке, выполненной из

плитных материалов, либо удаляются гравитационным потоком воздуха через приточные и выходные отверстия в прослойке.

В конструкциях наружных стен без воздушной прослойки (с облицовкой из тонкой штукатурки или кирпича) регулирование величины $t_{нк}$ может быть обеспечено подбором соотношений между $R_{пi}$ и $R_{тi}$ части наружной стены от внутренней поверхности до облицовочного слоя, то есть до наиболее вероятной плоскости конденсации. По рисунку 3, б – это расположение точки «В» на траектории соотношений. Расположение этой точки может быть определено при конструировании стены на основе подбора теплофизических свойств материальных слоев. Если точка «В» окажется выше диагонали пропорциональности, то величина $t_{нк}$ будет выше -12°C , если ниже – то величина $t_{нк}$ будет ниже -14°C . Наши исследования показали, что расположение точки «В» и, следовательно, величины $t_{нк}$ зависит от величины паропроницаемости наружного облицовочного слоя.

В таблице 1 приведены результаты этих исследований двух конструкций наружных стен с облицовочными слоями из штукатурки *Seresit* СТ -190 (толщиной 2,0; 4,4; 10,4 мм) и эффективного керамического кирпича (толщиной 120 и 250 мм), Конструкция основной стены выполнена из внутренней штукатурки -15 мм, силикатного кирпича (ограждение «Л» – 250 мм, а ограждение «С» – 640 мм) и утеплителя *Rockwool* – 100 мм.

Таблица 1 – Влияние сопротивления паропроницанию облицовочных слоев на температуру начала конденсации паробразной влаги в ограждениях

Облицовочный слой			Ограждение «Л»			Ограждение «С»		
Материал	Толщина, мм	$R_{п}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг	$t_{нк}$, $^{\circ}\text{C}$	$R_{по}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг	$R_{то}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{C}$)/Вт	$t_{нк}$, $^{\circ}\text{C}$	$R_{по}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг	$R_{то}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{C}$)/Вт
Нет	0,0	0,0	-35,0	2,822	2,810	-40,0	6,542	4,512
<i>Ceresit</i> СТ-190	2,0	С-0,082	-31,0*	2,838	2,820	-22,0	6,624	4,529
	0,45	Л-0,016						
	4,4	0,225	-7,0	3,049	2,847	-13,0	6,767	4,549
	10,4	0,517	0,5	3,339	2,897	-7,0	7,059	4,599
Кирпич	120	0,857	1,0	3,679	3,019	-6,5	7,399	4,722
	250	1,786	2,5	4,610	3,230	-2,0	8,328	4,932

* Для ограждения «Л» с облицовочным слоем из ветровлагозащитной мембраны Изоспан-А с $R_{по} = 0,016$ ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг

Из таблицы 1 видно, что с ростом сопротивления паропроницанию лицевого слоя температура начала конденсации $t_{нк}$ повышается. В конструкциях без лицевого слоя (верхняя строчка таблицы) конденсация влаги не наступает до температур -35°C (ограждение «Л») и -40°C (ограждение «С»). Расположение точки «В» на траектории соотношений $R_{тi}$ и $R_{пi}$ (см. рис. 3, б) является своеобразным индикатором величины температуры начала конденсации $t_{нк}$. Если это расположение описать как отношение сопротивления паропроницанию стены от внутренней поверхности до точки «В» в относительных единицах $R_{пi}/R_{по}$ к сопротивлению теплопередаче той же части стены в относительных единицах $R_{тi}/R_{то}$, то получим обобщенный конструктивный параметр данной конструкции стены $k_{об}$:

$$k_{об} = \frac{R_{пi} / R_{по}}{R_{тi} / R_{то}} \quad (2)$$

Анализ конструктивных особенностей пятнадцати исследованных конструкций наружных стен и их температур начала конденсации $t_{нк}$ позволил получить зависимость величины $t_{нк}$ от обобщенного конструктивного параметра, рисунке 4 и математическое выражение этой зависимости: $t_{нк} = -221,94k_{об}^2 + 320,19k_{об} - 112,45$.

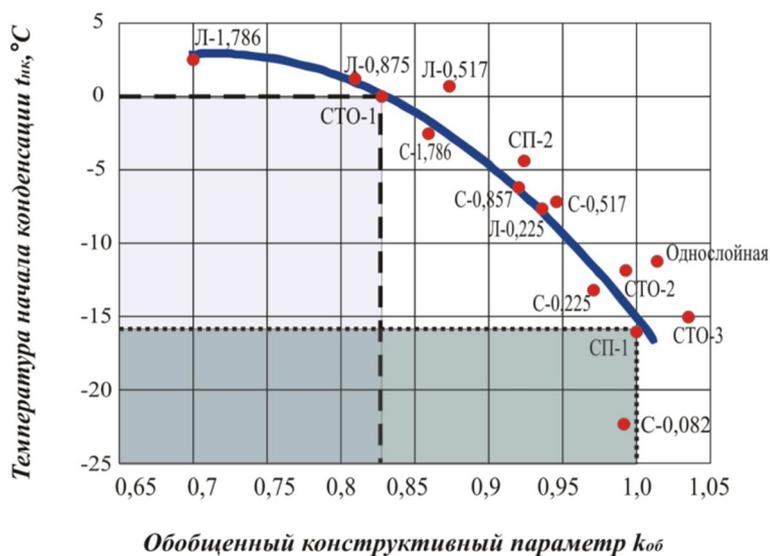


Рисунок 4 – Зависимость величины $t_{нк}$ от обобщенного конструктивного параметра $k_{об}$

Третий принцип касается ограничения потока водяного пара через ограждающую конструкцию. Уменьшение потока водяного пара, даже при неблагоприятном конструктивном решении наружной стены, снизит количество конденсата и, следовательно, негативное воздействие влаги на эксплуатационные свойства наружных стен.

Количество водяного пара, проходящего через ограждающую конструкцию (G), по известной формуле определяется отношением разности парциальных давлений водяного пара во внутреннем (e_v) и наружном (e_n) воздухе к сопротивлению паропрооницанию ограждающей конструкции ($R_{по}$):

$$G = \frac{e_v - e_n}{R_{по}}, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что увеличение сопротивления паропрооницанию $R_{по}$ снижает количество парообразной влаги, проходящего через ограждение, однако в нормативной литературе по теплозащите зданий этому параметру уделено недостаточное внимание. Более того, в своде правил 2004 года [6] в п. 13.8 предписано, что сопротивления паропрооницанию «должны приниматься не более $5 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$ ».

Анализ конструкций наружных стен использованных в современных зданиях показал, что величина $R_{по}$ находится в диапазоне значений от 3 до $20 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

Например, использование этих конструкций в климате Казани, где в зимний период разность ($e_v - e_n$) составляет около 1000 Па получим следующие значения потока водяного пара через наружную стену:

$$G_3 = 1000/3 = 333 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$$

$$G_{20} = 1000/20 = 50 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Можно видеть, что величина сопротивления паропрооницанию ограждающей конструкции в значительной степени определяет поток водяного пара, проходящего через ограждение.

Наши исследования показали, что увеличение величины $R_{по}$ приводит не только к уменьшению общего потока водяного пара, количества конденсата, но и понижает температуру начала конденсации ($t_{нк}$) данной конструкции стены. В подтверждение высказанного тезиса обратимся к таблице 1, из которой видно, что увеличение $R_{по}$ в два раза (от 2,822 ограждение «Л» до 6,542 ограждение «С») величина $t_{нк}$ понижается на 4-6°C.

Дальнейшее увеличением $R_{по}$ может понизить величину $t_{нк}$ на 10-15°C. В подтверждение этого проведем анализ двух аналогичных трехслойных конструкций наружных стен с наружным облицовочным слоем из кирпича:

- конструкция СТО, $R_{то} = 2,4 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$, $R_{по} = 3,41 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг}$, (описана в примере 2, приложение 6 нормативного документа [5]);

- конструкция СП, $R_{то} = 3,64 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$, $R_{по} = 21,15 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг}$, (описана в приложении Э Свода правил [6]).

Конструкции не значительно различаются по величинам $R_{то}$, но в шесть раз по $R_{по}$. По методике [2], описанной в начале данной статьи были определены значения $t_{нк}$ данных конструкций и получено:

- в конструкции СТО, $t_{нк} = 0^\circ\text{C}$;

- в конструкции СП, $t_{нк} = -16^\circ\text{C}$.

Понижение величины $t_{нк}$, в соответствии с рисунком 2, сокращает календарную продолжительность увлажнения и, следовательно количество конденсата и негативное воздействие влаги на эксплуатационные свойства наружных стен.

В заключение следует отметить, что описанные принципы проектирования предполагают их использование в процессе проектирования наружных стен расчетными методами без дополнительных экспериментов. Выполнение принципов проектирования позволит ограничить, а для некоторых климатических районов полностью исключить конденсацию водяного пара в наружных стенах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприянов, В.Н. К вопросу о паропроницаемости ограждающих конструкций [Текст] / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, А.Г. Хабибуллина // Журнал РААСН АСАСЕМІА. Строительство и архитектура. – 2009. – №5. – С. 504-507.

2. Куприянов, В.Н. К определению температуры начала конденсации парообразной влаги в наружных стенах [Текст] / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // Вестник ВРО РААСН. – Н.Новгород, 2014, вып. 17. – С. 275-282.

3. Куприянов, В.Н. Влияние наружных облицовочных слоев на процессы конденсации, парообразной влаги в ограждающих конструкциях [Текст] / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // Приволжский научный журнал. – Н.Новгород. – 2014. – №1. – С.46-51.

4. Куприянов, В.Н. Влияние конструкции ограждения на конденсацию парообразной влаги [Текст] / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, М.Р. Шамсутдинов // Жилищное строительство. – 2012. – №6. – С. 29-31.

5. Стандарт организации (РОНС) СТО 00044807-001-2006 «Теплозащитные свойства ограждающих конструкций» [Текст]. – М.: РОНС, 2006.

6. Свод правил СП 23-101-2004, Проектирование тепловой защиты зданий [Текст]. – М., 2004.

В.Н. Куприянов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование зданий»

Тел. +7 (843) 526-93-42

E-mail: kupriyanov@kgasu.ru

V. KUPRIYANOV

GENERAL PRINCIPLES FOR DESIGN OF EXTERNAL WALLS WITH LIMITED CONDENSATION OF MOISTURE VAPOR IN THEM

The regularities of condensation of moisture vapor in the external walls are investigated. It is shown that in every constructive solution condensation begins with the «own» outdoor temperature. New term – «the temperature of condensation beginning» is introduced; it depends on the structure of the wall and properties of material of the functional layers. The principles presented in this article suggest using in the design of exterior walls without additional experiments. Implementation of these principles of design allows reducing, and for some climatic regions completely eliminating, the condensation of water vapor in the external walls.

Keywords: *wall structure, material properties, condensation, temperature, air humidity, water vapor pressure.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kuprijanov, V.N. K voprosu o paropronicaemosti ogradhdajushhih konstrukcij [Tekst] / V.N. Kuprijanov, I.Sh. Safin, A.G. Habibullina // Zhurnal RAASN ACADEMIA. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2009. – №5. – S. 504-507.
2. Kuprijanov, V.N. K opredeleniju temperatury nachala kondensacii paroobraznoj vlagi v naruzhnyh stenah [Tekst] / V.N. Kuprijanov, I.Sh. Safin // Vestnik VRO RAASN. – N.Novgorod, 2014, vyp. 17. – S. 275-282.
3. Kuprijanov, V.N. Vlijanie naruzhnyh oblicovochnyh sloev na processy kondensacii, paroobraznoj vlagi v ogradhdajushhih konstrukcijah [Tekst] / V.N. Kuprijanov, I.Sh. Safin // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – N.Novgorod. – 2014. – №1. – S.46-51.
4. Kuprijanov, V.N. Vlijanie konstrukcii ogradhdenija na kondensaciju paroobraznoj vlagi [Tekst] / V.N. Kuprijanov, I.Sh. Safin, M.R. Shamsutdinov // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2012. – №6. – S. 29-31.
5. Standart organizacii (RONS) STO 00044807-001-2006 «Teplozashhitnye svojstva ogradhdajushhih konstrukcij» [Tekst]. – M.: RONS, 2006.
6. Svod pravil SP 23-101-2004, Proektirovanie teplovoj zashhity zdanij [Tekst]. – M., 2004.

V. Kupriyanov

Kazan state university of architecture and engineering, Kazan

Doctor of technical sciences, professor

Ph.: +7 (843) 526-93-42

E-mail: kupriyan@kgasu.ru

МИРОНОВ В.А., КУЛЯЕВ П.В., СУХАРЕВ Ю.В.

ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТНОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ

Данная работа освещает результаты исследования процесса изменения прочностных и деформативных характеристик бетонов с тонкодисперсным известняковым компонентом, модуль деформации, условно-мгновенную, краткосрочную и длительную ползучесть, в сравнении с бетонами без добавок. Из прочностных свойств, анализируются такие, как напряжения при начале трещинообразования и предел кубиковой прочности на сжатие. Сравнение теоретических расчетов с опытными данными выполнено на основе феноменологического подхода к решению подобного рода задач.

Ключевые слова: бетон с известняковым микронаполнителем, деформации ползучести, мера линейной ползучести, кубиковая прочность.

Одной из актуальных задач строительной индустрии является получение строительных композитов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками (бетоны, керамика и др.), что связано с необходимостью разработки новых методов управления (модификации) свойствами материалов на разных уровнях воздействия. В композите присутствует так называемая матрица, состоящая из цементного раствора и различных микродобавок-наполнителей и жесткого скелета из крупного заполнителя.

На рисунке 1 представлены все основные факторы, определяющие свойства строительного материала.

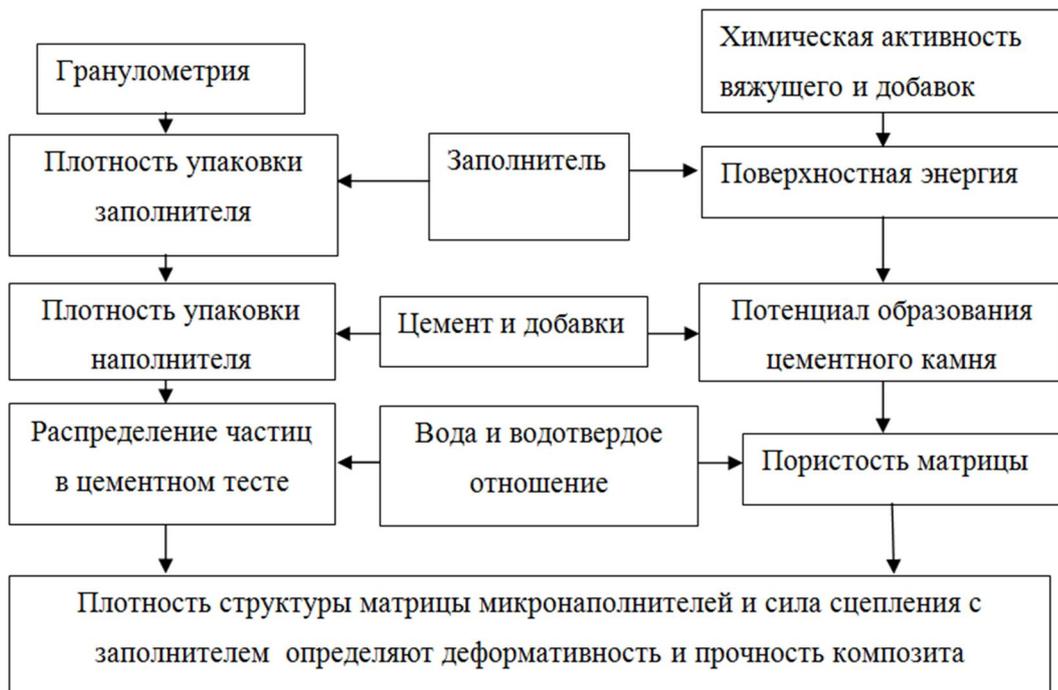


Рисунок 1 – Влияние различных факторов на прочностные и деформативные свойства бетона

Управление свойствами композитов происходит по трем направлениям воздействия: микроуровень, мезо- и макроуровень. Эти уровни отражают все основные процессы изменения деформативных и прочностных характеристик составляющих композита:

1. Заполнитель-наполнитель;
2. Кристаллический каркас цементного камня;
3. Воздушные, капиллярные и гелевые поры.

Все составляющие являются определяющими для оценки как упругих, так и пластических деформаций в структурах материалов. При этом важным является изучение следующих деформаций: условно-мгновенной, кратковременной и длительной ползучести. Вода в твердеющем цементном камне присутствует в порах, внутренних микротрещинах и находится как в свободном, так и в адсорбционно-связанном состоянии. Помимо этого, между частицами всех трех уровней находится водная микропленка, в виде геля, представляющая собой коагуляционную (склеивающую) фазу. Избыток воды и повышенное водоцементное отношение, по данным многих авторов, ведут к повышению упругих деформаций, за счет сдавливания свободной воды в порах, деформирования каркаса (заполнителя-наполнителя). На развитие деформаций ползучести оказывает влияние капиллярное перераспределение воды при контракционном и силовом сдавливании пор, а также перемещение влаги по направлению к поверхности раздела фаз воздух – кристаллы цементного камня.

При оценке деформационных и прочностных характеристик бетона необходимо учитывать степень дисперсности составляющих композит элементов. Так, с повышением удельной поверхности наполнителя и микродобавок повышается число центров кристаллизации в единице объема композита и микроструктур межфазных областей, увеличивается число воздушных и капиллярных микропор. Кроме того, в быстросхватываемом монолите на основе цемента на границах центров кристаллизации возникают множественные концентраторы внутренних напряжений на микроуровне, ведущие к увеличению микротрещин, что также обуславливает рост деформаций и величины как кратковременной, так и длительной прочности или ползучести материала.

Следовательно, задача снижения деформативности бетона и повышения его прочностных свойств сводится к решению как минимум двух проблем:

- первая, замедление процесса схватывания цементного теста (гидратации) во времени за счет более равномерного распределения частиц цемента в объеме композита и замедления доступа свободной воды к фазе, инертной по отношению к основным процессам гидратации;
- вторая, физическое вытеснение воды из воздушных и капиллярных микропор и как следствие, частичный перевод ее в гелевую область.

Для решения этих проблем и с целью обеспечения таких физико-механических свойств, как деформативность, прочность и трещиностойкость, широко применяются такие инертные тонкодисперсные минеральные добавки в составе композитов, как порошки из карбонатных пород (известняк, доломит и др.).

Правильное дозирование, степень дисперсности и технология введения данных добавок делают бетоны с включением минеральных наполнителей менее деформативными, более прочными и стойкими к агрессивным средам.

В работе [1] приведены современные исследования бетонов с такими добавками и влияние разнообразных факторов на его физико-механические свойства. Эти свойства представлены деформациями ползучести и усадки материала. Установлено, что на деформации существенно влияют такие факторы, как водотвердое отношение, максимальный размер и минералогическая природа заполнителя, тонкость помола основного вяжущего, влажность, возраст бетона к моменту приложения и величина нагрузки. Влияние таких параметров, как структура, состав бетона, процентное содержание пластифицирующих и минеральных добавок освещено в работах [2, 3], где также отмечается влияние известнякового тонкодисперсного наполнителя на реологические и технологические свойства бетона.

При эксплуатации бетонных конструкций существенное воздействие на их работу оказывают деформации ползучести, и поэтому важно правильно оценивать роль тонкодисперсного карбонатного компонента в развитии этих деформаций в зависимости от времени. В условиях отсутствия достаточно обоснованной математической модели, изменение физико-

механических свойств оценивается на основе феноменологических подходов, заключающихся в сопоставлении теоретических и экспериментальных данных.

В данной работе определены значения начального модуля упругости бетона при загрузке в возрасте t , E_b ; – предельные величины линейной меры ползучести $C_{cr}(28)_f$ и относительной усадки $\varepsilon_{srф}$. Экспериментально определены деформации в конкретных условиях испытаний, их мгновенные и кратковременные значения при различном времени твердения бетона, с варьированием следующих факторов: при различном отношении известняка к цементу (%), суперпластификатора СП-1 к цементу принято порядка 0,75%, процентное содержание в вяжущей части фракции тонкодисперсного известнякового компонента со степенью дисперсности выше чем у цемента. По результатам экспериментов были установлены следующие характеристики – плотность, кубиковая прочность, деформации ползучести на образцах с размерами граней 7×7×7 см.

В соответствии с формулой (1), значение кубиковой прочности бетона при сжатии $R_b(t)$, с обеспеченностью 0,95 и в нормальных условиях твердения определялось из условия [4]:

$$R_b(t) = \left[1 + \left(\frac{a}{c+B} \right) \left(\frac{t-28}{t+d} \right) \right] \cdot B, \quad (1)$$

где B – класс бетона по прочности на сжатие – В30; a , c , и d – коэффициенты, принимаемые по таблице 1 [4].

Для обычного бетона приняты значения $a = 23$ МПа, $c=55$ МПа, $d=11$ сут., при которых $R_b(t)$ оказалось равным:

$$R_b(t) = \left[1 + \left(\frac{23}{5+30} \right) \left(\frac{20-28}{20+11} \right) \right] \cdot 30 = 24,9 \text{ МПа.}$$

Соответствующее значение нормативного сопротивления бетона осевому сжатию определяем по формуле (2) [4]:

$$R_{es} = [0,77 - 0,001R_b(t)] \cdot R_b(t), \quad (2)$$

$$R_{es} = [0,77 - 0,001 \cdot 24,9] \cdot 24,9 = 18,6 \text{ МПа.}$$

Величина начального модуля упругости бетона E_b , МПа, при загрузке в возрасте t , определяем по формуле:

$$E_b(t) = \frac{400 \cdot S \cdot R_b(t)}{S \cdot P_{paste} + R_b(t)} \cdot Ag, \quad (3)$$

где S – коэффициент, учитывающий влияние вида заполнителя, для известняка $S= 115$ МПа; P_{paste} – удельное (по массе) содержание цементного теста в смеси = 0,2; $Ag= 0,94$ – коэффициент, учитывающий максимальную крупность заполнителя, принимаем по таблице 2 для диаметра фракции известнякового заполнителя 5 мм [4]:

$$E_b(t) = \frac{400 \cdot 115 \cdot 24,92}{115 \cdot 0,2 + 24,92} \cdot 0,94 = 22486,2 \text{ МПа} = 22,5 \text{ ГПа.}$$

Нормативное значение меры линейной ползучести бетона, загруженного в возрасте 28 суток определяем по следующей формуле [4]:

$$C_{cr}(28)_н = K_c \times \frac{W+V}{4+B}, \quad (4)$$

где K_c – безразмерный коэффициент, который для мелкозернистых и тяжелых бетонов принят равным $K_c= 15,5 \times 10^{-6}$; W – удельное (по объему) количество воды затворения в смеси, л/м³; V – удельное по объему количество вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси, для бетонов с суперпластифицирующими добавками принимается равным = 10 л/м³.

Относительные деформации усадки по истечении 7 суток твердения во влажных условиях рассчитываем по формуле [4]:

$$\varepsilon_{sr} = K_s \times \sqrt{(W + V)^3}, \quad (5)$$

где $K_s=0,14 \times 10^{-6}$ для мелкозернистых бетонов.

Расчетные данные хорошо согласуются с данными таблицы 3 [4].

Расчетные предельные значения меры линейной ползучести и относительной усадки получаются путем корректировки нормативных значений на основе коэффициентов условий изготовления и эксплуатации, таблица 5, [4].

$$C_{cr}(28)_ф = C_{cr}(28)_н \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 ; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{srф} = \varepsilon_{srн} \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 . \quad (7)$$

Предельные значения меры линейной ползучести бетона, загруженного в возрасте t_0 , определяем по формуле:

$$\varphi_{t0} = C_{cr}(28)_ф \times E_b . \quad (8)$$

На рисунке 2 показаны графические зависимости с учетом реального состава бетона.

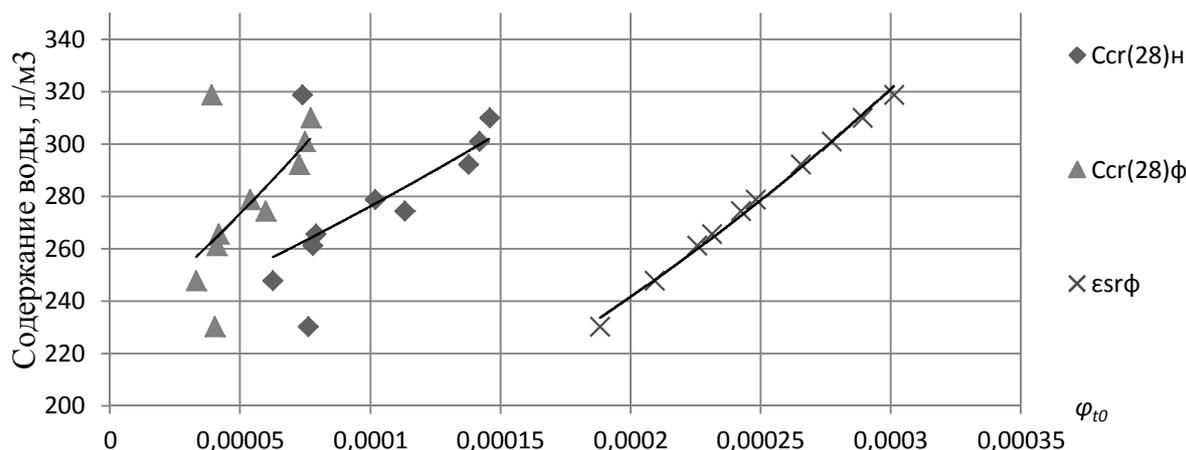


Рисунок 2 – Зависимости предельных значений меры линейной ползучести и относительные деформации усадки бетона (нормативные и фактические значения) от содержания воды.

Как видно, деформации усадки напрямую зависят от содержания воды и в среднем в два раза превышают предельные расчетные значения линейной ползучести.

В экспериментальной части по методу планирования эксперимента получены следующие уравнения поверхности деформации и соответствующая ему диаграмма:

- уравнение регрессии деформаций:

$$y = 295,92 + 63,51x_1 - 9,3x_2 + 10,12x_3 + 378,55x_1^2 - 158,54x_2^2 - 153,23x_3^2 - 92,96x_1x_2 + 67,49x_1x_3 + 106,85x_2x_3 . \quad (9)$$

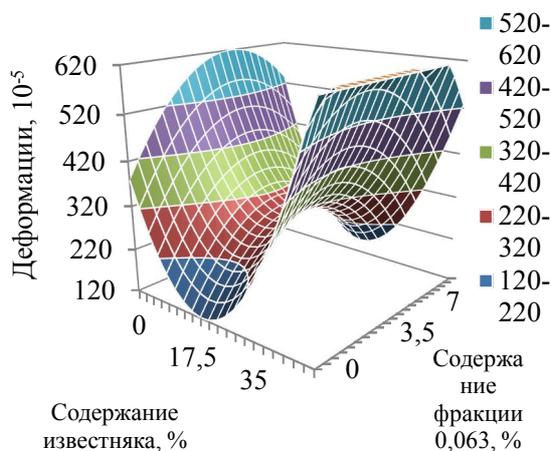


Рисунок 3 – Диаграмма зависимости деформаций от содержания известнякового наполнителя как части фракции вяжущего и тонкой монофракции известняка в %

Диаграмма показывает значительное влияние на деформации процентного содержания известняка в вяжущей части. Причем минимум деформаций отмечен при содержании послед-

него порядка 17-19% (по массе вяжущего), а при величине порядка 30%, деформативность бетона резко возрастает. Установленный эффект, по нашему мнению, обусловлен обволакиванием известняком частиц цемента и продлением процесса гидратации за счет тонкой известняковой добавки, что обеспечивает более равномерное распределение компонента вяжущего в матрице смеси. Данные процессы также сказываются на уменьшении интервала между границами трещинообразования и разрушения при определении предела кубиковой прочности. Если известняковый компонент в вяжущем не превышает 60%, то по сравнению с образцами без данного модификатора гидратации эта граница может быть на порядок больше.

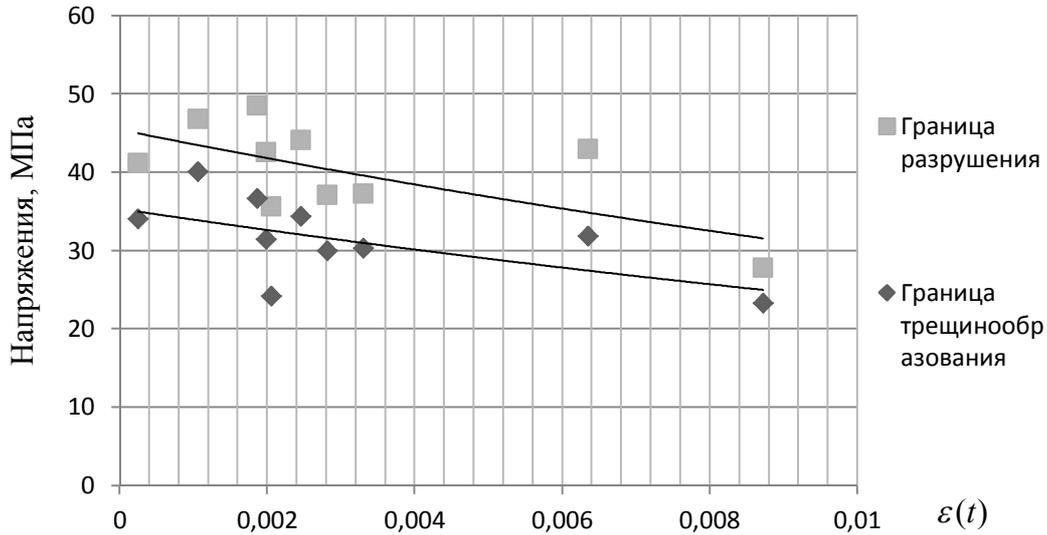


Рисунок 4 – Зависимость опытных значений относительных деформаций от приложенных напряжений

В экспериментальной части значения кратковременных деформаций ползучести рассматривались на основе теории Арутюняна:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_0}^t \sigma(\tau) \times \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\tau, \quad (10)$$

где

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \times [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]; \quad (11)$$

$$\varphi(\tau) = C_0 + \frac{A}{\tau}, \quad (12)$$

где C_0, A, γ – постоянные, определяемые из условий эксперимента.

По данным зависимостям на рисунке 5 показан график развития деформаций во времени:

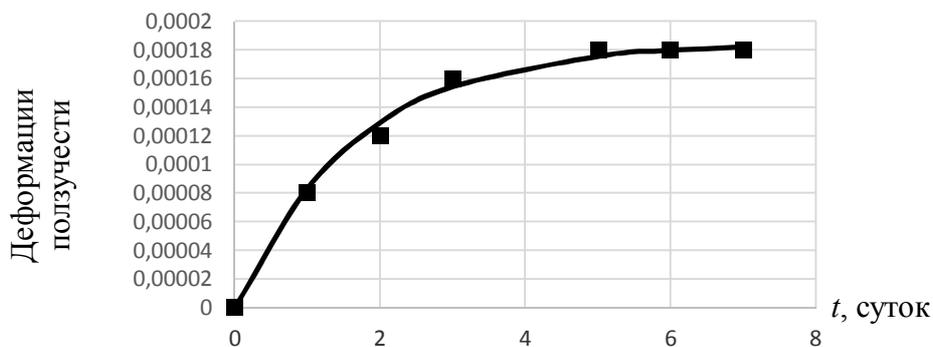


Рисунок 5 – Развитие деформаций ползучести во времени

Для данной зависимости была получена следующая формула:

$$C(t, \tau) = 0,00011 \times [1 - e^{-0,6(t-t_0)}] \quad (13)$$

Выводы

Теоретические и опытные показатели ползучести для бетонов с содержанием тонкодисперсного известнякового компонента, испытанных в возрасте 28 суток, несколько выше, чем для бетонов без добавок, но испытанных в возрасте более 100 суток. Наличие фракции тонкодисперсной известняковой добавки 0,063, которая меньше фракции цемента 0,08, заметно сказывается на снижении деформативных показателей. Особенно ярко это влияние выражено для составов с содержанием известнякового тонкодисперсного компонента в вяжущем до 50% и суперпластифицирующей добавки Сп-1 в количестве 0,75% от твердой части вяжущего (смесь цемента с известняковым порошком). Это объясняется, по нашему мнению, следующими факторами:

1. Имеет место компенсационный эффект тонкой монофракции известняка 0,063, нивелирующей переизбыток суперпластифицирующей добавки Сп-1 за счет обволакивания зерен цемента, что сдерживает процесс формирования центров кристаллизации за счет пролонгации процесса гидратации.

2. Повышение общего количества тонкодисперсной фракции в вяжущем, совместно с монофракцией известняка 0,063, также способствует более равномерному распределению цементных зерен в объеме теста.

3. Тонкодисперсная фракция известняка вытесняет при твердении влагу из воздушных и капиллярных микропор и частично переводит ее в гелевую область, что способствует снижению деформативности создаваемого композита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердов, Г.И. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина, В.Н. Зырянова и др. // Стройпрофи: Строительные Технологии и бетоны. – 2012. – №2. – С. 26-30.

2. Белов, В.В. Новые принципы определения состава высококачественного бетона [Текст] / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Вестник Тверского государственного технического университета. – Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2008. – С. 341-346.

3. G. De Schutter. Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete/Belgium Magnel laboratory of concrete research/36 Conference on Our World in concrete & Structures, Singapore, 14-16/08/2011.

4. Методические рекомендации по расчету напряженного состояния железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом ползучести и усадки бетона [Текст]. – №1987-04-06, ЦНИИС, редакция 2011.

В.А. Миронов

Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Доктор технических наук, профессор

E-mail: common@tstu.tver.ru

П.В. Куляев

Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Аспирант, старший преподаватель кафедры «Конструкций и сооружения»

E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

Ю.В. Сухарев

Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Кандидат технических наук, профессор

E-mail: suv2052@yandex.ru

V. MIRONOV, P. KULJAEV,
JU. SUKHAREV

THE EFFECT OF CARBONATE MICRO-FILLER UPON STRENGTH AND STRAIN PROPERTIES OF CONCRETES

The paper illuminates the results of study of strength and strain characteristics of concretes with limestone fines, strain modulus, instant, short-term and long-term creep, as compared to these for ordinary concretes. The article deals with such stress properties, as crack resistance and cubic strength. The comparison of theoretical figures with test data is drawn on the basis of phenomenological approach toward solution of similar problems.

Keywords: concrete with limestone fines, creep strains, linear creep rate, cubic strength.

BIBLIOGRAPHY

1. Berdov, G.I. Povyshenie svojstv kompozicionnyh stroitel'nyh materialov vvedeniem mineral'nyh mikronapolnitelej [Tekst] / G.I. Berdov, L.V. Il'ina, V.N. Zyrjanova i dr. // Stroiprofi: Stroitel'nye Tehnologii i betony. – 2012. – №2. – S. 26-30.
2. Belov, V.V. Novye principy opredelenija sostava vysokokachestvennogo betona [Tekst] / V.V. Belov, M.A. Smirnov // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – Tver': Tverskoj gos. tehn. un-t, 2008. – S. 341-346.
3. G. De Schutter. Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete/Belgium Magnel laboratory of concrete research/36 Conference on Our World in concrete & Structures, Singapore, 14-16/08/2011.
4. Metodicheskie rekomendacii po raschetu naprjazhennogo sostojanija zhelezobetonnyh konstrukcij transportnyh sooruzhenij s uchetom polzuchesti i usadki betona [Tekst]. – №1987-04-06, CNIIS, redakcija 2011.

V. Mironov

Tver state technical university, Tver
Doctor of technical sciences, professor
E-mail: common@tstu.tver.ru

P. Kuljaev

Tver state technical university, Tver
Postgraduate student, senior lecturer of the department «Constructions and structures»
E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

Y. Sukharev

Tver state technical university, Tver
Candidate of technical sciences, professor
E-mail: suv2052@yandex.ru

ПЫКИН А.А., ЛУКУТЦОВА Н.П., ВАСЮНИНА С.В.,
УСТИНОВ А.А., МАЦАЕНКО А.А., МЕЛЕШКЕВИЧ В.И.

СТРУКТУРА ЦЕМЕНТНЫХ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УСТОЙЧИВЫМИ НАНОДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВОДНОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЕ*

Проведен анализ размерности и устойчивости нанодисперсных добавок, получаемых ультразвуковым диспергированием углерод-силикатного и алюмосиликатного компонентов в водных средах органических стабилизаторов анионного и неионогенного типов. Показана эффективность действия нанодисперсных добавок на структуру и прочность цементных и керамических материалов.

Ключевые слова: нанодисперсные добавки, ультразвуковое диспергирование, суспензия; дисперсная фаза; средний диаметр частиц, дзета-потенциал, силикатные материалы, структура, предел прочности при сжатии.

Современные тенденции развития строительного материаловедения связаны с необходимостью разработки новых ресурсо- и энергосберегающих технологий получения различных видов искусственных силикатных строительных материалов, в частности цементных и керамических, с повышенной прочностью и долговечностью. Одним из решений данной проблемы может быть использование высокоактивных нанодисперсных добавок (НД), позволяющих целенаправленно регулировать структуру материалов на микро- и наноуровнях [1, 2].

К наиболее распространенным способам синтеза большинства НД для цементных, керамических и других композиционных материалов относятся технологии, для которых характерно применение дорогостоящего и энергоемкого оборудования, повышенных давлений и температур, плазмы и дугового разряда, а также токсичных реактивов с многостадийной химической очисткой. Это приводит к значительному увеличению стоимости данного класса добавок и препятствует широкомасштабному их внедрению.

Обзорный анализ ранее выполненных исследований показывает, что эффективным решением вопроса по снижению себестоимости производства НД является активация природного и техногенного силикатного (опал-кристобалитовые породы, биогенный кремнезем, микрокремнезем, золы уноса, отвальные золошлаковые смеси, отсеvy дробления бетонного лома и др.), углерод-силикатного (шунгитовые породы) или алюмосиликатного сырья (глины, метакраолин и др.). В данном направлении большим потенциалом обладает ультразвуковой способ активации, который позволяет за короткий промежуток времени получать суспензии с нанодисперсными твердыми фазами [3, 4].

Целью работы является анализ размерности и устойчивости нанодисперсных добавок, получаемых в виде суспензий способом ультразвукового диспергирования (УЗД) углерод-силикатного и алюмосиликатного компонентов в водных средах органических стабилизаторов анионного и неионогенного типов, и исследование их влияния на структуру и прочность цементных и керамических материалов.

Для получения НД в качестве дисперсных фаз использовали углерод-силикатный и алюмосиликатный минеральные компоненты и органические стабилизаторы: анионное – суперпластификатор С-3 в виде сухого вещества (ОАО «Полипласт», г. Новомосковск, Тульская

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-03-97511-р_центр_а).

обл.) и неионогенное – поливиниловый спирт марки 16/1 (ЗАО «Научно-производственная компания ЕрмакХим», г. Москва). Дисперсионной средой служила дистиллированная вода.

Углерод-силикатный компонент получали путем двухстадийного тонкого помола (в шаровой мельнице и виброистирателе) шунгитовой породы Зажогинского месторождения (Карелия), химический состав которой представлен содержанием около 30% углерода С и более 56% оксида кремния SiO₂ (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав исходных минеральных компонентов для получения нанодисперсных добавок

Минеральный компонент	Содержание оксидов, % масс.										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	Cl	C	прочие
Шунгитовая порода	56,20	4,62	1,53	1,96	0,40	1,77	0,97	1,52	0,02	29,80	1,21
Метакаолин	42,83	50,61	1,89	0,15	0,53	0,19	0,96	0,32	0,04	–	2,48

Интерес к использованию шунгитовой породы связан с особенностью ее структуры, которая, как известно, состоит из силикатных микрокристаллических частиц с преобладанием кварца и матрицы из аморфного наноструктурного углерода, обладающего дифильностью – способностью смачиваться водой и неполярными жидкостями. При этом площадь контакта между углеродной и силикатной составляющими, не поддающимися разделению обычными механическими способами, является чрезвычайно развитой (до 20 м²/г) [5].

В качестве алюмосиликатного компонента использовали метакаолин – продукт термической обработки (обезвоживания) мономинеральных каолиновых глин (ООО «Синерго», г. Магнитогорск, Челябинская обл.), представляющий собой тонкодисперсный порошкообразный материал, в состав которого, по данным химического анализа, входит более 50% оксида алюминия Al₂O₃ и около 43% оксида кремния SiO₂ (см. табл. 1).

По данным лазерной гранулометрии на приборе Analysette 22 NanoTec plus, средний диаметр частиц тонкомолотой шунгитовой породы (ТШП) равен 3,20 мкм (3200 нм). При этом доля частиц в диапазоне от 0,01 до 0,1 мкм составляет 0,1%; от 0,1 до 0,5 мкм – 1,6%; от 0,5 до 1 мкм – 4,1%; от 1 до 10 мкм – 72,3%; от 10 до 100 мкм – 21,9% (рис. 1, а).

Средний диаметр частиц метакаолина равен 13,81 мкм (13810 нм). Доля частиц в диапазоне от 0,01 до 0,1 мкм составляет 0,5%; от 0,1 до 0,5 мкм – 2,7%; от 0,5 до 1 мкм – 4,7%; от 1 до 10 мкм – 53,4%; от 10 до 100 мкм – 38,7% (рис. 1, б).

Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе Quanta 3D FEG установлено, что микроструктура ТШП характеризуется содержанием частиц преимущественно осколочной формы с острыми углами, изрезанными краями и ярко выраженными дефектами и шероховатостями на поверхности, морфология которых идентична ксеноморфным зернам кварца и силикатов типа гидромусковита и хлорита (рис. 2, а) [5].

По данным РЭМ на приборе TESCAN MIRA 3 LMU, микроструктура метакаолина представлена наличием отдельных крупнодисперсных частиц и их агрегатов угловатой формы, а также столбчатых конгломератов, состоящих из спаянных гексагональных пластинок толщиной менее 50 нм (рис. 2, б).

Ультразвуковое диспергирование исходных минеральных компонентов в водных средах органических стабилизаторов осуществляли по методикам, изложенным в работах [6, 7].

Результаты ранее выполненных исследований показали, что УЗД тонкомолотой шунгитовой породы в водной среде способствует разделению ее наноуглеродной и кремнеземистой фаз, приводя к эрозии последней с образованием нанодисперсных частиц SiO₂ с аморфизированным поверхностным слоем толщиной около 20 нм [4].

Ультразвуковое диспергирование в водной среде метакаолина способствует эрозии его микрочастиц и агрегатов вплоть до нанодиапазона, а также расщеплению нанотолщинных гексагональных пластинок, содержащихся в столбчатых конгломератах.

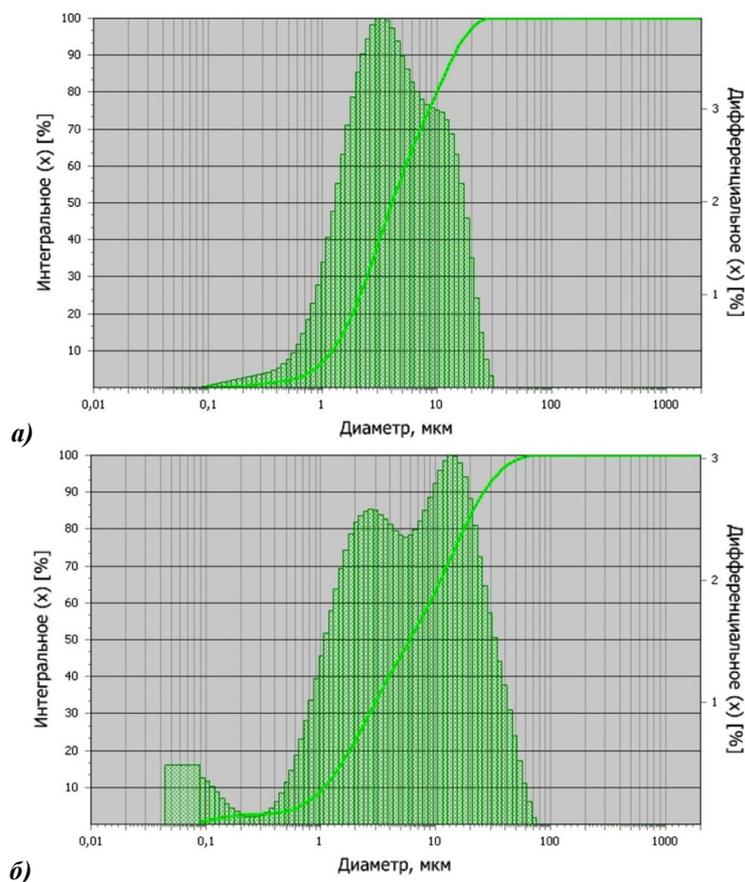


Рисунок 1 – Гистограммы распределения по размерам частиц тонкомолотой шунгитовой породы (а) и метакаолина (б)

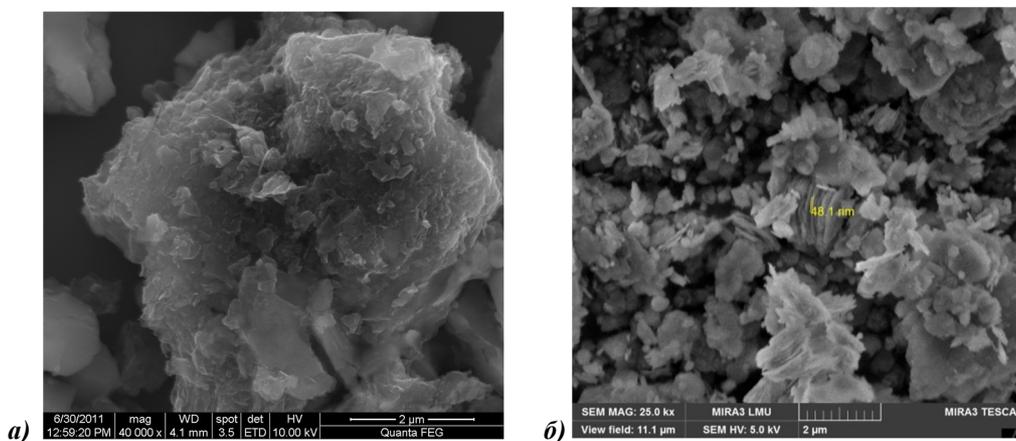


Рисунок 2 – Морфология частиц тонкомолотой шунгитовой породы (а, $\times 40000$) и метакаолина (б, $\times 25000$) до ультразвукового диспергирования

Результаты фотонно-корреляционной спектроскопии и электрофоретического светорассеяния, полученные с помощью лазерного анализатора ZetaPlus, показали, что УЗД тонкомолотой шунгитовой породы и метакаолина в водных средах без стабилизаторов приводит к образованию суспензий, дисперсные фазы которых агрегативно-неустойчивы (табл. 2), так как средние значения ζ -потенциала частиц (-2,7 мВ и -4,9 мВ, соответственно ТШП и метакаолина) ниже критического (-30 мВ).

Несмотря на высокую агрегативную неустойчивость дисперсных фаз суспензий, ультразвуковое диспергирование используемых минеральных компонентов в водных средах без стабилизаторов является высокоэффективным способом уменьшения размера их частиц. Так, средний диаметр частиц тонкомолотой шунгитовой породы после УЗД снижается от 3200 до

423,4 нм (в 7,6 раза), а метакаолина – от 13810 до 593,6 нм (в 23,3 раза).

Для повышения агрегативной, а также связанной с ней седиментационной устойчивости дисперсных фаз суспензий на основе ТШП и метакаолина исследовали влияние различных по механизму действия и в то же время наиболее распространенных органических стабилизаторов: суперпластификатора С-3 и поливинилового спирта (ПВС).

Таблица 2 – Размеры частиц и показатели устойчивости дисперсных фаз суспензий после ультразвукового диспергирования тонкомолотой шунгитовой породы и метакаолина

Состав суспензии		Диаметр частиц дисперсной фазы, нм				Полидисперсность, %	Дзета-потенциал, мВ
минеральный компонент	стабилизатор	минимальный	максимальный	средний	эффективный		
Тонкомолотая шунгитовая порода	–	123,9	1345,7	423,4	965,6	28	-2,7
	С-3	47,6	360,7	214,5	282,3	21,2	-56,4
	ПВС	236,9	334,5	303,5	303,2	8,8	-36,3
Метакаолин	–	80,8	834,9	593,6	578,9	22,8	-4,9
	С-3	39,4	223,6	70,8	150,2	18,3	-72,8
	ПВС	11,2	561,2	29,3	269,8	30,5	-41,4

Из представленных результатов (табл. 2) следует, что ультразвуковое диспергирование минеральных компонентов в водных средах в присутствии стабилизатора С-3 способствует:

- повышению среднего значения ζ -потенциала частиц ТШП от -2,7 до -56,4 мВ, метакаолина от -4,9 до -72,8 мВ;
- снижению среднего диаметра частиц ТШП от 423,4 до 214,5 нм (в 2 раза), метакаолина от 593,6 до 70,8 нм (в 8,4 раза);
- уменьшению эффективного диаметра частиц ТШП от 965,6 до 282,3 нм (в 3,4 раза), метакаолина от 578,9 до 150,2 нм (в 3,9 раза);
- изменению полидисперсности частиц ТШП от 28 до 21,2%, метакаолина от 22,8 до 18,3%.

Следует отметить, что средний диаметр частиц тонкомолотой шунгитовой породы после УЗД в водной среде с С-3 снижается от 3200 до 214,5 нм (в 14,9 раза), а метакаолина – от 13810 до 70,8 нм (в 195 раз).

Эффект стабилизации С-3 вызван, главным образом, тем, что адсорбционные слои повышают абсолютную величину ζ -потенциала, то есть агрегативная устойчивость частиц обеспечивается преимущественно их электростатическим отталкиванием.

В то же время, ультразвуковое диспергирование минеральных компонентов в водных средах с содержанием стабилизатора ПВС приводит к:

- повышению среднего значения ζ -потенциала частиц ТШП от -2,7 до -36,3 мВ, метакаолина от -4,9 до -41,4 мВ;
- снижению среднего диаметра частиц ТШП от 423,4 до 303,5 нм (в 1,4 раза), метакаолина от 593,6 до 29,3 нм (в 20,3 раза);
- уменьшению эффективного диаметра частиц ТШП от 965,6 до 303,2 нм (в 3,2 раза), метакаолина от 578,9 до 269,8 нм (в 2,1 раза);
- изменению полидисперсности частиц ТШП от 28 до 8,8%, метакаолина от 22,8 до 30,5%.

При использовании стабилизатора ПВС средний диаметр частиц тонкомолотой шунгитовой породы после УЗД в водной среде снижается от 3200 до 303,5 нм (в 10,5 раза), а метакаолина – от 13810 до 29,3 нм (в 471 раз).

Эффект стабилизации ПВС связан с образованием больших по протяженности адсорбционных слоев, что увеличивает, по сравнению с С-3, эффективный (кажущийся) диаметр частиц ТШП от 282,3 до 303,2 нм (в 1,1 раза), метакаолина – от 150,2 до 269,8 нм (в 1,8 раза). При этом агрегативная устойчивость обеспечивается, прежде всего, за счет адсорбционно-сольватного и структурно-механического факторов.

Исследование влияния разработанных нанодисперсных добавок на структуру и прочность цементных и керамических материалов осуществляли на образцах цементного и керамического камня.

Образцы цементного камня (ЦК) изготавливали на основе портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 Н (ЗАО «Мальцовский портландцемент», г. Фокино, Брянская обл.). Химический состав (% по массе): CaO – (65,5-66,2); SiO₂ – (21,25-21,95); Al₂O₃ – (5-5,4); Fe₂O₃ – (4,25-4,55); MgO – (0,85-0,95); SO₃ – (0,9-1,1); (Na₂O + K₂O) – (0,56-0,72). Минеральный состав (% по массе): C₃S – (58,5-64,5); C₂S – (13,5-17,5); C₃A – (5,8-7); C₄AF – (12,8-13,8). Удельная поверхность – (330-370) м²/кг. Нормальная плотность – (23-24,6)%.

Добавки вводили в виде готовых суспензий в количестве 0,05 % (в пересчете на сухое вещество) от массы цемента вместе с расчетным объемом воды затворения, необходимым для получения цементного теста нормальной плотности. Испытание контрольных и наномодифицированных образцов ЦК на сжатие проводили на кубиках размерами 2×2×2 см, твердеющих в течение 28 суток при температуре (20 ± 2)°C и влажности (90 ± 5)%.

Образцы керамического камня (КК) изготавливали по методике, изложенной в работе [6], на основе легкоплавкой глины Гукалинского месторождения (Брянская обл.). Химический состав (% по массе): SiO₂ – (55-80); (Al₂O₃ + TiO₂) – (7-21); Fe₂O₃ – (3-12); CaO – (0,5-15); MgO – (0,5-3); SO₃ – до 3; (Na₂O + K₂O) – (1-5), потери при прокаливании – (3-15). При этом полученные добавки-суспензии вводили в количестве 1% от массы глины вместе с расчетным объемом воды затворения, необходимым для получения смеси формовочной влажности (20%).

Структуру контрольных и наномодифицированных образцов ЦК исследовали методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе TESCAN MIRA 3 LMU и азотной порометрии на приборе Sorbi-M, а образцов КК – рентгенофазовым анализом (РФА) по методу порошковой дифрактометрии на приборе ДРОН-3М. Прочность образцов определялась по пределу прочности при сжатии.

По данным РЭМ, установлено, что контрольный образец цементного камня характеризуется крупнокристаллической структурой с микротрещинами в плоскостях спаянности гидратных новообразований и рыхлыми скоплениями в порах мелкодисперсных волокон, идентичных гидросиликатам кальция (CSH) разной морфологии (рис. 3, а) [8].

Образцы ЦК с наночастицами тонкомолотой шунгитовой породы, стабилизированными суперпластификатором С-3 и поливиниловым спиртом, отличаются менее дефектной и крупнокристаллической структурой с наличием в порах значительного количества плотно сросшихся кристаллов CSH, дисперсность которых несколько выше при использовании стабилизатора С-3 (рис. 3, б, в).

Образцы цементного камня, модифицированные наночастицами метакаолина, представлены мелкокристаллической структурой с содержанием в порах близких к аморфным кристаллов, идентичных CSH-гелю. Помимо этого, в присутствии С-3, в порах ЦК образуются крупные метастабильные гексагональные пластинки, переходящие в спаянные тонкие частицы (рис. 3, з), а в присутствии ПВС – мелкие пластинчатые и частично кубовидные кристаллы (рис. 3, д). В обоих случаях, морфология новообразований идентична гидроалюминатам кальция разной морфологии [8].

Результаты азотной порометрии показали, что разработанные нанодисперсные добавки способствуют перераспределению пористости цементного камня в сторону увеличения объема нанопор (гелевых и переходных) диаметром менее 100 нм, возникающих, по-видимому, вследствие заполнения микропор и капилляров дополнительным количеством новообразований.

При введении наночастиц ТШП со стабилизатором С-3, объем пор цементного камня диаметром менее 100 нм возрастает от 0,002 до 0,004 см³/г (в 2 раза), с ПВС – до 0,003 см³/г (в 1,5 раза). В то же время, при использовании наночастиц метакаолина со стабилизатором С-3, объем нанопор возрастает от 0,002 до 0,010 см³/г (в 5 раз), с ПВС – до 0,014 см³/г (в 7 раз).

По данным рентгенофазового анализа (рис. 4, 5), установлено, что фазовый состав контрольного и наномодифицированных образцов керамического камня представлен наличием кварца SiO₂ (*d*, нм: 0,427; 0,335; 0,246; 0,182), минералов типа альбита Na(AlSi₃O₈) и анортита

$(Ca, Na)(Al, Si)_2Si_2O_8$ (d , нм: 0,411; 0,324), а также аморфного вещества (стеклофазы).

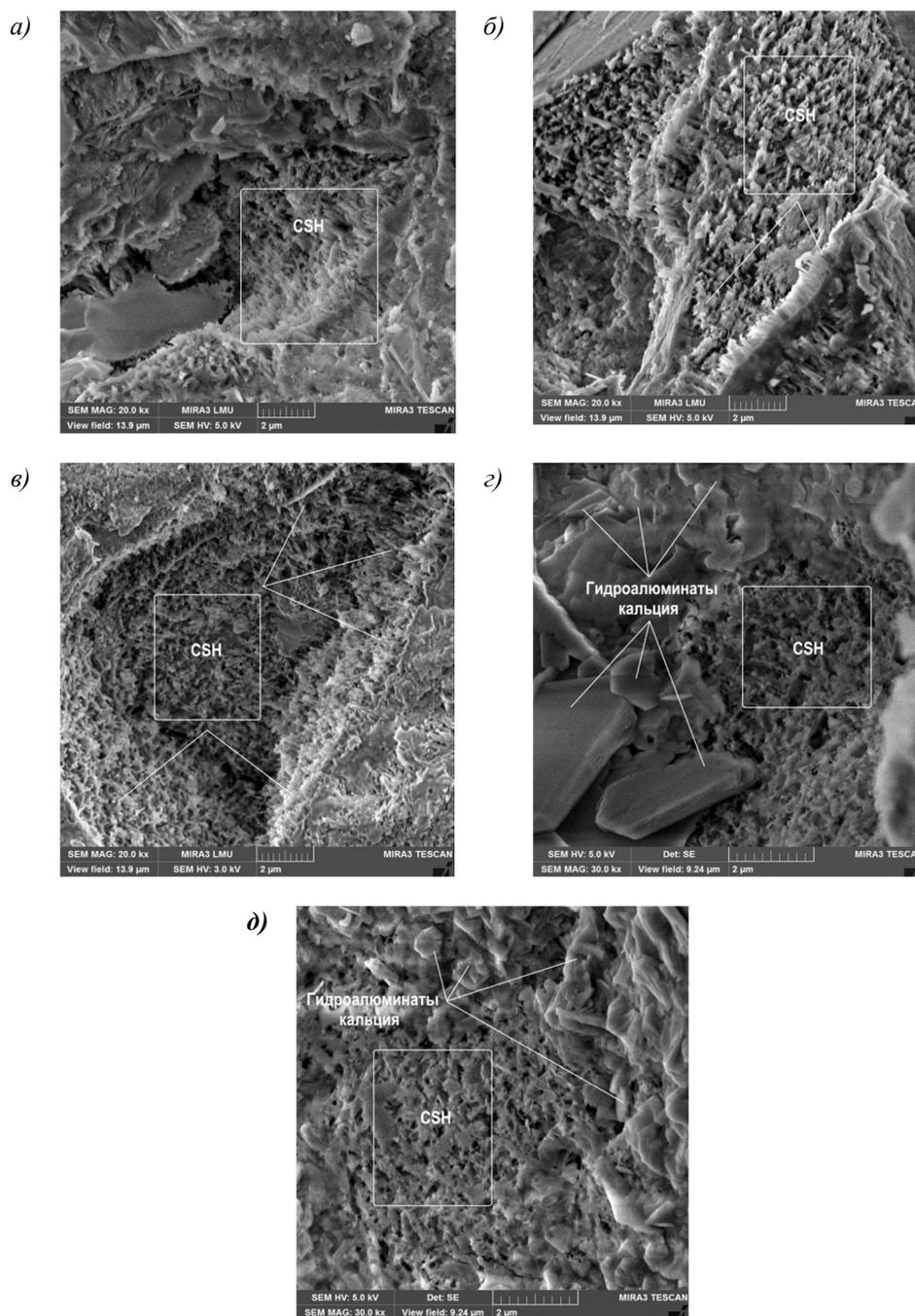


Рисунок 3 – Микроструктура цементного камня: а – контрольный образец ($\times 20000$); б – с добавкой (ТШП + С-3), ($\times 20000$); в – с добавкой (ТШП + ПВС), ($\times 20000$); г – с добавкой (метакаолин + С-3), ($\times 30000$); д – с добавкой (метакаолин + ПВС), ($\times 30000$)

При введении добавок количество кварца, альбито- и анортитоподобных кристаллообразований, а также стеклофазы увеличивается, что приводит к уплотнению и упрочнению структуры КК. При этом наибольшей степенью закристаллизованности обладают образцы керамического камня, модифицированные наночастицами тонкомолотой шунгитовой породы со стабилизатором С-3, и наночастицами метакаолина со стабилизатором ПВС.

Анализ влияния разработанных добавок на прочность цементного камня показал, что при использовании наночастиц тонкомолотой шунгитовой породы со стабилизатором С-3, предел прочности при сжатии модифицированных образцов ЦК возрастает на 59% (по сравнению с контрольным образцом) и составляет 78,7 МПа, а с ПВС – на 36% и составляет

67,1 МПа (табл. 3).

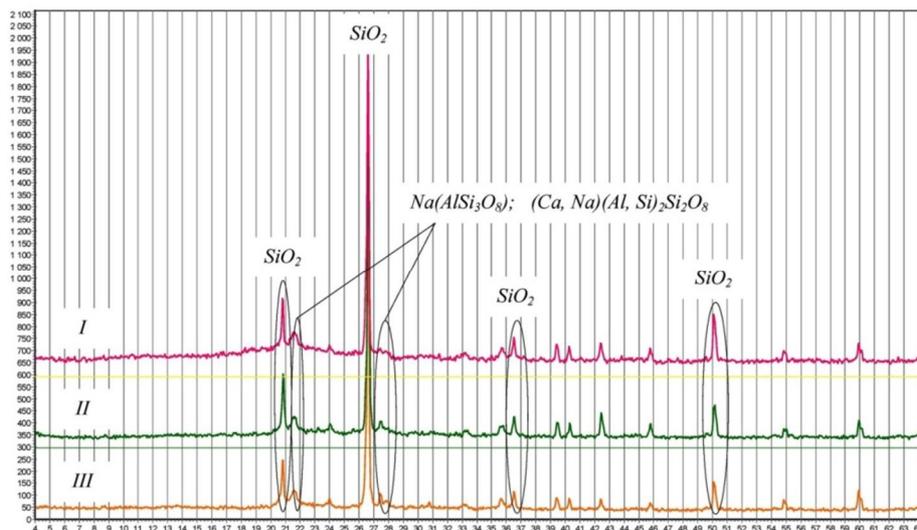


Рисунок 4 – Рентгенограммы керамического камня:
I – контрольный образец; II – с добавкой (ТШП + ПВС); III – с добавкой (ТШП + С-3)

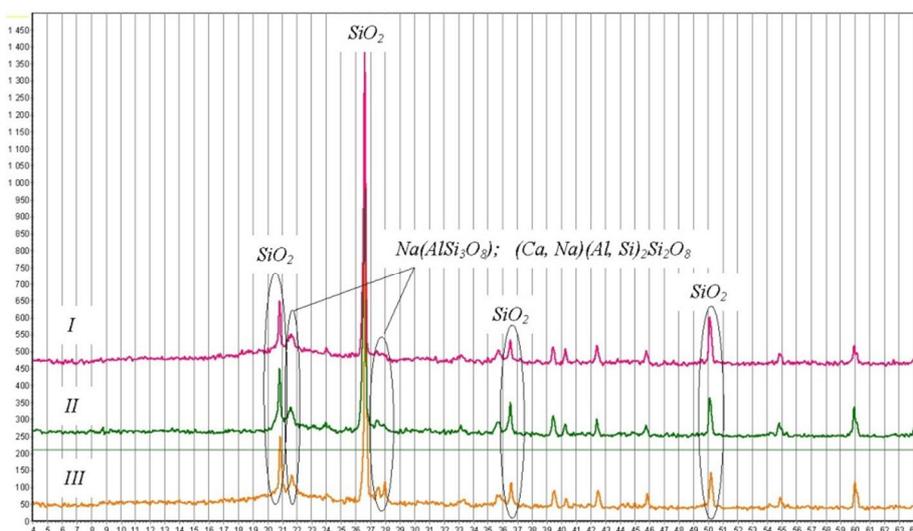


Рисунок 5 – Рентгенограммы керамического камня:
I – контрольный образец; II – с добавкой (метакаолин + ПВС); III – с добавкой (метакаолин + С-3)

Таблица 3 – Влияние нанодисперсных добавок на основе тонкомолотой шунгитовой породы и метакаолина на предел прочности при сжатии керамического камня

№ образца	Состав добавки		Размеры частиц добавки, нм	Предел прочности при сжатии, МПа	
	Минеральный компонент	Стабилизатор		цементный камень	керамический камень
1	Без добавки		–	49,4	15,0
2	Тонкомолотая шунгитовая порода	С-3	47,6 – 360,7	78,7	21,1
3		ПВС	236,9 – 334,5	67,1	19,4
4	Метакаолин	С-3	39,4 – 223,6	109,2	18,1
5		ПВС	11,2 – 561,2	124,5	19,3

Наибольший прирост предела прочности при сжатии наблюдается у образцов цементного камня, модифицированного наночастицами метакаолина: до 124,5 МПа (на 152%) со ста-

билизатором ПВС, до 109,2 МПа (на 121%) с С-3.

Результаты исследования влияния добавок на прочность керамического камня показали, что при введении наночастиц ТШП, стабилизированных С-3, предел прочности при сжатии модифицированных образцов КК возрастает на 41 % (по сравнению с контрольным образцом) и составляет 21,1 МПа, а с ПВС – на 29% и составляет 19,4 МПа (табл. 3).

Следует отметить, что при использовании наночастиц метакаолина, прирост предела прочности при сжатии образцов керамического камня, равный 28% со стабилизатором ПВС и 21% с С-3, несколько ниже, чем с добавками на основе тонкомолотой шунгитовой породы.

Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Экспериментально обоснована возможность уплотнения и упрочнения структуры цементных и керамических строительных материалов за счет использования нанодисперсных добавок, получаемых в виде агрегативно-устойчивых суспензий способом ультразвукового диспергирования тонкомолотой шунгитовой породы и метакаолина в водных средах органических стабилизаторов: суперпластификатора С-3 и поливинилового спирта.

2. Доказано, что разработанные добавки оказывают направленное воздействие на формирование структуры цементного камня за счет дополнительного образования гидросиликатов кальция и гидроалюминатов кальция разной морфологии, способствующих перераспределению пористости системы в сторону уменьшения объема микропор и увеличения объема нанопор диаметром менее 100 нм (в 1,5-2 раза с добавками на основе ТШП, в 5-7 раз – с добавками на основе метакаолина), что обуславливает существенное повышение прочности цементного камня (на 36-152% в зависимости от вида добавки).

3. Установлено, что полученные наномодификаторы увеличивают количество кристаллообразований (кварца, альбито- и анортитоподобных) и стеклофазы при обжиге глиняной массы, что приводит к повышению прочности керамического камня на 21-41% (в зависимости от вида добавки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фиговский, О.Л. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах [Текст] / О.Л. Фиговский, Д.А. Бейлин, А.Н. Пономарев // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. – 2012. – №3. – С. 6-21.
2. Яковлев, Г.И. Наномодифицирование керамических материалов строительного назначения [Текст] / Г.И. Яковлев, М.С. Полянских, Р. Мачюлайтис и др. // Строительные материалы. – 2013. – №4. – С. 62-64.
3. Баженов, Ю.М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов [Текст] / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: МГСУ, 2013. – 204 с.
4. Лукутцова, Н.П. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона [Текст] / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин. – Брянск: БГИТА, 2014. – 216 с.
5. Рожкова, Н.Н. Нанопорода шунгитов [Текст] / Н.Н. Рожкова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. – 100 с.
6. Лукутцова, Н.П. Устойчивость нанодисперсных добавок на основе метакаолина [Текст] / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин // Стекло и керамика. – 2014. – №11.
7. Пыкин, А.А. Влияние органоминеральных наномодификаторов на основе шунгита на структуру и прочность керамического камня [Текст] / А.А. Пыкин, Н.П. Лукутцова, А.А. Калугин, В.И. Мелешкевич // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – №1. – С. 50-55.
8. Красовский, П.С. Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов [Текст] / П.С. Красовский. – Хабаровск: ДВГУПС, 2013. – 204 с.

А.А. Пыкин

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство строительных конструкций»
E-mail: alexem87@yandex.ru

Н.П. Лукутцова

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Производство строительных конструкций»
E-mail: natluk58@mail.ru

С.В. Васюнина

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство строительных конструкций»
E-mail: lady-vasunina@yandex.ru

А.Г. Устинов

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск
Аспирант
Тел.: +7 910 336 52 28
E-mail: allexian@mail.ru

А.А. Мацаенко

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск
Магистрант
Тел.: +7 915 801 09 51
E-mail: macichka@yandex.ru

В.И. Мелешкевич

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск
Инженер
E-mail: vika.meleshkevich@mail.ru

A. PYKIN, N. LUKUTCOVA, S. VASYUNINA, A. USTINOV,
A. MACAENKO, V. MELESHKEVICH

**THE STRUCTURE OF CEMENT AND CERAMIC
MATERIALS WITH STEADY NANO-DISPERSE
ADDITIVES ON THE BASIS OF STABILIZED MINERAL
COMPONENTS IN THE AQUATIC DISPERSION
ENVIRONMENT**

The analysis of dimensionality and stability of nano-disperse additives obtained by ultrasonic dispersion of carbon-silicate and aluminosilicate components in aquatic environment of organic stabilizers of anionic and nonionic types has been carried out. The effectiveness of nano-disperse additives on the structure and strength of the cement and ceramic materials is shown.

Keywords: *nano-disperse additives, ultrasonic dispersion, suspension; dispersed phase; average particle diameter, zeta-potential, silicate materials, structure, compressive strength.*

BIBLIOGRAPHY

1. Figovskij, O.L. Uspеhi primeneniya nanotehnologij v stroitel'nyh materialah [Tekst] / O.L. Figovskij, D.A. Bejlin, A.N. Ponomarev // Nanotehnologii v stroitel'stve: nauchnyj Internet-zhurnal. – 2012. – №3. – S. 6-21.
2. Jakovlev, G.I. Nanomodificirovanie keramicheskikh materialov stroitel'nogo naznachenija [Tekst] / G.I. Jakovlev, M.S. Poljanskih, R. Machjulajtis i dr. // Stroitel'nye materialy. – 2013. – №4. – S. 62-64.
3. Bazhenov, Ju.M. Struktura i svojstva betonov s nanomodifikatorami na osnove tehnogennyh othodov [Tekst] / Ju.M. Bazhenov, L.A. Alimov, V.V. Voronin. – M.: MGSU, 2013. – 204 s.
4. Lukutcova, N.P. Teoreticheskie i tehnologicheskie aspekty poluchenija mikro- i nanodispersnyh dobavok na osnove shungitosoderzhashhih porod dlja betona [Tekst] / N.P. Lukutcova, A.A. Pykin. – Brjansk: BGITA, 2014. – 216 s.
5. Rozhkova, N.N. Nanouglerod shungitov [Tekst] / N.N. Rozhkova. – Petrozavodsk: KarNC RAN, 2011. – 100 s.
6. Lukutcova, N.P. Ustojchivost' nanodispersnyh dobavok na osnove metakaolina [Tekst] / N.P. Lukutcova, A.A. Pykin // Steklo i keramika. – 2014. – №11.
7. Pykin, A.A. Vlijanie organomineral'nyh nanomodifikatorov na osnove shungita na strukturu i prochnost' keramicheskogo kamnja [Tekst] / A.A. Pykin, N.P. Lukutcova, A.A. Kalugin, V.I. Meleshkevich // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. – 2015. – №1. – S. 50-55.
8. Krasovskij, P.S. Fiziko-himicheskie osnovy formirovanija struktury cementnyh betonov [Tekst] / P.S. Krasovskij. – Habarovsk: DVGUPS, 2013. – 204 s.

A. Pykin

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk
Candidate of technical Sciences, associate professor of the department «Production of building structures»
E-mail: alexem87@yandex.ru

N. Lukutcova

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk
Doctor of technical sciences, professor, head of department «Production of building structures»
E-mail: natluk58@mail.ru

S. Vasyunina

Bryansk state engineering-technological Academy, Bryansk
Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Production of building structures»
E-mail: lady-vasunina@yandex.ru

A. Ustinov

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk
Graduate student
Ph.: +7 910 336 52 28
E-mail: allexian@mail.ru

A. Macaenko

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk
Master student
Ph.: +7 915 801 09 51
E-mail: macichka@yandex.ru

V. Meleshkevich

Bryansk state engineering-technological academy, Bryansk
Engineer
E-mail: vika.meleshkevich@mail.ru

РЕЗНИЧЕНКО В.С., БЕЛЬ О.В.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТРОЕК

В статье по информационной технологии управления и определения стоимости крупномасштабных строек изложены рекомендации по методологии управления инвестиционно-строительными проектами и оптимизации сметной стоимости крупномасштабных строек в интересах инвесторов, застройщиков и подрядных организаций за счет применения более эффективных методик и нормативных баз.

Ключевые слова: управление, ценообразование, стоимость, крупномасштабная стройка.

Предлагаемая интегрированная информационно-аналитическая система управления инвестиционно-строительными проектами и определения стоимости крупномасштабных строек [1] учитывает передовой отечественный и зарубежный опыт, современные международные требования, опыт разработки и внедрения информационной системы в ОАО «Газпром» и его дочерних обществах, а также многолетнюю теорию и практику решения рассматриваемых проблем на основе эффективных информационных технологий. Повышение эффективности управления крупномасштабными инвестиционно-строительными проектами (ИСП) и программами (ИСПр) является важнейшим направлением деятельности всех участников инвестиционного процесса. Вместе с тем, проанализированные нами существующие системы управления ИСП и ИСПр [1] требуют дальнейшего развития, в частности по следующим основным вопросам:

1. Определение понятия крупномасштабный ИСП.
2. Определение понятия и обоснование декомпозиций системы управления крупномасштабными ИСП и ИСПр.
3. Обоснование и декомпозиция объектов управления ИСП.
4. Обоснование и декомпозиция субъектов управления ИСП и ИСПр.
5. Определение и информационная увязка прикладных задач системы управления ИСП и ИСПр с учетом совершенствования российского законодательства.
6. Разработка системы управления ИСП и ИСПр для федерального, регионального, отраслевого и корпоративного уровней при различных формах и источниках их финансирования, а именно при бюджетном финансировании ИСП, государственно-частном партнерстве, корпоративном финансировании, финансировании с участием иностранных инвесторов и других форм финансирования.

Ниже кратко остановимся на каждом из перечисленных вопросов.

1. Крупномасштабность ИСП определяется несколькими факторами, прежде всего их стоимостью и продолжительностью реализации. Наш опыт взаимодействия с крупными отечественными и зарубежными корпорациями показывает, что должен определяться и утверждаться Перечень крупномасштабных ИСП, конкурсы на реализацию которых проводятся на верхнем уровне управления головного застройщика (инвестора). Остальные проекты инвестиционной программы могут реализовываться через конкурсы нижестоящих уровней управления. К примеру, в ОАО «Газпром» реализация крупномасштабных проектов осуществляется через конкурсы, которые проводит корпорация, а остальные ИСП реализуются их дочерними обществами-заказчиками капитального строительства.

2. Система управления ИСП и ИСПр должна включать в себя декомпозицию не только объектов и субъектов управления ИСП, но и декомпозицию системы управления деятельностью субъектов реализации ИСП и ИСПр, т.е. применительно к перспективной (более 5 лет), текущей (1, 2, 3 года) и оперативной (квартал, месяц, декада, неделя) деятельности конкретно-

го субъекта управления. К примеру, трехлетняя инвестиционная программа корпорации ОАО «Газпром» декомпозируется в зависимости от направляемых инвестиций на капитальное строительство, приобретение внеоборотных активов, а также на долгосрочные финансовые вложения. В свою очередь каждое из перечисленных направлений декомпозируется на отдельные подсистемы. К примеру, подсистема управления капитальным строительством декомпозируется на управление строительством объектов производственного (в том числе линейного) и непромышленного назначения. Далее эта подсистема декомпозируется на управление реализацией строительством объектов, обеспечение их материалами и оборудованием поставки заказчика и т.д. Если рассматривать декомпозицию деятельности подрядной организации, то можно выделить подсистемы технико-экономического и оперативного управления, которые в свою очередь можно декомпонировать на подсистемы управления реализацией производственной программы, управление техническим развитием, управление качеством, управление различными видами ресурсов и т.д. [1]. Однако отметим, что это не управление объектами, а управление деятельностью конкретного субъекта управления. При этом важно обеспечить информационную увязку задач указанных выше и других подсистем по входной и выходной информации с разработкой единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации. Это создает основу для перехода на более эффективные информационные технологии управления ИСП и ИСПр.

3. Объекты управления ИСП детально представлены в [1,2]. Однако отметим, что нами предлагается более эффективная декомпозиция объектов управления ИСП. Новизной декомпозиции является рассмотрение объектов управления в зависимости от их назначения, стадии разработки и функций управления. К примеру, для крупномасштабных ИСП производственного назначения ОАО «Газпром» важнейшей является прединвестиционная стадия управления, на которой решаются вопросы перевода ИСП в инвестиционную стадию, определяются формы и источники их финансирования, а также проводятся исследования по многим другим проблемам. Затем рассматриваются предпроектная, проектная, конкурсная, договорная и другие стадии.

4. Субъекты управления ИСП и ИСПр также требуют уточнения, так как в теории и практике управления строительством недостаточно четко представлены их функции и даже в российском законодательстве имеют место определенные противоречия в обоснованиях функций застройщиков, инвесторов, заказчиков, генподрядчиков, генпроектировщиков, подрядчиков и других участников инвестиционного процесса. Нами обоснованы эти функции и предложены рекомендации для внесения поправок в Гражданский, Градостроительный, Земельный, Трудовой и Налоговый кодексы РФ и в другие нормативные документы. Данная проблема требует рассмотрения в отдельной статье.

5. Определение и информационная увязка прикладных задач системы управления ИСП и ИСПр, с учетом совершенствования российского законодательства, рассматривается в техно-рабочем проекте информационно-аналитической системы управления ИСП и ИСПр «ПУСК», содержание которого кратко представлено в [1].

6. Разработка системы управления ИСП и ИСПр может осуществляться для федерального, регионального, отраслевого и корпоративного уровней при различных формах и источниках их финансирования, а именно при бюджетном финансировании ИСП, государственно-частном партнерстве, корпоративном финансировании, финансировании с участием иностранных инвесторов и других форм финансирования. Опыт проектирования корпоративной системы управления реализацией крупномасштабных ИСП и ИСПр, в том числе осуществляемых в труднодоступных и малонаселенных регионах РФ, представлен в [1,2].

Таким образом, в настоящее время теория и практика развития управления ИСП и ИСПр нуждается в дальнейшем развитии и конкретизации применительно к специфическим особенностям ИСП, в том числе их масштабности, специфики условий строительства в регионах РФ, специфики финансирования ИСП, специфики деятельности конкретного субъекта реализации ИСП, осуществляющего функции генерального застройщика и других факторов.

Полагаем, что при таком подходе научные разработки будут более востребованы в практической деятельности всех участников инвестиционного процесса.

Ниже остановимся более подробно на методологии определения сметной стоимости крупномасштабных строек на всех стадиях инвестиционного процесса. Данная методология разрабатывается в интересах ОАО «Газпром» для повышения эффективности деятельности и снижения производственных издержек материнской компании и ее дочерних обществ-заказчиков капитального строительства, а также проектных, подрядных и снабженческо-сбытовых организаций. Опыт внедрения инноваций в ОАО «Газпром» показывает, что программа мер и мероприятий по созданию эффективной информационной системы определения сметной стоимости крупномасштабных строек должна включать в себя [2]:

1. Организационные мероприятия, связанные с подготовкой организационно-штатных мероприятий, формирование стройной организационной структуры пользователей и разработчиков системы. В первую очередь необходимо создание в материнской компании специализированной организации, отвечающей за организацию и методологию разработки и внедрения системы, качество подготовки обосновывающих материалов по ценообразованию строительства объектов, в том числе по формированию договорных цен.

2. Разработку методологии сметных расчетов в интересах материнской компании и ее дочерних обществ, в которой обосновывается системная технология увязки всех задач, в том числе сметной и другой информации.

3. Разработку методик и программных комплексов системы для всех типов объектов и всех стадий сметных расчетов.

4. Разработку элементных и укрупненных сметных норм и нормативов.

5. Проведение практических сметных расчетов по реальным объектам.

6. Обобщение практического опыта сметных расчетов с созданием и утверждением прейскурантов физических и стоимостных показателей на единицу мощности создаваемой строительной продукции для различных типов площадочных и линейно-протяженных объектов.

Основными отличительными особенностями и преимуществами предлагаемой методологии определения сметной стоимости крупномасштабных строек являются [2]:

1. Возможность определения стоимости строительства на любой стадии сметных расчетов, а именно прединвестиционной, предпроектной, проектной, строительной и эксплуатационной, а также оценки стоимости недвижимости с целью ее продажи, ликвидации или реинвестирования, на основе эффективных алгоритмов и многоплановой сметной нормативной базы как укрупненной на единицу мощности создаваемой строительной продукции, так и элементной по детальным видам работ.

2. Высокая точность сметных расчетов при полном или частичном отсутствии рабочей документации по проектируемому объекту (в составе прединвестиционной документации, обоснований инвестиций, проектной, конкурсной и другой документации), не превышающая 10% отклонений от смет, составляемых по рабочим чертежам, на основе эффективных алгоритмов и сметных нормативных баз, в том числе по объектам-представителям.

3. Возможность расчета стоимости строительства для любой стадии инвестиционного процесса в текущих ценах на основе ресурсных методов расчета и эффективной системы мониторинга цен на ресурсы-представители.

4. Возможность расчета стоимости строительства в прогнозных ценах на основе механизмов прогнозной оценки стоимости всех видов ресурсов и затрат.

5. Возможность определения прогнозной стоимости строительства любых типов инвестиционно-строительных проектов за счет разработанных механизмов сметных расчетов и сметных нормативных баз на единицу мощности линейно-протяженных (1 км трассы) и площадочных (1 м^3 и 1 м^2 здания) объектов.

6. Возможность определения стоимости строительства объектов для различных природно-климатических условий за счет наличия укрупненных и элементных сметных нормативных баз, учитывающих особые условия строительства линейно-протяженных и площадочных объектов в конкретном регионе.

7. Возможность более эффективного обоснования договорных цен на создание строительной продукции, выполнение подрядных работ и поставку ресурсов.

8. Возможность более объективного формирования федеральных, отраслевых, региональных и корпоративных элементных сметных норм и расценок на основе более эффективной системы технического и тарифного нормирования, мониторинга текущих цен на ресурсы, а также учета эффективных методов организации строительства. Это позволяет более обоснованно формировать физические нормативы (трудозатраты, машиноёмкость, потребные материалы), а также стоимостные показатели на выполнение работ и услуг.

Сформулированные и некоторые другие преимущества предлагаемой системы достигнуты за счет создания более эффективных по сравнению с другими разработчиками, методологии и информационной технологии сметных расчетов и нормативных баз, а именно [2]:

1. Системному подходу к определению стоимости строительства, учитывающему:

- тип инвестиционно-строительных проектов;
- участника инвестиционного процесса, для которого выполняются сметные расчеты;
- вид документации, в котором выполняются сметные расчеты (прединвестиционная, предпроектная, проектная, конкурсная, договорная, строительная или эксплуатационная);
- региональные особенности расчета цен;
- источники финансирования строительства.

Применительно к выше сформулированным и некоторым другим факторам разработана информационная технология определения сметной стоимости строительства крупномасштабных строек, внедренная при сооружении магистральных газопроводов, отвечающая международным стандартам. При ее разработке обобщен передовой мировой опыт практических сметных расчетов строительства крупнейших инвестиционно-строительных проектов в России и зарубежом.

2. Системным принципам и информационной увязкой всех задач стоимостного инжиниринга, позволившим определить особые требования к каждой отдельной задаче и разработать более эффективные методики и сметные нормативные базы. К примеру, к сметным расчетам на прединвестиционной стадии и ранних стадиях проектирования были предъявлены особые требования к их точности в зависимости от типа объекта и его территориального расположения.

3. Универсальностью предлагаемой системы по применению различных методов сметных расчетов, а именно ресурсного, ресурсно-ранжирного, ресурсно-индексного и базисно-индексного, в зависимости от реальной ситуации и возможностей участников инвестиционного процесса. Кроме того, даются рекомендации наиболее эффективного их применения в текущей, среднесрочной и долгосрочной перспективе с целью повышения точности и обоснованности сметных расчетов. К примеру, для линейно-протяженных объектов (ЛПО) предпочтение отдается ресурсному методу сметных расчетов, т.к. номенклатура ресурсов для организации системы мониторинга их цен относительно невелика. Для площадочных объектов со значительной номенклатурой необходимых для строительства ресурсов предпочтение отдается ресурсно-ранжирному методу, позволяющему значительно сократить номенклатуру ресурсов с обоснованием базы данных ресурсов-представителей, обеспечивающих достаточную точность прогнозных сметных расчетов прямых и других видов затрат.

4. Основой для проведения сметных расчетов, независимо от их стадийности, должны быть физические показатели, а именно физические объемы работ, трудозатраты, машиноёмкость, потребные материалы и оборудование. При их отсутствии, используя предлагаемую (или разрабатываемую дополнительно) базу данных объектов-представителей (в которой на 1 км трассы ЛПО или 1 м³ здания имеются типовые объемы работ и другие физические показатели), пользователи информационной системы, подключив базу данных рыночных цен на ресурсы, имеет возможность получить ресурсные и традиционные локальные сметные расчеты, служащие основой для формирования объектных и сводных сметных расчетов. При этом информационная система предусматривает возможность расчета накладных расходов, сметной прибыли и прочих затрат как нормативным, так и калькуляционным методами.

5. При отсутствии у предприятий возможности формирования локальных сметных расчетов в детальной номенклатуре работ в предлагаемой системе предусмотрена база данных (или возможность ее расширение под конкретного пользователя) укрупненных физических и стоимостных показателей на 1 км трассы ЛПО или 1 м³ (1 м²) здания (сооружения), а также алгоритмы расчетов, обеспечивающие достаточную точность локальных сметных расчетов в укрупненной номенклатуре строительно-монтажных работ и ресурсов.

Основными задачами всех участников капитального строительства в области совершенствования определения сметной стоимости крупномасштабных строек являются [2]:

1. Совершенствование федеральной сметной нормативной базы с разработкой новых норм и поправок к старым, учитывающих новые технологии и методы организации строительства, новые материалы, механизмы и оборудование.

2. Совершенствование отраслевых, региональных и корпоративных сметных нормативных баз, учитывающих специфику регионов, отраслей и корпораций.

3. Разработка ресурсно-технологических моделей физических объемов работ на единицу мощности строительной продукции по объектам-представителям с региональной привязкой.

4. Разработка системы мониторинга рыночных цен на ресурсы и системы маркетинга выбора наиболее эффективных поставщиков ресурсов.

5. Разработка сметных норм и нормативов затрат на временные здания и сооружения, накладные и прочие расходы.

6. Разработка программных комплексов (ПК) и баз данных для расчета стоимости строительства различных типов объектов.

7. Расчеты (экспертиза) стоимости строительства различных типов объектов на основе разработанных ПК в составе прединвестиционной, предпроектной, проектной, конкурсной, договорной и другой документации.

8. Разработка прейскурантов текущих и прогнозных цен на строительство различных типов объектов (по результатам практических сметных расчетов на основе ПК и ресурсно-технологических моделей объектов-представителей).

9. Эффективное участие в экспертизе сметной документации и согласовании договорных цен.

10. Эффективное участие в разработке и экспертизе конкурсной документации.

Необходимо отметить, что создание предлагаемой системы должно осуществляться поэтапно и может осуществляться последовательно или параллельно с разработкой механизмов определения стоимости строительства и капитального ремонта линейно-протяженных и площадочных объектов. К примеру, по объектам ОАО «Газпром» информационная система создается для: магистральных и промысловых трубопроводов из стальных труб; газопроводов в городских и сельских населенных пунктах из стальных и полиэтиленовых труб; линий электропередач; автомобильных дорог; компрессорных и насосных станций; промысловых сооружений; объектов жилищно-социального характера и т.д. При этом наиболее сложной задачей является разработка механизмов прогнозных сметных расчетов на прединвестиционной стадии и ранних стадиях проектирования, обеспечивающих не более 10% отклонения от смет, составленным по рабочим чертежам. Для решения этой задачи, помимо элементной сметной нормативной базы для необходимых видов работ и регионов, разрабатываются ресурсно-технологические модели по объектам-представителям, в которых формируется информация физических объемов работ, трудоемкости, механоемкости, потребных материалах на 1 км трассы ЛПО или 1 м³ (1 м²) площадочных объектов, а также текущие и прогнозные цены на все виды ресурсов. Указанная база данных позволит при полном или частичном отсутствии рабочей документации автоматизированно с помощью программных комплексов формировать ресурсные и традиционные локальные сметные расчеты, а также объектные и сводные сметы. Указанные расчеты позволят автоматизированно формировать прейскуранты цен на строительство линейно-протяженных и площадочных объектов различных типов в различных регионах, т.е. на 1 км трассы ЛПО и 1 м³ (1 м²) площадочных сооружений пользователи информационной системы, вводя в компьютер имеющийся минимум исходных данных натуральных

показателей (к примеру длину отрезка трубопровода с привязкой ее к местности, диаметр и толщину стенки трубы) должны получать автоматизированно полный объем сметной документации с ведомостями физических объемов работ и потребными ресурсами. При появлении прейскурантов пользователям системы предоставляется возможность оценки стоимости строительства не только автоматизированно, но и упрощенно вручную, что удобно для работников высшего звена управления.

Решение сформулированных задач требует создание команды разработчиков системы-специалистов высокой квалификации, и не только сметчиков, экономистов и технологов, но и опытных проект и топ менеджеров, т.к. разработка, к примеру, организационно-технологических моделей по объектам-представителям требует квалификационной обработки информации и принятия решений по многочисленным технологиям производства работ, используемым материально-техническим ресурсам, вынужденным простоям строительной техники по природно-климатическим условиям, условиям поточной организации строительства объектов и т.д. Кроме того, требует особой квалификации разработка механизмов определения не только прямых затрат, но и накладных расходов, затрат на временные здания и сооружения, зимних удорожаний, затрат на содержание службы заказчика, непредвиденных расходов, сметной прибыли, а также различных видов прочих затрат не на основе их нормативного начисления от определенной базы, а дифференцированным путем калькулирования всех элементов затрат по аналогии с прямыми затратами.

Опыт внедрения предлагаемой системы в ОАО «Газпром» при разработке и реализации крупномасштабных инвестиционных проектов, к примеру, Северного потока, включающего в себя как линейно-протяженные, так и площадочные объекты, показывает высокую эффективность разработанных методик и нормативных баз, к примеру, применение методик определения сметной стоимости строительства объектов ОАО «Газпром» позволило значительно повысить точность, достоверность и преемственность сметных расчетов. В свою очередь повышение эффективности сметных расчетов позволило более обоснованно формировать планы капитального строительства и другую документацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананенков, А.Г. Система управления разработкой и реализацией инвестиционных проектов и программ в корпорации и ее дочерних обществах [Текст] / А.Г. Ананенков, В.С. Резниченко, Л.С. Чугунов, Н.Н. Ленинцев // Справочное пособие для специалистов. Под общей редакцией профессоров А.Г. Ананенкова и В.С. Резниченко. – М.: Индрик, 2008.
2. Резниченко, В.С. Определение сметной стоимости крупномасштабных строек на всех стадиях инвестиционного процесса [Текст] / В.С. Резниченко, Н.Н. Ленинцев, В.В. Павлов. – М.: Светотон, 2012.

В.С. Резниченко

Межотраслевой институт информационных технологий инвестирования, г. Москва
Доктор технических наук, профессор

О.В. Бель

Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет, г. Санкт-Петербург
Кандидат экономических наук

V. REZNICHENKO, O. BELL

INFORM TECHNOLOGIA MANAGEMENT AND COST DEFINITION LARGE-SCALE CONSTRUCTIONS

In article examination complex researcher problem management, pricing end definition cost large-scale constructions. Summary recommendation on optimismion expenditure investorov, develop-

ers and by contract organizations behind account application more effective methodology and estimated standard.

Keywords: *management, pricing, cost, large-scale constructions.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ananekov, A.G. Sistema upravlenija razrabotkoj i realizaciej investicionnyh proektov i pro-gramm v korporacii i ee dochernih obshhestvah [Tekst] / A.G. Ananekov, V.S. Reznichenko, L.S. Chugunov, N.N. Lenincev // Spravochnoe posobie dlja specialistov. Pod obshhej redakciej professorov A.G. Ananekova i V.S. Reznichenko. – M.: Indrik, 2008.
2. Reznichenko, V.S. Opredelenie smetnoj stoimosti krupnomasshtabnyh stroek na vseh stadijah investicionnogo processa [Tekst] / V.S. Reznichenko, N.N. Lenincev, V.V. Pavlov. – M.: Svetoton, 2012.

V. Reznichenko

Interdisciplinary Institute of information technology investments, Moscow
Doctor of technical sciences, professor

O. Bell

St. Petersburg state engineering and economic university, Saint-Petersburg
Candidate of economic sciences

СНЕЖКОВ Д.Ю., ЛЕОНОВИЧ С.Н.

МОНИТОРИНГ ВОЗВОДИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА: МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ, КРИТЕРИИ СООТВЕТСТВИЯ

Рассмотрены вопросы мониторинга прочностных показателей бетона возводимых конструкций неразрушающими методами с позиций нормативов, действующих в Республике Беларусь, Российской Федерации и странах Евросоюза. На основе статистики натуральных испытаний бетона монолитных конструкций рассматриваются критерии его соответствия классу по прочности, предлагаются пути повышения эффективности контроля.

Ключевые слова: монолитный бетон, прочность, неразрушающий контроль, методы, комбинирование, нормативы.

Значительную востребованность в качестве основы производственно-технологического контроля в монолитном строительстве в Республике Беларусь приобретают оперативные неразрушающие методы определения прочностных показателей бетона: они могут использоваться как на ранних стадиях его твердения - при оценке распалубочной прочности и в процессе выдерживания, обеспечивая сплошной контроль строительной продукции, так и при выполнении мониторинга прочностных параметров бетона наиболее ответственных монолитных конструкций, до достижения ими проектных значений. Не менее важна роль неразрушающего контроля при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений, особенно эксплуатируемых в условиях динамических нагрузок, а также при выполнении работ, связанных с реконструкцией.

Растущее распространение неразрушающего контроля бетона в конструкциях и накопленная статистика результатов испытаний заставляет более внимательно взглянуть на используемые методы испытаний и принятые оценочные критерии. Основная проблема неразрушающих испытаний бетона конструкций заключается в том, что измерительные процессы известных неразрушающих методов испытания прочности бетона [8, 9] не являются адекватными по напряженно-деформированному состоянию бетона в зоне контроля ни друг другу, ни процессу прессового испытания бетонного образца на одноосное сжатие по ГОСТ 10180-90 [1]. Проявляется это в том, что косвенные параметры неразрушающих методов испытаний в разной степени подвержены влиянию изменений физико-механических свойств контролируемого бетона. Это значит, что оценки прочности неразрушающими методами будут зависеть не только от фактической прочности бетона (определяемой прессовыми испытаниями образцов), но и от других его характеристик: модуля упругости, динамической вязкости, структурной неоднородности и др.

Безусловно, вариации физико-механических свойств бетона оказывают влияние и на результаты метода прессовых испытаний. Но поскольку этот метод принят в качестве эталонного, то его результат рассматривается как «истинная» оценка прочности бетона, а все остальные методы должны на нее «равняться».

Другой специфичной проблемой в практике неразрушающего контроля железобетонных конструкций является обоснование выбора критериев соответствия фактической прочности бетона нормативным показателям.

1. Методы контроля

Практика неразрушающих испытаний бетона показывает, что даже строгое следование указанным в нормативах методикам построения градуировочных зависимостей совершенно не гарантирует адекватности результата неразрушающего определения прочности бетона в кон-

струкциях, данным прессовых испытаний, изъятых из массива образцов [10]. В частности, оценки прочности бетонного массива ультразвуковым импульсным методом получаются, как правило, несколько заниженными, методом упругого отскока (молоток Шмидта) – завышенными. На рисунке 1 приведены данные совместных испытаний монолитных колонн методом упругого отскока и ультразвуковым импульсным методом на объекте монолитного строительства в г. Минске в 2013 г.

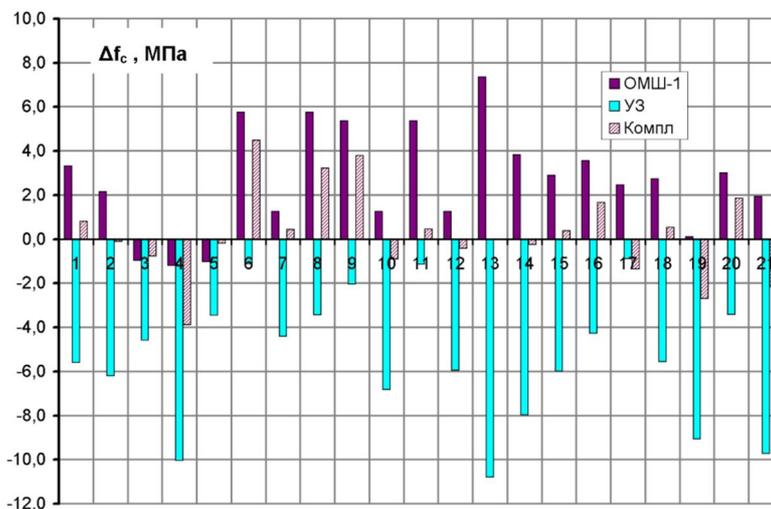


Рисунок 1 – Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн квадратного 400×400 мм сечения от оценок методом отрыва со скалыванием (бетон проектного класса С35/45, срок твердения – 30...35 сут.)

Среднее значение прочности бетона $f_{cm,SKOL}$ группы из 21 колонны по данным метода отрыва со скалыванием составило 44,7 МПа. Коэффициенте вариации оценок прочности методом упругого отскока составил $V_f=8,10\%$, для ультразвукового метода $V_{us}=7,5\%$. Для комбинированного метода $V=4,35\%$. Заметно смещены от нуля средние значения отклонений Δf_c каждого из неразрушающих методов для всей группы колонн: оценки метода упругого отскока несколько завышены, а ультразвукового метода – занижены. Типичное отношение оценок прочности методом упругого отскока и ультразвуковым методом находится в пределах 1,06..1,18. Это свидетельствует о некотором несоответствии использованных градуировочных зависимостей фактическим соотношениям прочности бетона и косвенных параметров неразрушающих методов. Некоторые возможные причины этого указаны выше. Но к ним, по нашему мнению, следует добавить еще одну, - отличие процессов неразрушающих методов в крупноразмерном элементе конструкции и в малоразмерном образце, используемом в градуировочных испытаниях. Обычно измерение скорости распространения ультразвукового (УЗ) импульса в образце-кубе производят устанавливая излучающий и приемный преобразователи на диагонали в плоскости одной грани. Для куба размерами 100×100×100 мм длина диагонали составляет 141 мм. При измерительной базе прибора «Пульсар-1.1» в 120 мм точки акустического контакта преобразователей будут отстоять от вершин куба всего лишь на ~1 см, что приводит к значительному отличию волновой картины образца от картины формирующейся в элементе конструкции, имеющего размеры на порядок большие. При использовании прибора УК1401 (измерительная база – 150 мм) приходится использовать кубы 150×150×150 мм. Даже в этом случае расстояние от точек акустического контакта до граней образца составляет ~17 мм, что меньше половины длины волны импульса. Близость границ образца к точкам возбуждения и приема акустического импульса проявит себя эффектами интерференции прямой и отраженных волн, что выразится в изменении амплитуды и длительности акустического импульса в точках возбуждения и приема. В итоге, эти изменения импульса могут проявить себя уменьшением отсчета времени распространения, а это, соответственно, исказит градуировочную зависимость.

На рисунке 1 приведены временные диаграммы нормированных значений упругих деформаций образца в точках, расположенных на его оси по направлению распространения волны, полученные конечно-элементным моделированием процесса распространения ультразвукового импульса в бетонном образце-цилиндре. Возбуждение импульса точечное в центре торца образца-цилиндра. Иницирующий силовой импульс – половина синусоиды периодом 14 мкс, амплитуда импульса – 1 Н.

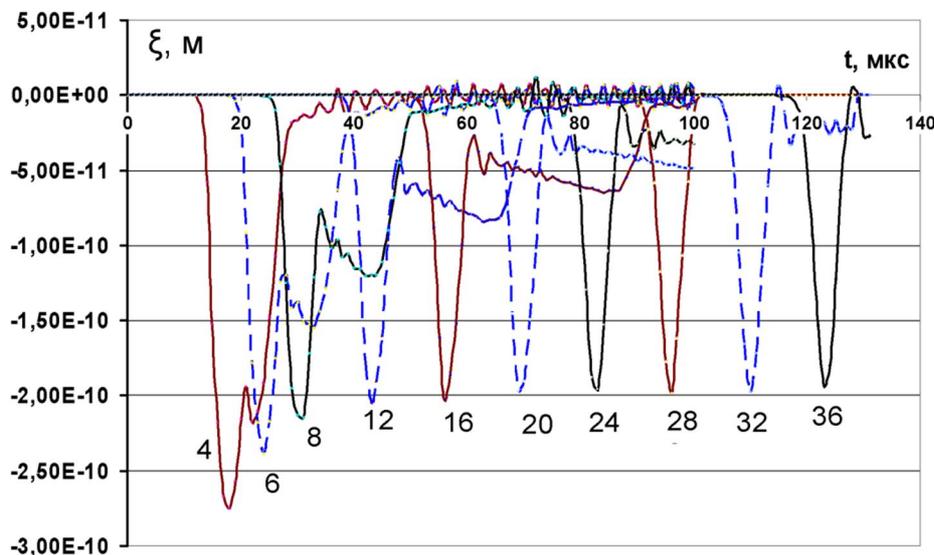


Рисунок 2 – Временные диаграммы волнового импульса продольной волны в протяженном цилиндрическом образце (цифры у вершин импульсов соответствуют расстоянию Z (в сантиметрах) от точки возбуждения импульса; параметры материала модели: E=20 ГПа; ν=0,2; ρ=2400 кг·м⁻³)

Теоретически энергия акустического импульса продольной волны должна уменьшаться прямо пропорционально квадрату расстояния Z пройденного волной, а амплитуда деформации (смещения узлов модели) ξ - уменьшаться прямо пропорционально первой степени пройденного волной расстояния Z в соответствии с выражением:

$$\xi = \xi_0 \cdot \frac{Z_0}{Z},$$

где Z₀ и ξ₀ - соответственно опорные координата и амплитуда деформации.

Нормирование амплитуды выполнялось в соответствии с выражением:

$$\xi_{norm} = \xi \cdot \frac{Z}{Z_0},$$

где ξ_{norm} – нормированная амплитуда импульса; ξ – фактическая амплитуда; Z₀ принято равным 4 см.

На расстоянии Z<8 см от излучателя амплитуда волнового импульса заметно превышает уровень установившейся волны, соответствующий процессу распространения волны в квазибесконечной среде. Форма импульса также претерпевает изменения. Аналогично, в соответствии с принципом обратимости, амплитуда импульса продольной волны в точке приема вблизи границы образца, также будет увеличена за счет интерференции ее с отраженной волной от границы. В итоге, общее затухание импульса от точки возбуждения до точки приема может снизиться в 4 раза, а длительность импульса – удвоится. При регистрации момента появления ультразвукового импульса по превышению им установленного порога это приведет к завышенному значению скорости распространения.

Для метода упругого отскока знак поправки отрицательный. Это можно объяснить уменьшением приведенного значения модуля упругости бетона в точке индентирования. Возможной причиной этого может являться увеличение диссипации энергии импульса упругой

деформации на переходах *бетонный образец – плита пресса – элементы подвески плиты*, за счет их динамического вовлечения в силовое взаимодействие при инденторных испытаниях бетонных образцов. Но следует заметить, что увеличение гибкости и подвижности связанной системы *бетонный образец – плита пресса – элементы подвески плиты* приведет к увеличению времени t_{ind} ударного взаимодействия индентора прибора с бетонным образцом,

$$\int_0^{t_{ind}} F_{ind}(t) \cdot dt = M \cdot V_{ind},$$

где M – масса индентора (бойка); V_{ind} – предупредная скорость индентора.

Следствием этого явится уменьшение амплитудного значения силы ударного взаимодействия F_{ind} и, соответственно, - уменьшение объема пластической деформации в точке испытаний, и рост индекса отскока. Таким образом, при инденторных испытаниях малоразмерных бетонных образцов зажатых между плитами испытательного пресса, можно выделить два физических процесса, имеющих противоположное влияние на индекс отскока.

Повысить надежность оценки прочностных параметров бетона возможно на основе комбинирования методов, объединяя несколько - обычно два физически разных метода – обладающих свойством *комплементарности* [7, 9]. В Евростандарте DIN EN 13791-2009 разработчиками предусмотрена лишь ссылка на так называемые национальные предписания и специальную литературу по вопросу комбинирования методов испытаний, конкретной же методики комбинирования неразрушающих методов в этом документе нет. Поэтому, определенный интерес может представлять опыт практического использования авторами комбинированного метода, включающего в себя метод упругого отскока [6] и ультразвуковой импульсный метод [5].

Комбинированная оценка прочности бетона $f_{c,\Sigma}$ определялась по формуле:

$$f_{c,\Sigma} = \frac{f_{c,us} + \omega \cdot f_{c,sh}}{1 + \omega}, \quad (1)$$

где $f_{c,us}$, $f_{c,sh}$ оценки прочности соответственно – ультразвуковым методом и методом упругого отскока; ω – весовой коэффициент: $\omega = 1,6$ для конструктивных бетонов классов С25/30..С35/45, возрастом 14..28 суток и при условии:

$$\left| \frac{f_{c,us} - f_{c,sh}}{f_{c,us} + f_{c,sh}} \right| \leq 0,15.$$

Об эффективности комбинированного метода могут дать представление результаты испытаний монолитных конструкций, находившихся в замороженном состоянии и испытаний после оттаивания. Напомним, что из-за образования льда в структуре бетона действующими нормативами [5, 6] предписан ряд ограничений на использования неразрушающих методов испытаний бетона. На рисунке3 приведены диаграммы испытаний прочности бетона колонн находившихся на момент испытаний в замороженном состоянии более 5 суток Температура бетона на момент испытаний составляла -8°C . До замораживания твердение бетона обеспечивалось применением электропрогрева в течение полутора суток непосредственно после укладки бетонной смеси, с последующим выдерживанием без снятия опалубки. Характерным для замороженного бетона явилась смена знаков поправок для неразрушающих методов испытаний практически по всем испытанным колоннам: ультразвуковой метод стал давать завышенные оценки, а метод упругого отскока – заниженные. Кроме смены знака отклонений оценок прочности значительно увеличились и сами отклонения, если для конструкций твердевших и испытанных в нормальных условиях отклонения оценок прочности (в среднем) находились в пределах 3,5..4,5 МПа, то для замороженного бетона этот показатель возрос до 8..13 МПа. Характерным явилось и отрицательное значение коэффициента взаимной корреляции оценок прочности молотком Шмидта и ультразвуковым методом: $r_{Sh,us} = -0,24$.

Приведенные результаты, в целом, согласуются с представлениями о физике процессов использованных неразрушающих методов. При малых значениях влажности замена поровой влаги льдом приводит к увеличению динамического модуля упругости бетона, а это, в свою

очередь, дает приращение скорости распространения ультразвукового импульса и, соответственно, - завышение оценки прочности. Снижение оценок метода упругого отскока также можно объяснить увеличением модуля упругости бетона при постоянной прочности.

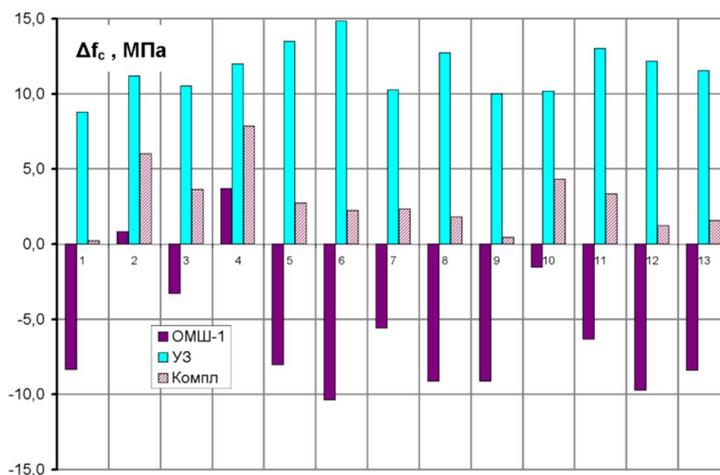


Рисунок 3 - Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн от оценок методом отрыва со скалыванием (бетон проектного класса С35/45, возраст бетона – 11...14 суток после электропрогрева и замораживания, температура бетона на момент испытаний -8°С)

На рисунке 4 приведены данные испытаний тех же колонн после оттаивания в течение 10 суток при средней температуре воздуха +5°С.

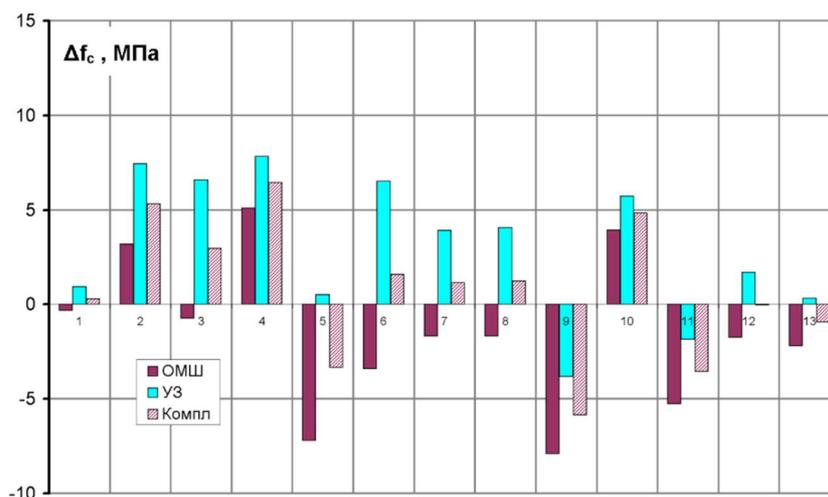


Рисунок 4 - Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн от оценок методом отрыва со скалыванием (бетон проектного класса С35/45, срок твердения – 23...26 суток после электропрогрева, замораживания и оттаивания, температура бетона на момент испытаний +5°С)

Разброс оценок прочности каждым из методов заметно уменьшился, а коэффициент корреляции оценок прочности поменял знак на положительный и увеличился до значения 0,72.

На рисунке 5 приведены абсолютные значения оценок прочности бетона по каждой из колонн и средние значения прочности для всей группы из 13 колонн.

На приведенных диаграммах можно отметить две особенности, свидетельствующие в пользу применения комбинированного метода (1) неразрушающих испытаний бетона в конструкциях:

- показатели испытаний оттаявшего бетона (показаны треугольными маркерами) не выходят за пределы области ограниченной значениями этих же показателей (круглые маркеры) для замороженного бетона;

- средние значения прочности по данным комбинированного метода для всей группы колонн (показаны горизонтальными линиями на рис. 5) практически совпадают, - для замороженного бетона $f_{cp} = 42,1$ МПа, для оттаявшего - $f_{cp} = 43,5$ МПа.

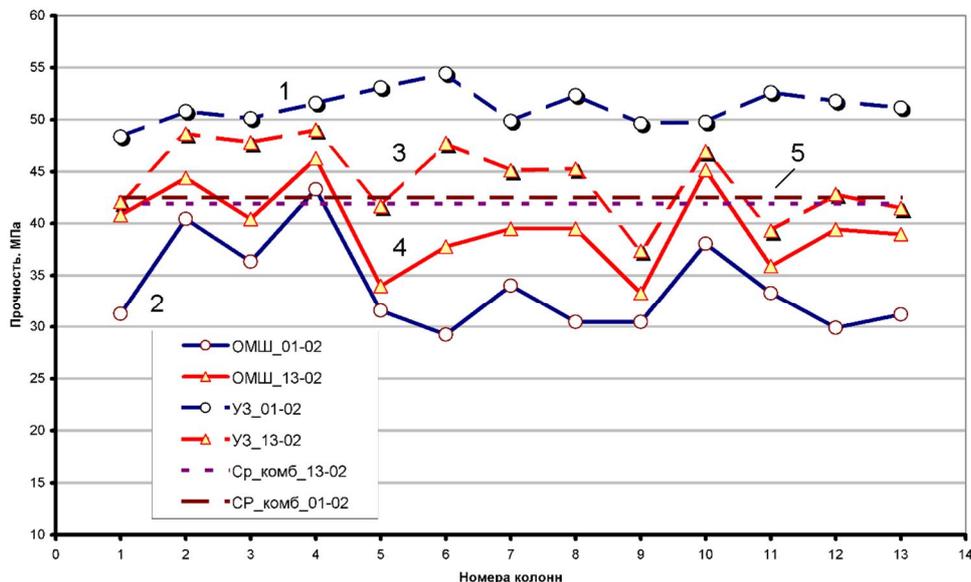


Рисунок 5 - Прочность бетона монолитных колонн по данным неразрушающих методов испытаний: проектный класс бетона по прочности С35/45

- 1 – оценки прочности замороженного бетона ультразвуковым методом;
- 2 – оценки прочности замороженного бетона методом упругого отскока;
- 3 – оценки прочности бетона после оттаивания ультразвуковым методом;
- 4 – оценки прочности бетона после оттаивания методом упругого отскока;
- 5 – средняя прочность бетона всей группы колонн комбинированным методом

2. Критерии соответствия

Критериальным показателем бетона для отнесения его к тому или иному классу по прочности является так называемая характеристическая прочность бетона f_{ck} , соответствующая обычно 5-процентному квантилю статистического распределения значений прочности бетона образцов – призм, цилиндров или кубов. Для нормального закона распределения связь среднего значения оценок прочности с характеристической выражается зависимостью:

$$f_{ck} = f_{m(n)} - k \cdot s, \quad (2)$$

где s - стандартное отклонение результатов испытаний; f_{ck} - характеристическая (гарантированная) прочность на сжатие бетона в конструкции; $f_{m(n)}$ - среднее значение n -результатов испытаний прочности на сжатие бетона; k – коэффициент доверия.

Статистическая обеспеченность характеристической прочности по формуле (2) составляет 95% для $k=1,64$.

С 2010 года в Республике Беларусь введен, разработанный на основе Евростандарта DIN EN 13791-2009 [12], норматив СТБ EN 13791-2012 [3], регламентирующий методики и критерии отнесения бетона контролируемой конструкции к тому или иному классу по прочности для неразрушающих испытаний. В соответствии с данным документом коэффициент доверия $k = 1,48$. Существенным отличием Евростандарта DIN EN 13791-2009 и, соответственно, СТБ EN 13791-2012 от других действующих в республике нормативов является иной критерий соответствия бетона конструкций к классу по прочности, - Евростандарт допускает снижение характеристической прочности бетона конструкций и сборных элементов на 15% относитель-

но класса по СТБ EN 206-1-2009 [4]) используемого бетона. Все остальные нормативы не допускают снижения прочностных показателей бетона в конструкции, несмотря на то, что различия условий формирования структуры бетона малоразмерного испытательного образца в условиях испытательной лаборатории, такого же образца – в условиях строительной площадки, и массивной армированной конструкции очевидны. Такой подход к оценке способствует возникновению конфликтности отношений между проектировщиком, производителем бетонных работ и заказчиком. Сопоставить рассмотренные критерии соответствия позволяет приведенная ниже статистика испытаний бетона ряда объектов монолитного строительства в г. Минске.

На рисунках 6 и 7 приведены гистограммы данных испытаний более 110 монолитных колонн из бетона проектных классов С25/30 и С30/37 каждого на однотипных объектах строительства.

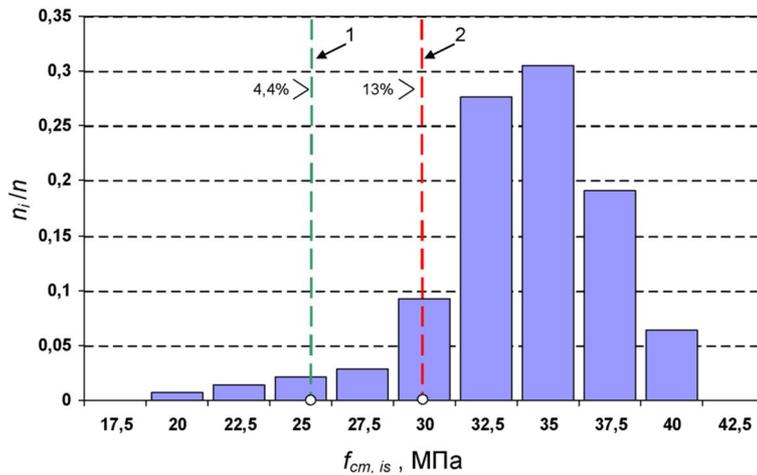


Рисунок 6 - Гистограмма оценок характеристической прочности бетона вертикальных шахт и диафрагм жесткости (проектный класс бетона по прочности – С25/30; n = 141)

1 – линия гарантированного значения прочности по СТБ EN 13791-2012 (26 МПа);

2 – линия гарантированного значения прочности по СНБ 5.03.01 (30 МПа)

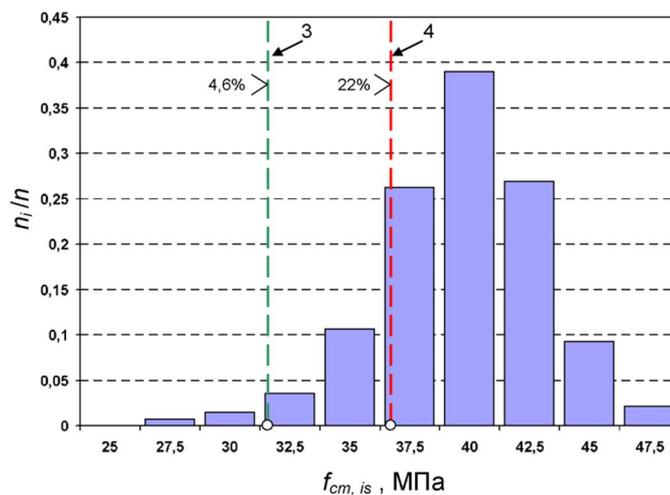


Рисунок 7 - Гистограмма оценок характеристической прочности бетона монолитных колонн (проектный класс бетона по прочности – С30/37; n=112)

3 – линия гарантированного значения прочности по СТБ EN 13791-2012 (31 МПа);

4 – линия гарантированного значения прочности по СНБ 5.03.01 (37 МПа)

Данные получены комплексным неразрушающим методом (1), объединяющим метод упругого отскока по ГОСТ 22690 (СТБ 2264-2012) и ультразвуковой импульсный метод по ГОСТ 17624-87 [6]. Для ОМШ-1 в качестве градуировочной использовалась линейная зависимость вида:

$$f_{c,sh} = -39,6 + 2,364 \cdot h, \text{ МПа},$$

где $f_{c,sh}$ – оценка «кубиковой» прочности бетона на сжатие методом упругого отскока; h – индекс отскока (показания склерометра в делениях шкалы).

Градуировочная зависимость для ультразвукового метода контроля (приборы УК1401 и «Пульсар-1.0»):

$$f_{c,us} = k \cdot 479 \cdot \exp(-0,0718 \cdot t_{150}), \text{ МПа},$$

где $f_{c,us}$ – оценка «кубиковой» прочности бетона на сжатие ультразвуковым импульсным методом; t_{150} – время распространения ультразвукового импульса на базе измерения 150 мм, мкс; k – поправочный коэффициент на возраст бетона (для бетона возраста более 90 сут. $k = 1,1$).

Установленные по СТБ EN 13791-2012 значения характеристической прочности бетона обеспечивают устойчивое подтверждение проектного класса бетона для 95% конструкций. По установленной же действующим СНБ 5.03.01 гарантированной прочности браковке подлежат 22% конструкций из бетона С30/37 и 13% - из бетона С25/30. Рост процента несоответствия проектному показателю по прочности закономерно наблюдался с повышением класса используемых бетонов, - от С25/30 и до С35/45 включая.

Заключение

1. При оценке свойств бетон следует рассматривать как материал со значительной случайной составляющей характеристических параметров, подчиняющейся нормальному распределению, основной причиной которой являются вариации состава бетона и технологии бетонирования. Систематическая составляющая в оценке характеристической прочности бетона неразрушающими методами испытаний обусловлена двумя факторами: неадекватностью напряженно-деформированного состояния бетона в зоне контроля при неразрушающих и прессовых испытаниях; и неполной адекватностью процессов неразрушающих испытаний в железобетонной конструкции и малоразмерных образцах бетона.

2. Повышение надежности в оценки характеристической прочности бетона возможно на основе комбинирования стандартизированных методов неразрушающих испытаний. Опыт практического использования комбинированного метода позволяет рекомендовать его в качестве основы для введения в систему нормирования неразрушающих испытаний бетона.

3. Разница между прочностью на сжатие бетона в конструкции и прочностью стандартных испытательных образцов неизбежна. СТБ EN 13791-2012 допускает снижение прочности бетона в конструкциях: критериальный порог – гарантированная (характеристическая) прочность – снижен на 15%. Этот пункт радикально отличает данный Евростандарт от действующих на данный момент стандартов Беларуси и России. Представленная статистика данных испытаний бетона монолитных конструкций ряда объектов строительства в Республике Беларусь подтверждает правомерность выбранного критерия и позволяет рекомендовать его к использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]: ГОСТ 10180-90. – Введ. 01.01.91. – М.: 1991. – 16 с.
2. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 139 с.
3. Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях [Текст]: СТБ EN 13791-2012. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012.
4. Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие [Текст]: СТБ EN 206-1-2009.
5. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности [Текст]: ГОСТ 17624-87. – Введ. 01.01.88. – М.: 1988. – 12 с.
6. Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности [Текст]: СТБ 2264-2012, Госстандарт, Минск, 2013. – 20 с.
7. Леонович, С.Н., Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом / С.Н. Леонович, Д.Ю. Снежков // «Известия вузов. Строительство». – Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. – 2009. – №8. – С. 108-115.
8. Леонович, С.Н. Оценка характеристической прочности на сжатие бетона в конструкциях посредством косвенных методов испытаний [Текст] / С.Н. Леонович., В.В. Тур, Д.Ю. Снежков // Безопасность строительного

фонда России. Проблемы и решения: мат. междунар. академических чтений. – Курск: Курский гос. ун-т, 2010. – С. 160-166.

9. Снежков, Д.Ю., Неразрушающий контроль бетона монолитных конструкций [Текст] / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Строительная наука и техника. – Минск. – 2009. – №4(25). – С. 76-84.

Д.Ю. Снежков

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология строительного производства»

E-mail: snezhkov-d-u@yandex.ru

С.Н. Леонович

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология строительного производства»

E-mail: SLeonovich@mail.ru

D. SNEZHKOVA, S. LEONOVICH

**MONITORING OF CAST IN PLACE CONCRETE
CONSTRUCTION BY NON DESTRUCTIVE TESTING:
METHODS, CRITERIA OF CONFORMITY**

Questions of monitoring strength parameters of cast in place concrete on construction by non destructive nesting methods from positions of the normatives acting in Byelorussia, the Russian Federation and the European Union countries are considered. On the basis of statistics of in situ concrete testing its conformity to the strength class-parameter are observed, paths of raise of monitoring efficiency are offered.

Keywords: cast in place concrete, strength, non-destructive testings, methods, combination, normatives acting.

BIBLIOGRAPHY

1. Betonnyy. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam [Tekst]: GOST 10180-90. – Vved. 01.01.91. – М.: 1991. – 16 s.
2. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii [Tekst]: SNB 5.03.01-02. – Minsk: Ministroyarhitektury, 2003. – 139 s.
3. Ocenka prochnosti na szhatie konstrukcij i jelementov sbornogo betona v real'nyh uslovijah [Tekst]: STB EN 13791-2012. – Minsk: RUP «Strojtehnorm», 2012.
4. Beton. Chast' 1. Trebovanija, pokazateli, izgotovlenie i sootvetstvie [Tekst]: STB EN 206-1-2009.
5. Betonnyy. Ul'trazvukovoj metod opredeleniya prochnosti [Tekst]: GOST 17624-87. – Vved. 01.01.88. – М.: 1988. – 12 s.
6. Ispytanie betona. Nerazrushajushhij kontrol' prochnosti [Tekst]: STB 2264-2012, Gosstandart, Minsk, 2013. – 20 s.
7. Leonovich, S.N., Issledovanie neravnoprochnosti betona na ob#ekte monolitnogo stroitel'stva kompleksnym nerazrushajushhim metodom / S.N. Leonovich, D.Ju. Snezhkov // «Izvestija vuzov. Stroitel'stvo». – Novosibirskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. – 2009. – №8. – S. 108-115.
8. Leonovich, S.N. Ocenka harakteristicheskoj prochnosti na szhatie betona v konstrukcijah posredstvom kosvennyh metodov ispytaniy [Tekst] / S.N. Leonovich., V.V. Tur, D.Ju. Snezhkov // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i reshenija: mat. mezhdunar. akademicheskikh chtenij. – Kursk: Kurskij gos. un-t, 2010. – S. 160-166.
9. Snezhkov, D.Ju., Nerazrushajushhij kontrol' betona monolitnyh konstrukcij [Tekst] / D.Ju. Snezhkov, S.N. Leonovich // Stroitel'naja nauka i tehnika. – Minsk. – 2009. – №4(25). – S. 76-84.

D. Snezhkov

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Technology of building production»

E-mail: snezhkov-d-u@yandex.ru

S. Leonovich

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Technology of building production»

E-mail: SLeonovich@mail.ru

ФЕДОРОВ В.Т., КОКОЕВ М.Н.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КУПОЛ ИЗ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АРМИРОВАННОГО БЕТОНА

В работе рассматривается электростатический метод формирования армированного бетона. На формообразующую стальную сетку с помощью электрического поля осаждают сухую смесь цемента, песка и армирующих волокон. Слой осажденной на сетку сухой смеси увлажняют тонко распыленной водой с добавлением ПАВ. Тем самым достигают оптимальной величины В/Ц в бетоне. Повторяя процесс, получают слой армобетона заданной толщины. Метод, в частности, удобен для строительства геодезических куполов различного назначения.

Ключевые слова: электростатический метод, армированный бетон, геодезический купол.

В 1997 г. появилась первая работа по так называемому электростатическому армированному бетону [1]. Суть новой технологии в том, что на формообразующий сеточный каркас послойно наносят электростатическим способом сухую смесь цемента, тонкого песка и упрочняющих волокон. Для сухой смеси используют цемент, при размоле которого не применяют гидрофобные добавки. Каждый слой осажденной смеси увлажняют тонкораспыленной водой. Для хорошего смачивания частиц смеси, в воду добавляют небольшое количество поверхностно-активных веществ (ПАВ). Увлажнение слоёв можно делать периодически или непрерывно следом за осаждением сухой смеси. Далее работает физика межфазных явлений. Группы увлажненных порошковых частиц в капиллярах субмикронного диаметра находятся под всесторонним сжимающим давлением капиллярных сил, которые могут достигать величины 0,5...1 МПа. В результате под действием электростатических сил и смачивания осажденные слои смеси уплотняются. Постепенно наращивая слои получают армированный бетон необходимой толщины.

Новый метод наметил возможное решение некоторых задач в технологии бетона, существующих с давних пор. Например, теоретически для твердения распространенных типов цементов требуется воды от 0,12 до 0,20 от массы вяжущего. Однако для повышения удобоукладываемости бетона водоцементное отношение (В/Ц) часто увеличивают до 0,4...0,65. Это снижает прочность готового бетона, либо, при равной прочности, повышает расход цемента.

Таким образом, электростатический метод формирования позволяет получать армированный бетон с отношением В/Ц сколь угодно близким к теоретическому значению. Именно для реализации этой цели сначала наносят сухую цементную смесь на формообразующую сетку и только затем эту смесь дозированно увлажняют. Это позволяет вводить в смесь воды ровно столько, сколько необходимо для получения заданных механических свойств с учетом применяемой марки цемента и состава минеральных добавок.

Кроме того, метод позволяет получать тонкостенный многослойный армированный бетон, каждый слой которого может обладать различными служебными свойствами. Например, первый слой цемента, контактирующий с металлической сеткой и арматурой, может быть выбран с наиболее высоким значением рН, то есть с высокой щелочностью. Это повышает коррозионную стойкость и долговечность стальной сетки. Последующие слои могут быть с особыми механическими или иными свойствами, важными для данного сооружения. Во все слои вводят неорганические армирующие волокна. Например, волокна из щёлочестойкого стекла, базальтовые волокна и др. Наружный слой бетона может быть задан из смеси, обеспечивающей максимальную водонепроницаемость и морозостойкость, а в некоторых случаях и белый цвет оболочки.

Если сравнивать электростатический метод формирования бетона с торкретбетоном, то можно отметить, что для торкретбетона необходимо предварительное сооружение односторонней опалубки. Если, конечно, речь не идет об использовании торкретбетона для туннелей

или горных выработок. Для торкретбетона опалубка должна быть весьма прочной, так как при торкретировании сила удара бетонной смеси об опалубку достигает нескольких кН. Это связано с тем, что торкретбетон вылетает из сопла цемент-пушки и попадает на опалубку со скоростью 80...100 м/с. Есть модели цемент-пушек, где скорость метания смеси достигает 170 м/с. Строительство сложной по форме опалубки для большого сооружения весьма трудоемко и стоит дорого. Перспектива строительства такой опалубки накладывает известные ограничения на архитектурный замысел.

Необходимо заметить, что у давно применяемого торкретбетона есть свои значительные преимущества. В частности, электростатической технологии трудно сравниться с такой высокой производительностью, какая достигается при использовании торкретбетона. Только применение манипулятора с рампой с установленными на ней несколькими электростатическими распылителями для сухой смеси позволит приблизиться по производительности к торкретбетону. Как известно, все новые строительные приемы и методы, обладающие существенными положительными свойствами, рано или поздно находят свою технологическую нишу в строительной практике.

Анализ технологии электростатического армированного бетона показал, что сеточный каркас сооружения, подготовленный для электростатического покрытия армобетонном, в начальный момент необязательно должен иметь большую прочность. Объясняется это тем, что при электростатическом осаждении бетонной смеси частицы садятся на сеточный каркас с относительно небольшой скоростью, равномерно и с постоянным во времени приращением массы осажденного слоя. То есть примерно так, как это происходит в природе, например, при осаждении из атмосферы переохлажденных микрокапель воды на провода при образовании гололеда. Но в отличие от гололеда, процесс электростатического осаждения сухого цемента управляем и происходит на многие порядки быстрее.

Как можно заметить, важная особенность электростатической технологии заключается в том, что при увеличении толщины осажденного слоя цемента его масса растет линейно, а увеличение момента сопротивления сечения происходит пропорционально третьей степени толщины оболочки или мембраны. Таким образом, от арматурно-сеточного каркаса для купола или свода, возводимого таким образом, не требуется обязательной начальной высокой прочности, так как по мере наращивания слоев прочность сооружения растет намного быстрее его массы. Только нужно выполнить обязательное условие - первым слоям бетонной смеси необходимо дать время для набора начальной прочности. Это важное отличие метода от ранее известных способов получения объемных строений. Особенно это касается сооружений типа самонесущего купола, свода или мембраны.

Таким образом, вопрос о прочности арматурно-сеточного каркаса зависит от назначения сооружения, от применяемых материалов для бетонной смеси, количества и прочности армирующих волокон в осаждаемой на формообразующую сетку сухой смеси.

Итак, электростатическое осаждение останавливают при достижении заданной толщины каждого слоя, производят дозированное увлажнение, выдерживают время для набора начальной прочности и далее процесс повторяют. Возможен вариант, когда процесс электростатического осаждения смеси ведут непрерывно, также как и увлажнение. Сопла для распыления воды в этом случае идут на определенном расстоянии позади распылителей для сухой смеси. В случае большого перерыва между нанесением слоев, при возобновлении работы, предыдущий слой увлажняют. Даже при низкой щелочности бетона этого достаточно для получения хорошей электропроводности и свободного стекания зарядов на землю с осаждаемых частиц цемента, песка и волокон. Далее электростатическое осаждение новых слоев бетона ведут как обычно.

Проведена экспериментальная проверка электростатического осаждения сухого цемента на сеточный каркас. В качестве модели использовали полый куб с ребром 20 см, изготовленный из проволочной сетки с ячейкой 5 мм. Для осаждения сухого цемента использовалось стандартное оборудование для электростатического покрытия металла полимерными порошками. Сторона куба закрывалась сухим цементом полностью за несколько секунд. На ребрах

слой осажденного цемента был несколько толще, чем на гранях. Это соответствует физике процесса, так как на ребрах напряженность электрического поля выше, чем на гранях куба. Поэтому при проектировании формообразующего каркаса изделия или сооружения нужно следовать общим правилам подготовки техпроцессов с применением электрических полей, например, при электростатическом окрашивании, при осаждении гальванических покрытий, при электрофорезе. То есть при проектировании формы сооружения или изделия следует избегать острых выступов, резких изломов поверхности и глубоких узких впадин. Некоторые перспективные области применения новой технологии даны в [2, 3].

Ниже рассматривается еще одна область применения новой технологии.

Немецкий инженер и физик Вальтер Бауэрсфельд (Walther Bauersfeld) по просьбе астронома Макса Вольфа в 1912 г. начал разработку большого свободонесущего купола для размещения в нем проекционного планетария. После Первой мировой войны Бауэрсфельд закончил проект и в 1923 г. на крыше главного здания фирмы Carl Zeiss в Йене был построен первый в мире проекционный планетарий «Zeiss I». Фактически это был первый так называемый геодезический купол [4].

Купол получил название геодезического потому, что его поверхность состоит из металлических стержней, смонтированных в треугольники, а сами стержни располагаются на геодезических линиях. То есть соответствуют кратчайшим линиям, соединяющим точки на криволинейной поверхности. Таким образом, геодезический купол – это легкая и прочная пространственная решетчатая оболочка из прямых стержней.

В 40-е годы 20-го века архитектор Бакминстер Фуллер развил идеи Бауэрсфельда и разработал технологию строительства геодезических куполов для использования в архитектурных сооружениях, а также практически реализовал несколько проектов, в основном, выставочного назначения. За 60 лет истории строительства геокуполов во многих странах в различных климатических и сейсмических зонах, эти конструкции выдержали сильные снегопады, ураганы и землетрясения. В последнее время они получили достаточно широкое распространение. Например, в США существует несколько десятков фирм, проектирующих и строящих геодезические купола различного назначения: для выставок, крытых рынков, спортивных целей, складов, ангаров, автостоянок, оранжерей [5]. В последнее время начали входить в практику строительства жилые дома и небольшие здания, в основе которых купольные конструкции [6].

В 80-е годы, то есть много позже, химиками было найдено природное молекулярное соединение, представляющее собой выпуклые замкнутые полые многогранники, составленные из четного числа атомов углерода. По форме они были близки к сфере, составленной из пяти- и шестиугольных граней. Эти соединения были названы фуллеренами в честь Б. Фуллера, чьи рациональные геодезические конструкции построены по аналогичному принципу [7].

Геодезический купол известен своей особой прочностью. Его каркас состоит из икосаэдральной геодезической сетки – самой прочной и экономичной структуры из всех известных, в которой нагрузки распределяются равномерно по всем граням (рис. 1). Легкий каркас геокупола является полностью самонесущим, не требует установки каких-либо несущих балок и специального фундамента. Поэтому часто ограничиваются ленточным фундаментом.

В расчетах геокупола встречается понятие «частота триангуляции». Она подразумевает плотность разбивки купола на треугольники. Для менее плотной разбивки потребуется меньше треугольников, но с большей длиной ребра и форма купола будет угловатой. Для более плотной разбивки потребуется большее количество треугольников с меньшей длиной ребра, но форма получится более ровной и близкой к сферической.

Обычно используется стандартное обозначение частоты триангуляции латинской буквой «V». На рисунке 2 показаны примеры триангуляции до пятого значения. Число значения частоты равняется количеству «рядов», на которые делится один из треугольников икосаэдра.

Преимущество геокупола перед другими сборными сооружениями заключается в том, что каркас купола собирают из весьма ограниченного числа видов простых конструктивных

элементов, которые изготавливаются на несложном оборудовании. Которое к тому же допускает многообразные замены на другие приспособления и устройства.

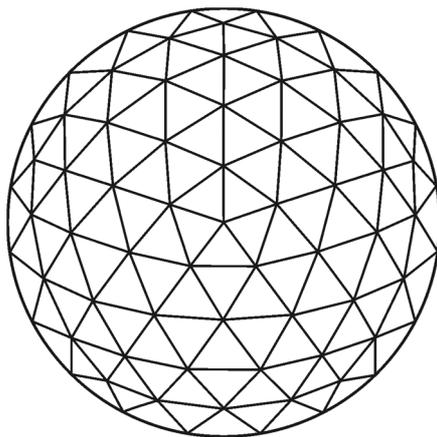


Рисунок 1 – Вид на геодезический купол сверху

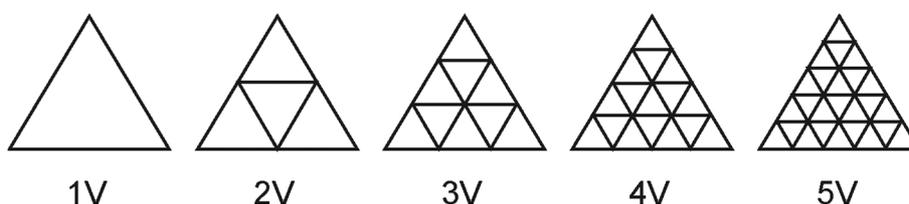


Рисунок 2 – Частота триангуляции до пятого размера.
Число значения частоты равняется количеству горизонтальных «рядов»,
на которые делят один из треугольников икосаэдра

При сборке куполов диаметром до 50 м и даже большего размера обходятся применением легких лебедок. Если сборка каркаса не вызывает затруднений, то существует задача по герметизации большого числа стыков между панелями, закрывающими проемы каркаса. Один из недостатков геокупола, влияющем на его стоимость, заключается в том, что грани купола имеют форму треугольника, а современные листовые материалы чаще всего производят прямоугольными. Поэтому при раскрое заготовок получается много отходов. В мировой практике используются различные способы и материалы для покрытия купола в зависимости от назначения сооружения, климатической зоны, допустимой стоимости и т.д. Наиболее просто проблема решается для простых куполов, сооружаемых в благоприятных климатических условиях. Для них в качестве покрытия каркаса используют прочную тентовую ткань. Как иногда называют этот материал за рубежом – архитектурный текстиль. При этом часто тканевой купол свободно подвешивают изнутри к узлам каркаса.

Для покрытия геодезического купола армированным бетоном удобно использовать электростатический метод осаждения сухой бетонной смеси на каркас сооружения. Для этого стержни каркаса и соединительные элементы для сборки купола общего назначения делают из стали как обеспечивающие хорошее взаимодействие с бетоном. Для закрытия треугольных проемов в каркасе можно использовать различные способы. Например, в проемы монтируют заранее заготовленные однотипные треугольные вставки из проволочной сетки. Сеткам предварительно придают несколько выпуклую форму, сообразуясь с размерами треугольных проемов каркаса. Однотипную формовку сеток с заданной кривизной можно делать в матрице из толстого стального листа. Матрица может быть также из дерева или бетона. Сетка, в отличие от цельного листа, формируется в поверхность двойной кривизны легко, так как структурные элементы сетки могут деформироваться почти без растяжения. Сетки закрепляют выпуклостью наружу на стержнях каркаса. Способы крепления сеток в каркасе могут быть предметом патентования, так как сокращение времени закрытия проемов за счет совершенства крепления даст заметное снижение трудоемкости.

Для послойного осаждения на каркас и сетку сухой бетонной смеси используют автомобиль с гидравлическим подъемником-манипулятором. Распылительные головки для смеси ставят несколько штук на рампе, смонтированной на верху манипулятора. На машине размещают также высоковольтный источник питания и оборудование для подачи к распылительным головкам с помощью воздуха сухой смеси. Смесь состоит из цемента (без гидрофобных добавок), тонкий песок и упрочняющие волокна. Для заполнения проемов каркаса с внутренней стороны купола может использоваться смесь цемента с большим содержанием перлитового порошка, микросфер из золы уноса ТЭЦ или дробленая микропористая керамика. Возможно также использование вкладышей из минеральной ваты. Это заметно повысит тепловое сопротивление оболочки.

Насос с распылительными головками для воды с добавками ПАВ монтируют на этой же машине. Увлажняющие распылители располагают так, чтобы ветер не сносил микрокапли воды на электростатические распылители цемента. Один полюс высоковольтного источника тока, стоящего на машине, заземляют с помощью слаботочного подвижного контакта, скользящего по заземленной толстой проволоке, закрепленной на земле. Автомобиль с расходными материалами и распылителями перемещается вокруг купола. Каждый оборот автомобиля вокруг купола сопровождается медленным подъемом рампы с распылителями на один шаг вверх с небольшим перекрытием. Таким образом, получается объемная спиральная развертка, которая охватывает весь купол. Если согласовать производительность распылителей и скорость набора начальной прочности бетонной смеси, то возможно беспрерывное нанесение слоев бетона на каркас.

Аналогично выполняют электроосаждение слоев бетонной смеси на внутреннюю сторону оболочки. При этом источник высокого напряжения и прочее оборудование для работы помещают внутри купола. Как следует из электростатики, в этом случае зараженные частицы цемента точно также садятся на заземленный арматурно-сеточный каркас с внутренней стороны купола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокоев, М.Н. Электростатическое формование изделий из армированного бетона [Текст] / М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров // Бетон и железобетон. – 1997. – №6. – С. 17-19.
2. Кокоев М.Н. Способ проведения наружной отделки зданий с одновременным их утеплением [Текст] / М.Н. Кокоев // Жилищное строительство. – 1998. – №5. – С. 12-14.
3. Кокоев М.Н. Электростатический армированный бетон [Текст] / М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров // Строительные материалы. 2004. – №6. – С. 29-31.
4. Edith Hellmuth. Walther Bauersfeld – eine biographische Skizze. In: Wissen in Bewegung, Jena, 2006, S. 22-42.
5. Dome Manufacturers, vendors and consultant [Электронный ресурс]. 2014. <http://www.grunch.net/synergetics/domes/domeman.html>.
6. Тур, В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности [Текст] / В.И. Тур. – М.: АСВ, 2004. – 96 с.
7. Kroto H. W., Heath J. R., O'Brien S. C., et. al. C60: Buckminsterfullerene // Nature 318, 162 (1985).

В.Т. Федоров

ООО «Техносистема», г. Екатеринбург

Доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе

Тел.: +7 (8662) 735-114

E-mail: fedorovsteer@gmail.com

М.Н. Кокоев

ОАО «Каббалкагропромстрой», г. Нальчик

Доктор технических наук, директор

Тел.: +7 (8662) 47-50-50

E-mail: kbagrostroy@yandex.ru

V. FEDOROV, M. KOKOEV

GEODESIC DOME FROM THE ELECTROSTATIC REINFORCED CONCRETE

This work reviews electrostatic method of concrete forming. The dry mix of cement, sand and fibers is settled on the form shaping metal mesh in the electric field. The layer of the dry mix is then hydrated with the finely dispersed water. That allows to produce concrete with the optimal ratio between water and cement. By repeating these steps the required thickness of the concrete could be achieved. In particular, the new method could be useful for building geodesic domes of different function.

Keywords: *electrostatic method, reinforced concrete, geodesic dome.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kokoev, M.N. Jelektrostaticheskoe formovanie izdelij iz armirovannogo betona [Tekst] / M.N. Kokoev, V.T. Fedorov // Beton i zhelezobeton. – 1997. – №6. – С. 17-19.
2. Kokoev M.N. Sposob provedeniya naruzhnoj otdelki zdaniy s odnovremennym ih utepleniem [Tekst] / M.N. Kokoev // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 1998. – №5. – S. 12-14.
3. Kokoev M.N. Jelektrostaticheskij armirovannyj beton [Tekst] / M.N. Kokoev, V.T. Fedorov // Stroitel'nye materialy. 2004. – №6. – S. 29-31.
4. Edith Hellmuth. Walther Bauersfeld – eine biographische Skizze. In: Wissen in Bewegung, Jena, 2006, S. 22-42.
5. Dome Manufacturers, vendors and consultant [Jelektronnyj resurs]. 2014. <http://www.grunch.net/synergetics/domes/domeman.html>.
6. Tur, V.I. Kupol'nye konstrukcii: formoobrazovanie, raschet, konstruirovanie, povyshenie jeffektivnosti [Tekst] / V.I. Tur. – M.: ASV, 2004. – 96 s.
7. Kroto H. W., Heath J. R., O'Brien S. C., et. al. C60: Buckminsterfullerene // Nature 318, 162 (1985).

V. Fedorov

ООО «Техносистема», Ekaterinburg
Doctor of technical sciences, deputy scientific director
Ph.: +7 (8662) 735-114
E-mail: fedorovsteer@gmail.com

M. Kokoyev

ОАО «Каббалкагропромстрой», Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic
Doctor of technical sciences, director
Ph.: +7 (8662) 47-50-50
E-mail: kbagrostroy@yandex.ru

ЧЕРНЫШОВ Е.М., КОРОТКИХ Д.Н.

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ И ПАРАМЕТРОВ ИХ СТРУКТУРЫ

Рассматриваются определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры. При этом исследуются бетоны четырех структурных групп, отвечающих их прочности от 30 до 150 МПа. На основе теоретического анализа и полученных экспериментальных данных вводятся критериальные условия возможного разрушения структурных групп бетонов по 1-му типу, когда магистральная трещинная продвигается в объеме материала по границе контакта матрицы и включения, и по 2-му типу, когда складывающийся энергетический баланс напряженно-деформированного состояния бетона предопределяет траекторию макротрещины непосредственно через зерна наполнителя. С учетом установленных закономерностей и определяющих соотношений обосновываются структурные факторы управления потенциалом сопротивления разрушению.

Ключевые слова: сопротивление разрушению, цементный бетон, структурный подход, структурные факторы управления.

Сопротивление бетонов разрушению представляет собой кинетический многостадийный процесс. Его составляющими являются: диссипация энергии внешнего силового воздействия в структуре композита; формирование в его объеме неоднородного поля напряжений по параметрам его локализации и концентрации; вовлечение структурных связей в работу сопротивления деформированию и разрушению; термофлуктуационный разрыв структурных физико-химических связей в перенапряженных областях; образование плоскостей разрыва сплошности (трещинообразование); накопление нано- и микро-повреждений и их трансформация в макротрещину; фрактализация и последующий рост макротрещины. С точки зрения проблем материаловедения и технологии бетонов управление сопротивлением их разрушению представляет собой, по существу, воздействие и влияние на эти составляющие кинетического процесса.

Такое воздействие и возможности влияния понимается нами в рамках «трех концептов» системно-структурного материаловедения [1, 2] и в технологических решениях опираются на них. Первый концепт учитывает, что потенциал сопротивления композита разрушению определяется количеством и качеством физических и физико-химических связей между омоноличивающим веществом и наполняющими материал частицами, а также внутренними связями частиц самого омоноличивающего вещества и самих наполняющих частиц. Второй из концептов отражает влияние меры однородности (неоднородности) конгломератной структуры композита на формирование в его объеме поля внутренних напряжений. Третий концепт соответствует возможностям управляющего воздействия на развитие и распространение в материале трещин всех их масштабов – от нано- до макро.

Указанные «три концепта» отвечают методологии системно-структурного подхода в материаловедении и технологии бетонов. Данная публикация, посвященная исследованию проблемы определяющих соотношений показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры, ориентирована на реализацию такого подхода [1-5].

Обобщенно потенциал сопротивления цементных бетонов разрушению можно представить в виде функции структурных факторов.

$$R = f [\phi_1(C_1), \dots, \phi_i(C_i), \dots, \phi_n(C_n)], \quad (1)$$

где $\phi_i(C_i)$ – структурные факторы управления сопротивлением разрушению, отражающие закономерную связь свойств R с параметрами структуры $C_1 \dots C_n$.

С позиций современного материаловедения как области знания, отражающей связи свойств материала с их структурой, необходимо в совокупности оцениваемых параметров структуры композита выделять и формировать интегральные определяющие параметры, кото-

рые отвечают механизму кинетики и количественным (энергетическим) характеристикам развития деформирования и разрушения. Такие интегральные определяющие, можно сказать, критериальные параметры структуры «в привязке» их к характеристикам процесса деформирования и разрушения бетонов обретут статус «структурных факторов».

Бетоны, как конгломератные строительные композиты являются многокомпонентными, полидисперсными, многофазными, гетерогенными, полиструктурными, дефектными, детерминировано-стохастичными структурированными системами, имеющими размерно-масштабную в диапазоне от «нано» до «макро» иерархию, в которой выделяются двухкомпонентные подсистемы «матрица-включение». Имея в виду сложность строения (структуры) бетона, следует специально отметить, что для решения такой задачи потребуется пройти процедуры идентификации структуры бетона как объекта исследования и управления, формализации структурных факторов управления его прочностью и трещиностойкостью, выявления определяющих соотношений показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры.

Приступим в этом смысле к анализу роли параметров структуры бетонов в реализации потенциала их сопротивления разрушению, в процессах диссипации энергии, локализации и концентрации напряжений в их объеме при внешнем силовом нагружении.

В качестве исходного идентификационного параметра структуры следует принять размерный масштаб включений в матрице. С этим размерно-геометрическим признаком, являющимся, кстати, удобным экспресс-фиксируемым визуальным признаком, связаны другие идентификационные характеристики структуры композита (табл. 1), предопределяющие существо механических, физических и химических влияний на процессы структурообразования и эффекты модифицирования его строения. Как только вводится этот признак, объективно появляется в двухкомпонентном образовании «матрица-включение» каждого масштабного уровня граница раздела, имеющая контактную поверхность и приграничный объем, контактную зону, в которой проявляется механо-физико-химическое взаимодействие субстанции матрицы и субстанции включения. Характеристики контактной зоны определяют условия, особенности и закономерности процессов диссипации энергии, локализации и концентрации напряжений на границах раздела в подсистеме «матрица-включение». В этой связи укажем, что интегральными определяющими структурными факторами управления прочностью и трещиностойкостью бетонов являются удельные величины площадей поверхности ($S_{y\partial i}$) и поверхностной энергии ($\mathcal{E}_{y\partial i}$) на границе раздела фаз. Величина площади поверхности раздела «матрица-включение» одновременно определяется дисперсностью включений (d, i), функцией распределения их по размерам ($F(d, i)$), степенью фрактальности их поверхности (D_i).

Таблица 1 – Характеристика вводимых в структуру бетона включений

Наименование включений	Размер, м	Удельная площадь поверхности, м ² /кг	Удельная поверхностная энергии, Дж/кг	Число частиц в единице их объема (в 1 м ³)	Число контактов частиц в единице их объема (в 1 м ³)
Крупный заполнитель	$5 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-2}$	До 0,5	До 0,6	До $1 \cdot 10^4$	До $8 \cdot 10^4$
Мелкий заполнитель	$5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$	До 24	До 30	До $5 \cdot 10^6$	До $4 \cdot 10^7$
Микрозаполнитель	$5 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-4}$	До 300	До 400	До $1 \cdot 10^{12}$	До $6 \cdot 10^{12}$
Микрокремнезем	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-7}$	До 20 000	До 18 000	До $6 \cdot 10^{18}$	До $4 \cdot 10^{19}$
Наноразмерные частицы	$2 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-8}$	До 200 000	До 250 000	До $2 \cdot 10^{22}$	До $1 \cdot 10^{23}$

Для формирования более однородного поля диссипации энергии внешнего воздействия и снижения величин концентрации напряжений предпочтительным является увеличение удельной площади поверхности границ раздела фаз на каждом структурном уровне бетона. Следует иметь в виду, что при этом складывается противоречивая ситуация, состоящая в том, что увеличение степени дисперсности включений и обусловленное этим повышение однородности поля напряжений сопровождается таким изменением условий роста и распространения

трещин в материале, которое характеризуясь вероятностью возникновения повреждений структуры при более высоком уровне нагрузки, сопровождается уменьшением длины фронта трещины и это закономерно приводит к относительному снижению трещиностойкости бетона.

В экспериментах установлено, что увеличение степени дисперсности включений как средства повышения площади поверхности раздела может приводить к качественному изменению картины и, соответственно, типа распространения трещин в бетоне и его разрушения. Характерным для плотных бетонов макрозернистого строения является тип разрушения, при котором накопление повреждений происходит прежде всего в контактной зоне подсистемы «матрица-включение» (1-й тип): из-за высокой концентрации напряжений вблизи макрозернистых включений фиксируется образование сети микротрещин, способствующей продвижению магистральной трещины (макротрещины) по поверхности контакта матрицы и включения. Для высокопрочных бетонов мелко- и микрозернистой структуры характерен 2-й тип разрушения, когда складывающийся энергетический баланс напряженно-деформированного состояния матрицы бетона предопределяет траекторию макротрещины непосредственно через зерна наполнителя.

Структуру бетона можно рассматривать как совокупность объемов твердой фазы и порового пространства. Интегральной характеристикой соотношения объемов твердой фазы и порового пространства является величина средней плотности бетона (ρ_b) или средней плотности цементного камня ($\rho_{цк}$). Поровое пространство характеризуется объемом пор (V_n) и функцией распределения пор по размерам $\phi(d_{пэ} i)$. Поскольку поры как газофазовые включения различного масштаба являются концентраторами напряжений, для повышения прочности бетона необходимо снижать величину объема пор, при этом добиваясь преобладания микро- и нанопор.

Твердая фаза цементирующих веществ представляется морфологической разностью кристаллической ($V_{цкк}$) и аморфной (скрытокристаллической) ($V_{цва}$) фаз. Кристаллическая фаза рассматривается как совокупность объемов кристаллических сростков пластинчато-призматической ($V_{цкп}$) и волокнисто-игольчатой ($V_{цкв}$) морфологий. С точки зрения повышенных значений прочности, вообще говоря, преимущество имеет нано- и микрозернистая структура с заметным преобладанием кристаллической фазы. Однако в этом случае более существенным оказывается проявление противоречия, связанного с изменением типа разрушения бетона, выражающегося в том, что достигаемый рост прочности бетона не сопровождается аналогичным ростом предельной его растяжимости и трещиностойкости. Бетоны с преобладанием кристаллической фазы новообразований оказываются относительно более хрупкими и менее трещиностойкими. Повышение трещиностойкости бетона связывается с обеспечением роста в твердеющей системе цементного камня значительного объема волокнисто-игольчатых кристаллических сростков с преобладанием контактов срастания и прорастания кристаллов (по Е.М. Чернышову). По сути это является самоармированием (по В.В. Тимашеву) структуры бетона. В процессе самоармирования твердеющего цемента посредством синтеза нитевидных новообразований формируется микрокомпозиционный материал, армированный весьма совершенными, стойкими в среде цементного камня и высокопрочными длинномерными кристаллами.

С учетом рассмотренного соотношение (1) можно записать в виде функции с рассмотренными выше управляющими характер процесса деформирования и разрушения бетона параметрами его структуры [6].

$$R = f [\rho_b (V_{цкк}, V_{цва}, V_{цкп}, V_{цкв}, V_n), K_{ц}, S_{уд} (d_{э}), \phi(d_{пэ} i), \Delta_{уд}] \quad (2)$$

Для решения прикладных задач управления сопротивлением разрушению бетонов на основе оптимизации его состава и структуры необходимо перейти от этой общей априорной функции к конкретным количественным экспериментальным зависимостям сопротивления разрушению от структурных параметров бетона.

Интегрированной структурной характеристикой, отражающей объемное содержание твердой фазы и порового пространства в материале, является средняя плотность бетона ρ_b ; интегрированной структурной характеристикой соотношения объемов матричного материала и материала включений является критерий цементации $K_{ц}$, определяемый расчетом отношения объемов связующего и наполняющего вещества в бетоне. Для бетонов крупнозернистой структуры критерий цементации может быть вычислен как отношение объема цементной-

песчаной матрицы к суммарному объему зерен крупного заполнителя. Интегрированной структурной характеристикой, связанной с размером и распределением по размерам включений всех масштабных уровней структуры, может являться суммарная удельная величина площадей поверхности ($S_{уд}$). С учетом поверхностной энергии на границе раздела фаз ($\mathcal{E}_{уд}$) названные характеристики могут соотноситься с «энергетической активностью» структуры бетона при взаимодействии его с внешней средой. В принципе на основе изложенного от соотношения (2) можно перейти к функции вида:

$$R = f(\rho_b, K_{ц}, S_{уд}). \quad (3)$$

Рассмотрим практическую задачу выявления критериальных условий разрушения тяжелых цементных бетонов. В проблеме управления сопротивлением современных цементных бетонов разрушению будем исходить из возможности их классификации по пределу прочности при сжатии, подразделив, например, их на четыре группы: I – группу рядовых бетонов (с прочностью до 40 МПа), имеющих самый массовый спрос и потребление на строительном рынке; II – группу бетонов повышенной прочности (40-80 МПа), широко применяемых в строительстве высотных зданий и сооружений; III – группу высокопрочных бетонов (80-120 МПа) целевого применения для конструкций зданий и сооружений повышенной ответственности и большого эксплуатационного ресурса; IV – группу особовысокопрочных бетонов (более 120 МПа) специального назначения (табл. 2) [7-10].

Эти группы бетонов имеют различную конструкцию структуры. Поэтому с полным основанием можно говорить и о четырех соответствующих «структурных группах» бетонов, идентифицируемых посредством оценки определяющих характеристик и параметров их строения (см. табл. 2). Уместно отметить, что структура современных высокотехнологичных бетонов существенно отличается от структуры традиционных классических бетонов более высокой дисперсностью зернистых компонентов, повышенными значениями площадей поверхности раздела фаз, существенно увеличенным числом физических и физико-химических контактов в единице объема материала, возросшей плотностью, преобладанием мелко- и скрытокристаллических сростков новообразований [6-12].

Таблица 2 – Основные отличительные параметры состава и структуры современных цементных бетонов (структурные группы бетонов)

Характеристики структуры	Значения для групп бетонов				
	I	II	III	IV	V
Количество компонентов смеси	4-5	4-5	6-7	6-8	8-10
Наибольшая крупность зернистых частиц, мм	20-70	20-40	5-20	1-5	1-5
Коэффициент конгруэнтности зернистых частиц	5-1,5	5-2,5	20-5	100-20	100-20
Суммарное количество зернистых частиц в единице объема, шт./м ³	до 2,2·10 ⁶	до 2,1·10 ¹⁰	до 1,2·10 ¹⁷	до 0,8·10 ²¹	до 0,8·10 ²¹
Суммарное количество вносимой зернистыми частицами поверхностной энергии, кДж/м ³	18-20	36-40	900-1000	2000-2500	2000-2500
Расход цемента на 1 м ³	300-400	300-400	400-500	400-600	400-600
Величина водоцементного отношения (В/Ц)	0,4-0,5	0,35-0,45	0,3-0,4	0,18-0,3	0,18-0,3
Критерий цементации, м ³ /м ³	0,25-0,35	0,3-0,4	0,3-0,4	0,5-0,7	0,5-0,7
Степень гидратации цемента в технологическом цикле, СГ, %	85-95	80-85	70-75	60-65	60-65
Средняя плотность связующего вещества, кг/м ³	1650-1800	1800-1950	1950-2050	2300-2350	2300-2350
Объем твердой фазы связующего вещества, м ³ /м ³	0,57-0,65	0,65-0,70	0,70-0,75	0,75-0,79	0,75-0,79
Минералогический состав цементирующего вещества	C-S-H (I) ≅40%	C-S-H (I) ≅40%	C-S-H (I) ≅55%	C-S-H (I) ≅65%	C-S-H (I) ≅65%
Объем микропор связующего вещества, м ³ /м ³	0,35-0,43	0,30-0,35	0,25-0,30	0,21-0,25	0,21-0,25
Относительное содержание пор радиусом менее 20 нм, %	25-30	25-30	35-40	>40	>40

Выполненные эксперименты с бетонами четырех структурных групп и полученные корреляционные соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры: $R = f(\rho_b)$, $R = f(K_{ц})$, $R = f(S_{уд})$ приводят к следующим основным выводам.

Рост средней плотности бетона обеспечивает закономерный, но не равнозначный в расчете на единицу измерения плотности, рост его предела прочности при сжатии (рис. 1): наибольшая динамика роста прочности находится в диапазоне плотностей бетона 2300-2400 кг/м³; В этом же диапазоне плотностей наблюдается рост вязкости разрушения бетона K_{Ic} ; с увеличением средней плотности бетона до величин более 2400 кг/м³ и одновременно переходом от крупноконгломератной структуры (бетоны I-III структурных групп) к мелко и микроконгломератной (бетоны IV-й структурной группы) темп роста прочности при сжатии замедляется, а для вязкости разрушения может иметь место даже снижение показателя (см. рис. 1). В диапазоне плотностей 2350-2400 кг/м³ отмечается интенсивный рост полной работы разрушения. При плотности бетона более 2400 кг/м³ наблюдается заметный рост предела трещинообразования при практически постоянной величине работы разрушения G_{Ic} . Это объясняется тем, что в «механике разрушения» перераспределяются энергетические составляющие работы разрушения: растет доля работы упругого деформирования и снижается доля работы микротрещинообразования. Столь заметные изменения показателей сопротивления разрушению бетонов в диапазоне плотностей 2350-2400 кг/м³ соотносятся со сменой типа разрушения и его переходом от типу 1-го (сеть сформированных микротрещин контактной зоны способствует траектории продвижения магистральной трещины по поверхности контакта матрицы и включения) к типу 2-му (траектория макротрещины не по границе раздела фаз, а по кратчайшему пути с пересечением фронтом трещин зерен включений).

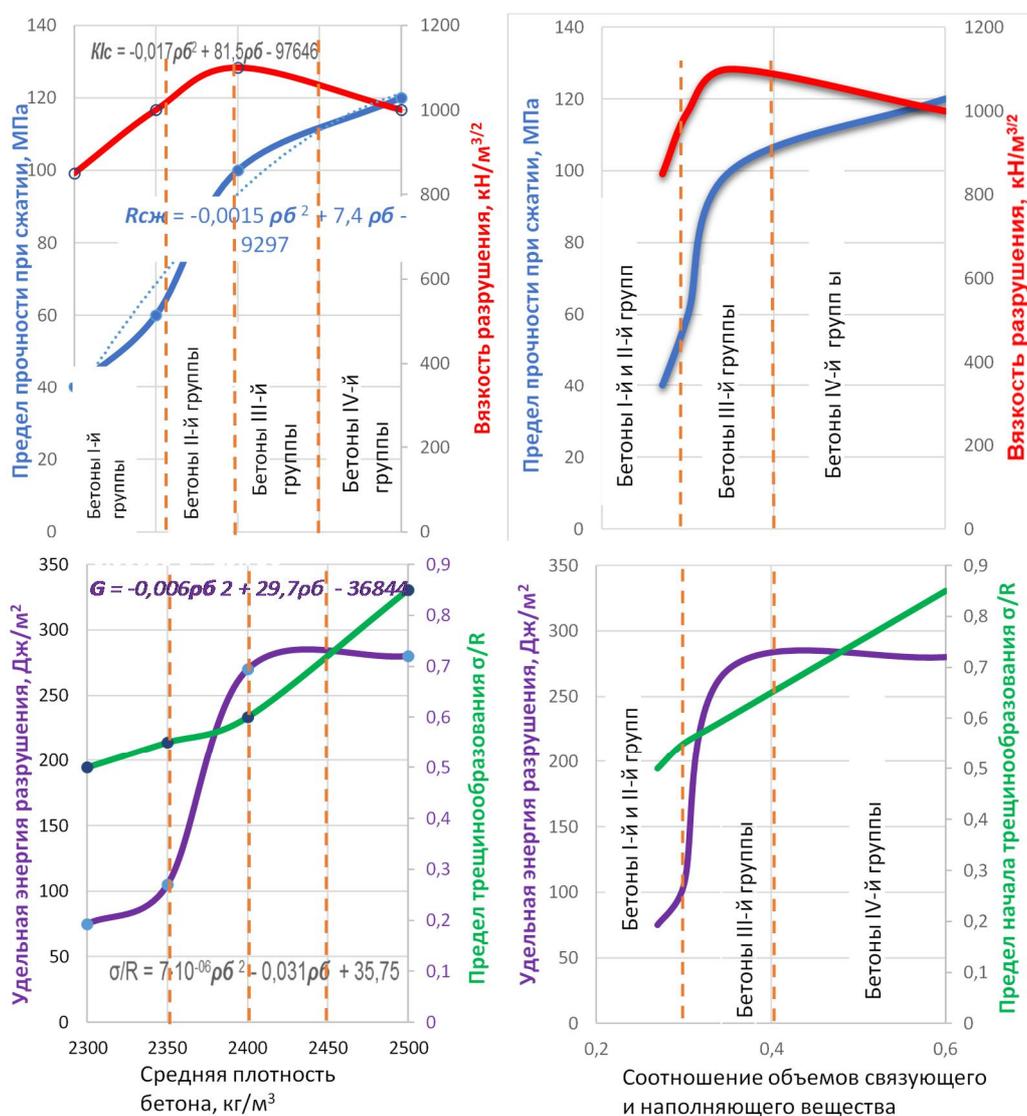


Рисунок 1 – Закономерные взаимосвязи показателей сопротивления разрушению цементных бетонов с параметрами структуры (для структурных групп I-IV)

Значение критерия цементации композитной структуры бетона выражается в следующем (см. рис. 1). Наиболее заметный рост прочности при сжатии, вязкости разрушения, работы разрушения наблюдается в диапазоне критерия цементации от 0,25 до 0,35, столь заметные изменения показателей сопротивления разрушению бетонов объясняется также сменой типа разрушения структуры. Можно отметить, что повышение значений критерия цементации сопровождается ростом предела трещинообразования σ/R по линейному закону [13].

Влияние размерного масштаба частиц включений, с которым связаны величины $S_{y\partial}$, $N_{\text{ч}}$, выражается в том, что с ростом суммарного количества введенных частиц в единицу объема структуры происходит рост и предела прочности при сжатии и работы разрушения (см. рис. 1). Одновременно, в противоречии с этим, такое изменение структуры (фактически повышение однородности структуры, то есть снижение ее неоднородности), приводит к снижению ее трещиностойкости по критериям вязкости разрушения K_{Ic} и предела трещинообразования σ/R .

Рассмотренные закономерности позволяют сформулировать структурные критерии (табл. 3) перехода от типа разрушения 1, когда сеть сформированных микротрещин контактной зоны способствует траектории продвижения магистральной трещины по поверхности контакта матрицы и включения к типу разрушения к типу 2, когда траектория макротрещины не по границе раздела фаз, а по кратчайшему пути через зерна заполнителя. Важно отметить, что при частичном выполнении указанных условий может наблюдаться тип промежуточного разрушения, когда часть траектории магистральной трещины будет проходить по контактной зоне, а другая ее часть по кратчайшему пути через зерна наполнителя.

Таблица 3 – Структурные условия разрушения тяжелого бетона

Структурные условия разрушения тяжелого цементного бетона на заполнителях из плотных горных пород	
По типу 1	По типу 2
$\rho_{\sigma} \leq 2400 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{м}} \leq 2000 \text{ кг/м}^3$; $K_{\text{ч}} \leq 0,3$; $S_{y\partial} \leq 1 \cdot 10^6$; $N_{\text{ч}} \leq 2 \cdot 10^{10}$.	$\rho_{\sigma} > 2400 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{м}} > 2000 \text{ кг/м}^3$; $K_{\text{ч}} > 0,3$; $S_{y\partial} > 1 \cdot 10^6$; $N_{\text{ч}} > 2 \cdot 10^{10}$.

Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры отражаются, как экспериментально установлено, следующими зависимостями с коэффициентом корреляции не менее 0,94-0,97:

$$R_{\text{сж}} = -0,0015 \rho_{\sigma}^2 + 29,7 \rho_{\sigma} - 9297; \quad (4)$$

$$K_{Ic} = -0,0017 \rho_{\sigma}^2 + 81,5 \rho_{\sigma} - 97646; \quad (5)$$

$$G_{Ic} = -0,006 \rho_{\sigma}^2 + 29,7 \rho_{\sigma} - 36844; \quad (6)$$

$$\frac{\sigma}{R} = 7 \cdot 10^{-6} \rho_{\sigma}^2 - 0,031 \rho_{\sigma} + 35,75; \quad (7)$$

$$R_{\text{сж}} = 5,3 S_{y\partial}^{0,22}; \quad (8)$$

$$\frac{\sigma}{R} = 2 \cdot 10^{-7} S_{y\partial} + 0,5. \quad (9)$$

Данные эмпирические зависимости могут рассматриваться в качестве базовых моделей при решении задач конструирования оптимальных по критериям сопротивления разрушению структур бетонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов, Е.М. Управление сопротивлением конгломератных строительных композитов разрушению (основные концепции и вопросы теории) [Текст] / Е.М. Чернышов // Вестник Гражданских инженеров. – 2009. – №3(20). – С. 148-159.
2. Чернышов, Е.М. Развитие теории системно-структурного материаловедения и высоких технологий строительных композитов нового поколения [Текст] / Е.М. Чернышов // Строительные материалы. – 2011. – №7. – С. 54-60.

3. Макридин, Н.И. Механика разрушения песчаного бетона и фибробетона [Текст] / Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова, И.А. Суров // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №3. – С. 122-126.
4. Чернышов, Е.М. Феноменология локализованных зон активной диссипации энергии при деформировании и разрушении современных бетонов [Текст] / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 31(50). – Ч. 2. – 2013. – С. 212-222.
5. Королев, Е.В. Управление напряженным состоянием композитов [Текст] / Е.В. Королев, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – №2. – С. 23-28.
6. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы [Текст] / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. – №3. – С. 6-14.
7. Хвастунов, В.Л. О взаимосвязи внутренних напряжений с параметрами структуры композиционного материала [Текст] / В.Л. Хвастунов, Е.В. Королев, А.П. Прошин, В.И. Калашников // Известия ВУЗов. Строительство. – 2003. – №12. – С. 20-26.
8. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В. И. Калашников // Бетон и железобетон. – 2012. – №1. – С. 82.
9. Каприелов, С.С. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса «Федерация» [Текст] / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.А. Киселева, О.В. Пригоженко, Г.С. Кардумян, В.И. Ургапов // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – №8. – С. 20-22.
10. Коротких, Д.Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (ч. 1) [Текст] / Д.Н. Коротких // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 26. – 2012. – С. 56-67.
11. Коротких, Д.Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (ч. 2) [Текст] / Д.Н. Коротких // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 27. – 2012. – С. 54-62.
12. Коротких, Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии): монография [Текст] / Д.Н. Коротких. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. – 141 с.

Е.М. Чернышов

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор
E-mail: chem@vgasu.vrn.ru

Д.Н. Коротких

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология строительных материалов, изделий и конструкций»
E-mail: korotkih@vgasu.vrn.ru

E. CHERNYSHOV, D. KOROTKIKH

**ESSENTIAL RELATIONS BETWEEN FAILURE
RESISTANCE PARAMETERS AND STRUCTURE PARAMETERS
FOR MORTAR CONCRETE**

The results of investigations of regular interconnections indicators of resistance of concrete destruction and determining parameters of their structure. Based on the analysis of the natural connections fracture resistance detected criterial conditions for the destruction of concrete in terms of type 1, when the network is formed microcracks contact area helps promote the trajectory of the main crack on the contact surface of the matrix and inclusion, as well as the type 2, when the trajectory passes macrocracks not on the interface phases, and on the shortest path through the grain aggregate. From the standpoint of mechanics of deformation and fracture of cement concrete as structured systems settle structural factors control their resistance to breakage.

Keywords. fracture resistance, cement concrete, structural approach, structural factors management.

BIBLIOGRAPHY

1. Chernyshov, E.M. Upravlenie soprotivleniem konglomeratnyh stroitel'nyh kompozitov razrusheniju (osnovnye koncepcii i voprosy teorii) [Tekst] / E.M. Chernyshov // Vestnik Grazhdanskih inzhenerov. – 2009. – №3(20). – S. 148-159.
2. Chernyshov, E.M. Razvitie teorii sistemno-strukturnogo materialovedenija i vysokih tehnologij stroitel'nyh kompozitov novogo pokolenija [Tekst] / E.M. Chernyshov // Stroitel'nye materialy. – 2011. – №7. – S. 54-60.
3. Makridin, N.I. Mehanika razrushenija peschanogo betona i fibrobetona [Tekst] / N.I. Makridin, O.V. Tarakanov, I.N. Maksimova, I.A. Surov // Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2014. – №3. – S. 122-126.
4. Chernyshov, E.M. Fenomenologija lokalizovannyh zon aktivnoj dissipacii jenerгии pri deformirovanii i razrushenii sovremennyh betonov [Tekst] / E.M. Chernyshov, D.N. Korotkih // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. – Vyp. 31(50). – Ch. 2. – 2013. – S. 212-222.
5. Korolev, E.V. Upravlenie naprjazhennym sostojaniem kompozitov [Tekst] / E.V. Korolev, A.M. Danilov, I.A. Gar'kina // Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. – 2009. – №2. – S. 23-28.
6. Bazhenov, Ju.M. Konstruirovanie struktur sovremennyh betonov: opredelajushhie principy i tehnologicheskie platformy [Tekst] / Ju.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkih // Stroitel'nye materialy. – 2014. – №3. – S. 6-14.
7. Hvastunov, V.L. O vzaimosvjazi vnutrennih naprjazhenij s parametrami struktury kompozicionnogo materiala [Tekst] / V.L. Hvastunov, E.V. Korolev, A.P. Proshin, V.I. Kalashnikov // Izvestija VUZov. Stroitel'stvo. – 2003. – №12. – S. 20-26.
8. Kalashnikov, V.I. Kak prevratit' betony starogo pokolenija v vysokoeffektivnye betony novogo pokolenija / V. I. Kalashnikov // Beton i zhelezobeton. – 2012. – №1. – S. 82.
9. Kaprielov, S.S. Opyt vozvedenija unikal'nyh konstrukcij iz modifitsirovannyh betonov na stroitel'stve kompleksa «Federacija» [Tekst] / S.S. Kaprielov, A.V. Shejfel'd, Ju.A. Kiseleva, O.V. Prigozhenko, G.S. Kardumjan, V.I. Urgapov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2006. – №8. – S. 20-22.
10. Korotkih, D.N. Zakonomernosti razrushenija struktury vysokoprochnnyh cementnyh betonov na osnove analiza polnyh ravnovesnyh diagramm ih deformirovanija (ch. 1) [Tekst] / D.N. Korotkih // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. – Vyp. 26. – 2012. – S. 56-67.
11. Korotkih, D.N. Zakonomernosti razrushenija struktury vysokoprochnnyh cementnyh betonov na osnove analiza polnyh ravnovesnyh diagramm ih deformirovanija (ch. 2) [Tekst] / D.N. Korotkih // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. – Vyp. 27. – 2012. – S. 54-62.
12. Korotkih, D.N. Treshhinostojkost' sovremennyh cementnyh betonov (problemy materialovedenija i tehnologii): monografija [Tekst] / D.N. Korotkih. – Voronezh: Voronezhskij GASU, 2014. – 141 s.

E. Chernyshov

Voronezh state university of architecture and civil engineering, Voronezh

Doctor of technical sciences, professor

E-mail: chem@vgasu.vrn.ru

D. Korotkih

Voronezh state university of architecture and civil engineering, Voronezh

Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Technology of construction materials, products and structures»

E-mail: korotkih@vgasu.vrn.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - произвольные словообразования;
 - сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем – 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unprk.ru

Адрес учредителя журнала

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет –
учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)
302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29
+7 (4862) 42-00-24
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет –
учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.
+7 (4862) 73-43-49
www.gu-unpk.ru
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор С.В. Солопов
Компьютерная верстка С.В. Солопов
Дизайн обложки И.И. Стрельникова

Подписано в печать 27.01.2015 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 11,0.
Тираж 400 экз.
Заказ №84/15П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической
базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.