

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

**Учредитель и издатель**

Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

Адрес редакции:

440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,  
ПГУАС

Тел/факс 8412 929501

E-mail: regas@pguas.ru

fmatem@pguas.ru

www.rais.pguas.ru

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель  
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный  
секретарь)

Редакторы: М.А. Сухова

Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка

Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован  
в Федеральной службе по надзору  
за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации  
ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

**36946** в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов  
несут ответственность за достоверность  
приведенных сведений, точность данных  
по цитируемой литературе и за исполь-  
зование в статьях данных, не подлежа-  
щих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи  
в порядке обсуждения, не разделяя точку  
зрения автора.

Подписано к печати 17.03.2022.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 17,375. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 113.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 1 (50)/2022

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ..... 4

**Логанина В.И., Зайцева М.В.**  
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИЗВЕСТКОВОГО  
КАМНЯ В ПРИСУТСТВИИ  
ПОЛИСИЛИКАТНОГО РАСТВОРА ..... 4

**Макарова Л.В., Логанина В.И.,  
Кармишина А.С.**  
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ  
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ  
ИНДУСТРИИ ..... 9

**Тараканов О.В., Суздальцев О.А.,  
Белякова Е.А.**  
СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ЦЕМЕНТА  
В БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ..... 18

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
РАЦИОНАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ..... 23

**Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И.,  
Володин С.В., Володин В.В.**  
ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ  
МОДИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ  
ПОЛИКАРБОКСИЛАТНОГО  
СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА  
И МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК РАЗЛИЧНОГО  
СОСТАВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ..... 28

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
КОМПОЗИТОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
СИНТЕЗ, УПРАВЛЕНИЕ ..... 37

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ  
И СООРУЖЕНИЯ ..... 44

**Шенин А.И., Чуманов А.В.**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО  
НАПРАВЛЕНИЯ ЛЕНТ (ТРОСОВ) КРЕПЛЕНИЯ  
ЛЕНТОЧНО-ТРОСОВОГО ГАСИТЕЛЯ  
КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ..... 44

© Авторы публикаций, 2022

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2022

© ПГУАС, 2022

<b>Шенин А.И., Азимова Я.А.</b> ПРАКТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФИБРОАРМИРОВАННЫХ БАЛОК ..... 51	<b>Андреев С.Ю., Степанов С.В., Князев В.А., Шляев А.М.</b> ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ВТОРИЧНОГО ВВЕДЕНИЯ ВО ФЛОТАЦИОННЫЙ ОБЪЕМ КРУПНОДИСПЕРСНОЙ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ..... 93
<b>Комаров В.А., Болдырева О.В., Трегуб А.Ю.</b> КОРОТКИЕ КОНСОЛИ РИГЕЛЕЙ МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСОВ: ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ СЖАТИЯ И СРЕЗА ..... 58	<b>Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Андреев В.С.</b> ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА КИСЛОРОД И АЗОТ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ МИКРОЦИКЛОНА ..... 102
<b>Бакушев С.В.</b> ИЗГИБ ТОНКИХ ЖЁСТКИХ ПЛАСТИН С КАСАТЕЛЬНЫМИ УСИЛИЯМИ ..... 63	<b>Домке Э.Р., Жесткова С.А., Караванова М.А.</b> ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ ДОРОГАХ ..... 110
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 75	<b>Баканова С.В., Белов В.Е.</b> ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫЙ И ВОЗДУШНЫЙ БАЛАНСЫ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ ..... 116
<b>Кузина В.В., Кошев А.Н., Еремкин А.И.</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА НАД КОМПАКТНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТОЧЕЧНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ..... 75	АРХИТЕКТУРА ..... 120
<b>Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Мишин А.А., Мочалов А.В.</b> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ САЖИ И КОПОТИ В ВОЗДУХЕ ЗАЛОВ БОГОСЛУЖЕНИЯ ..... 81	<b>Крылова М.К.</b> АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ КЛАСТЕРОВ И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ В РОССИИ ..... 120
<b>Розен А.Е., Перелыгин Ю.П., Киреев С.Ю., Гришин Б.М.</b> МНОГОСЛОЙНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВОДOPPOBODНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ОТ КОРРОЗИИ ..... 88	<b>Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Чупряков М.А.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ..... 134

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	4	ENGINEERING SYSTEMS.....	75
<b>Loganina V.I., Zaytseva M.V.</b> STRUCTURE FORMATION OF LIME STONE IN THE PRESENCE OF A POLYSILICATE SOLUTION.....	4	<b>Kuzina V.V., Koshev A.N., Eremkin A.I.</b> MATHEMATICAL MODELING OF DISTRIBUTION OF CONVECTIVE FLOW OVER A LIMITED SET OF COMPACT POINT HEAT SOURCES.....	75
<b>Makarova L.V., Makarova L.V., Karmishina A.S.</b> METHODOLOGY OF MANAGEMENT SOLUTIONS ASSESSMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY.....	9	<b>Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Mishin A.A., Mochalov A.V.</b> THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES TO DETERMINE MASS CONCENTRATION OF SOOT IN THE AIR OF WORSHIP HALLS .....	81
<b>Tarakanov O.V., Suzdaltsev O.A., Belyakova E.</b> REDUCTION OF CEMENT CONSUMPTION IN CONCRETE OF A NEW GENERATION.....	18	<b>Rosen A.E., Perelygin Yu.P., Kireev S.Yu., Grishin B.M.</b> MULTI-LAYER MATERIAL FOR WATER METAL PIPES PROTECTING FROM CORROSION .....	88
<b>Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> RATIONAL IDENTIFICATION OF COMPLEX SYSTEMS.....	23	<b>Andreev S.Yu., Stepanov S.V., Knyazev V.A., Shilyaev A.M.</b> INTENSIFICATION OF PRESSURED FLOTATION WASTEWATER TREATMENT DUE TO THE SECONDARY INTRODUCTION OF A COARSE WATER-AIR MIXTURE IN THE FLOTATION VOLUME .....	93
<b>Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin S.V., Volodin V.V.</b> THE EFFECT OF COMPLEX MODIFIERS ON THE BASIS OF POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZER AND MINERAL ADDITIVES OF DIFFERENT COMPOSITIONS ON TECHNOLOGICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT SYSTEMS.....	28	<b>Andreev S.Yu., Lebedinskiy K.V., Andreev V.S.</b> THEORETICAL ANALYSIS AND RECOMMENDATIONS FOR THE CALCULATION OF THE PROCESS OF SEPARATING AIR INTO OXYGEN AND NITROGEN IN THE HIGH-GRADIENT CENTRIFUGAL FIELD OF A MICROCYCLONE .....	102
<b>Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> COMPOSITES SYSTEM DESIGN: MODELING, SYNTHESIS, CONTROL .....	37	<b>Domke E.R., Zhestkova S.A., Karavanova M.A.</b> PRINCIPLES FOR IMPROVING ROAD SAFETY ON FEDERAL HIGHWAYS.....	110
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	44	<b>Bakanova S.V., Belov V.E.</b> THERMAL, HUMIDITY AND AIR BALANCES IN LIVESTOCK PREMISES...	116
<b>Shein A.I., Chumanov A.V.</b> DETERMINING THE RATIONAL DIRECTION OF FASTENING TAPES (CABLES) OF A TAPE-CABLE VIBRATION DAMPENER OF STRUCTURES .....	44	ARCHITECTURE .....	120
<b>Shein A.I., Asimova Y.A.</b> PRACTICAL OPTIMIZATION OF FIBRO-REINFORCED BEAMS.....	51	<b>Krylova M.K.</b> ARCHITECTURAL SOLUTIONS FOR AGRO-INDUSTRIAL CLUSTERS AND WAYS OF THEIR DEVELOPMENT IN RUSSIA.....	121
<b>Komarov V.A., Boldyreva O.V., Tregub A.Yu.</b> SHORT CONSOLES OF CROSSBARS OF MULTI-STOREY FRAMES: THE STRENGTH OF CONCRETE UNDER THE COMBINED ACTION OF COMPRESSION AND SHEAR....	58	<b>Derina M.A., Petryanina L.N., Chupryakov M.A.</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF DESIGN SOLUTIONS FOR RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS.....	134
<b>Bakushev S.V.</b> THIN RIGID PLATES BENDING WITH TANGENTIAL FORCES .....	63		

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.57

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_4

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

*Penza State University of Architecture and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Логанина Валентина Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Loganina Valentina Ivanovna**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Quality  
Management and Construction Technologies»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Зайцева Мария Владимировна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: zajc@yandex.ru

**Zaitseva Maria Vladimirovna**,  
Postgraduate of the department «Quality  
Management and Construction Technologies»  
E-mail: zajc@yandex.ru

### СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИЗВЕСТКОВОГО КАМНЯ В ПРИСУТСТВИИ ПОЛИСИЛИКАТНОГО РАСТВОРА

В.И. Логанина, М.В. Зайцева

Приведены результаты структурообразования известкового камня, модифицированного полисиликатным раствором. Установлена корреляционная зависимость между содержанием кремнезема в полисиликатном растворе и прочностью известкового камня.

*Ключевые слова: полисиликатный раствор, известковое вяжущее, прочность, структурообразование*

### STRUCTURE FORMATION OF LIME STONE IN THE PRESENCE OF A POLYSILICATE SOLUTION

V.I. Loganina, M.V. Zaytseva

The results of structure formation of limestone modified by polysilicate solution are presented. A correlation has been established between the silica content in the polysilicate solution and the strength of the limestone.

*Keywords: polysilicate solution, lime binder, strength, structure formation*

Для модифицирования сухих строительных смесей с целью повышения их физико-механических характеристик применяют различные добавки [1–5]. Представляет интерес применение для модифицирования бетонов, растворов кремнеземсодержащих добавок [6–8]. Так, в работах [9–11] представлены результаты исследований влияния

кремнеземистых добавок с разной удельной поверхностью на свойства цементного камня. Авторами установлены закономерности повышения прочности цементного камня с комплексной добавкой микро- и нанокремнезема, закономерности синергетического влияния на свойства цементного камня кремнеземистых добавок с разной степенью дисперсности. По данным В.И. Калашникова [12], для обеспечения необходимого эффекта, связанного с образованием высокопрочных гидросиликатов кальция, необходимо вводить микрокремнезем до 15–20 %. Применение более активного нанокремнезема позволяет получить более прочный цементный камень при гораздо меньшем расходе добавки.

Основной задачей наномодифицирования бетона, раствора является управление процессами структурообразования на микро- и макроуровне, при этом уменьшение размеров частиц наноматериалов способствует существенному снижению их требуемой концентрации [13].

В работах [14–16] установлена экстремальная концентрационная зависимость физико-механических свойств цементных бетонов, растворов с максимумом при минимальных концентрациях модифицирующей добавки  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  % от массы вяжущего.

Проведенные нами исследования показали эффективность применения в известковых составах в качестве модифицирующей кремнеземсодержащей добавки полисиликатного раствора. Нами разработан и апробирован из-вестковый состав замазки для реставрации известняка. Состав содержит в качестве полимерного связующего полисиликатный раствор, полученный смешением жидкого стекла и золя кремниевой кислоты.

Для приготовления известкового состава использовали известковое вяжущее, полисиликатный раствор. Использовали гашеную известь (пушонку) активностью 84 %, полученную на каменском предприятии «Атмис-сахар» для технологических целей, истинной плотностью  $2200 \text{ кг/м}^3$ , насыпной плотностью  $480 \text{ кг/м}^3$ , с удельной поверхностью  $1050 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Для получения полисиликатного раствора в жидкое стекло вводили золь кремниевой кислоты Nanosil 20, выпускаемый ПК «Промстеклоцентр». Применяли калиевое жидкое стекло с модулем  $M=3,29$  (ГОСТ 13078). Молибдатным методом установлено, что содержание  $\text{SiO}_2$  в полисиликатном растворе составляет 30,39 %.

Прочность при растяжении определялась на образцах размерами  $10 \times 10 \times 50$  мм после 28-суточного твердения в воздушно-сухих условиях. Количество добавки полисиликатного раствора составляло 1–10 % от массы извести (концентрация  $\text{SiO}_2$  составляет 0,003–0,03 %). Скорость деформирования – 20 мм/мин.

Была определена оптимальная концентрация полисиликатного раствора (рис. 1). Анализ данных свидетельствует о наличии экстремума при концентрации  $\text{SiO}_2$  в количестве 0,003 % от массы извести. Прочность при растяжении составляет  $R_p = 2,385 \text{ кгс/см}^2$ . При дальнейшем увеличении содержания  $\text{SiO}_2$  наблюдается снижение прочности при растяжении.

Выявлено также увеличение прочности при сжатии известковых композитов. Установлено, что прочность при сжатии известковых композитов с применением в качестве наполнителя микрокальцита составляет в зависимости от соотношения «известь:наполнитель» 1,69–1,83 МПа. Введение полисиликатного раствора в известковую смесь приводит к повышению прочности при сжатии, составляющую при содержании добавки 1 % (концентрация  $\text{SiO}_2$  0,003 %) от массы извести 2,6 МПа.

Был проведен топологический анализ формирования структуры покрытий, для чего рассчитывали соотношение между частицами извести и полисиликатным раствором  $C$  в единице объема. Радиус частиц полисиликатного раствора составляет 5–7 нм, извести – 4,87 мкм. Результаты расчетов показывают, что для составов 1:0,01 на одну частицу извести приходится  $5,29 \cdot 10^6$  частиц полисиликатного раствора. Таким образом, в исследуемых составах каждая частица извести окружена частицами полисиликатного раствора. Результаты расчетов показывают, что для связывания полисиликатного раствора необходима миграция извести в зону контакта с полисиликатным раствором на расстояние до 2,45513 мм. Исходя из этого, наиболее вероятным

механизмом формирования прочности является диффузионный перенос ионов извести и последующая реакция взаимодействия их с полисиликатным раствором.

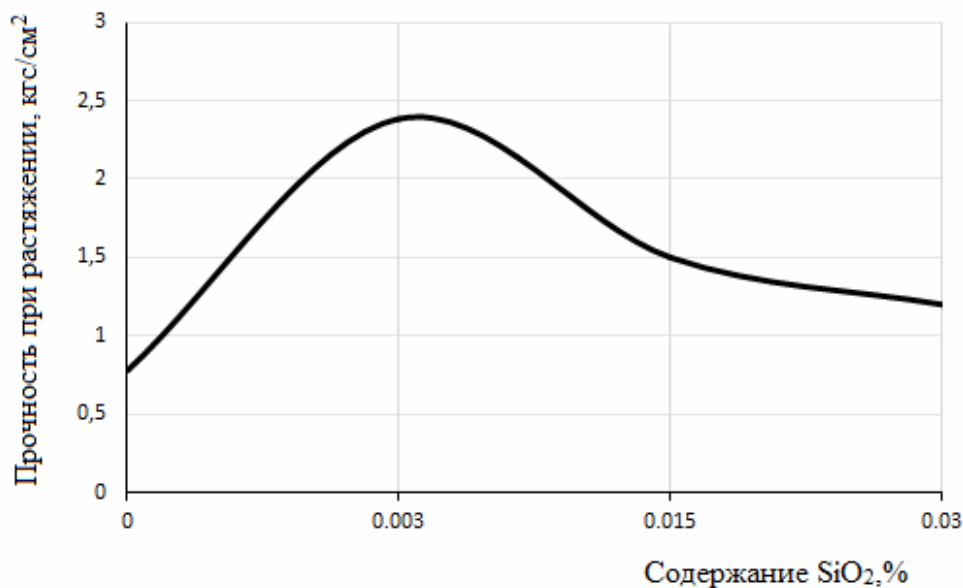


Рис. 1. Зависимость прочности известкового камня от концентрации SiO<sub>2</sub>

Дополнительно был проведен дифференциально-термический анализ (ДТА) модифицированного известкового камня с помощью установки «Термоскан-2».

При ДТА известкового композита с добавкой установлено, что тепловой эффект при температуре 90–200 °С связан с удалением адсорбированной воды. Интенсивный эндоэффект на обоих термограммах в интервале 520–650 С связан с дегидратацией портландита. При сравнении термограмм выявлено, что тепловой эффект, связанный с дегидратацией портландита, в контрольных образцов больше и составляет  $Q=73,641$  Дж (рис. 2, кривая 1), что обусловлено большим содержанием в данных образцах портландита. Тепловой эффект в образцах на основе состава с добавкой полисиликатного раствора составляет  $Q=21,41$  Дж (рис. 2, кривая 2). Эндоэффект в интервале температур 469–519,7°С (рис. 2, кривая 2), равный  $Q=0,5729$  Дж, указывает на дегидратацию гидросиликатов кальция. Тепловой эффект при температуре 800–1000 °С является характеристикой диссоциации кальцита.

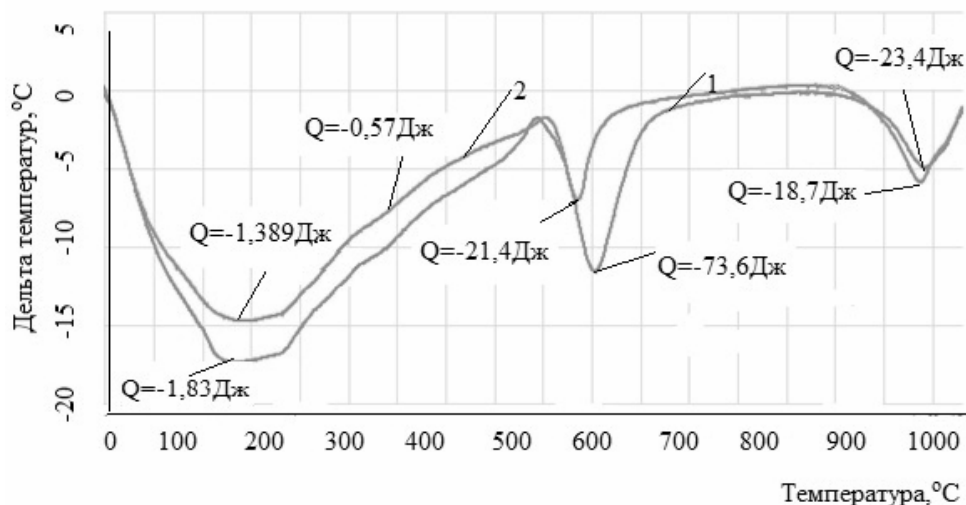


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа образцов:  
1 – контрольный образец; 2 – образец с применением добавки полисиликатного раствора

Полученные данные хорошо согласуются с результатами [17], где в качестве нанодисперсного компонента использовали кремнезоль, который вводился в количестве 10 % (концентрация активного  $\text{SiO}_2$  составляла 0,23 %, содержание частиц размером 90–120 нм – 92 %). В работе показано, что кремнезоль химически взаимодействует с известью с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция.

#### Список литературы

1. Loganina, V.I. Application of activated diatomite for dry lime mixes / V.I. Loganina, E.E. Simonov, W. Jezierski, D. Małaszkiwicz // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 65. – P. 29–37.
2. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
3. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2011. – № 3 (627). – С. 20–23.
4. Zhang, J.X. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters / J.X. Zhang, X.J. Kong, C. Wang // *Advanced Materials Research*. – Vol. 857. – P. 212–221.
5. Chen, J.J. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste / J.J. Chen, A.K.H. Kwan // *Cement & Concrete Composites*. – 2012. – №34. – P. 1–10.
6. Bonavetti, V.L. Cement with silica fume and granulated blast-furnace slag: strength behavior and hydration / V.L. Bonavetti, C. Castellano, H. Donza, V.F. Rahhal, E.F. Irassar // *Materiales de Construcción*. – 2014. – Vol. 64. (315). – P.025.
7. Красникова, Н.М. Влияние полисиликата на структурообразование цементного камня / Н.М. Красникова, З.Ф. Иксанова // *Известия КГАСУ*. – 2019. – №4. – С.347–352.
8. Айлер, Р. Химия кремнезема / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982. – Т. 1-2. – 416 с.
9. Nay, J. N., Raval, H.M. // *Sol-Gel Sci. Tech.* – 1998. – Vol. 13. – P.109.
10. Tamaki, R., Horiguchi, T. // *Chemical Society of Japan*. – 1998. – No 71. – P. 2749–2756.
11. Копаница, Н.О. Применение нанодисперсного кремнезема в производстве строительных смесей / Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов, О.В. Демьяненко // *Вестник КГАСУ*. – 2016. – № 5. – С.140–146.
12. Калашников, В.И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, В.М. Володин, О.В. Суздальцев // *Строительные материалы*. – 2014. – № 5. – С. 88–91.
13. Королев, Е.В. Оценка концентрации первичных наноматериалов для модифицирования строительных композитов / Королев Е.В. // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2014. – № 6. – С. 31–34.
14. Хозин, В.Г. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов / В.Г. Хозин, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов // *Строительные материалы*. – 2015. – № 2. – С. 25–33.
15. Rao, S. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials ( $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$ ) / S. Rao, P. Silva, J. De Brito // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 96. – P. 508–517.
16. Коротких, Д.Н. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов / Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // *Технологии бетонов*. – 2009. – № 9–10. – С. 86–88.
17. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы на основе золь-гель технологии / В.И. Логанина, О.А. Давыдова // *Строительные материалы*. – 2009. – № 3. – С. 50–51.

## References

1. Loganina, V.I. Application of activated diatomite for dry lime mixes / V.I. Loganina, E.E. Simonov, W. Jezierski, D. Małaszkiwicz // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 65. – P. 29–37.
2. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.
3. Loganina, V.I. Influence of activation of diatomite on the properties of lime compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2011. – No. 3 (627). – P. 20–23.
4. Zhang, J.X. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters / J.X. Zhang, X.J. Kong, C. Wang // *Advanced Materials Research*. – Vol. 857. – P. 212–221.
5. Chen, J.J. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste / J.J. Chen, A.K.H. Kwan // *Cement & Concrete Composites*. – 2012. – №34. – P. 1–10.
6. Bonavetti, V.L. Cement with silica fume and granulated blast-furnace slag: strength behavior and hydration / V.L. Bonavetti, C. Castellano, H. Donza, V.F. Rahhal, E.F. Irassar // *Materiales de Construcción*. – 2014. – Vol. 64. (315). – P.025.
7. Krasinikova, N.M. Effect of polysilicate on the structure formation of cement stone / N.M. Krasinikova, Z.F. Iksanova // *Izvestiya KGASU*. – 2019. – №4. – P. 347–352.
8. Ayler, P. *Chemistry of Silica* / P. Ayler. – M.: Mir, 1982. – Part 1. – 416 p.
9. Hay, J. N., Raval, H.M. // *Sol-Gel Sci. Tech*. – 1998. – Vol. 13. – P.109.
10. Tamaki, R., Horiguchi, T. // *Chemical Society of Japan*. – 1998. – No 71. – P. 2749–2756.
11. Kopanitsa, N.O. The use of nanodispersed silica in the production of building mixtures / N.O. Kopanitsa, Yu.S. Sarkisov, O.V. Demyanenko // *Vestnik TSASU*. – 2016. – No. 5. – P.140–146.
12. Kalashnikov, V.I. Nanohydrosilicate technologies in concrete production / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, M.N. Moroz, I.Yu. Troyanov, V.M. Volodin, O.V. Suzdaltsev // *Building materials*. – 2014. – No. 5. – P. 88–91.
13. Korolev, E.V. Assessment of the concentration of primary nanomaterials for modifying building composites / E.V. Korolev // *Nanotechnology in construction*. – 2014. – No. 6. – P. 31–34.
14. Khozin, V.G. General concentration regularity of the effects of nanomodification of building materials / V.G. Khozin, L.A. Abdrakhmanova, R.K. Nizamov // *Building materials*. – 2015. – No. 2. – P. 25–33.
15. Rao, S. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>) / S. Rao, P. Silva, J. De Brito // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 96. – P. 508–517.
16. Korotkikh, D.N. On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes / D.N. Korotkikh, O.V. Artamonova, E.M. Chernyshov // *Tekhnologii betonov*. – 2009. – No. 9–10. – P. 86–88.
17. Loganina, V.I. Lime finishing compositions based on sol-gel technology / V.I. Loganina, O.A. Davydova // *Building materials*. – 2009. – No. 3. – P. 50–51.



УДК 005.69

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_9

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Макарова Людмила Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: Mak.78\_08@inbox.ru

**Логанина Валентина Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Кармишина Анастасия Сергеевна**,  
студент  
E-mail: nastya.karmishina@inbox.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Makarova Ludmila Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Management of Quality and  
Technology of Construction Production»  
E-mail: Mak.78\_08@inbox.ru

**Loganina Valentina Ivanovna**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Quality  
Management and Construction Technologies»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Karmishina Anastasia Sergeevna**,  
student  
E-mail: nastya.karmishina@inbox.ru

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

Л.В. Макарова, В.И. Логанина, А.С. Кармишина

Приводится методика оценки эффективности управленческих решений, основанная на идентификации источников высокого риска и выборе наиболее эффективного решения с использованием приоритетного числа риска. Рассмотрена идентификация технологических рисков, связанных с производством строительных материалов, изделий и конструкций, на примере предприятия ООО «Строительные материалы» (г. Пенза). Представлена карта рисков состояния производственного процесса.

*Ключевые слова: риски, внутренние и внешние потери, оценка эффективности, система менеджмента качества*

## METHODOLOGY OF MANAGEMENT SOLUTIONS ASSESSMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

L.V. Makarova, L.V. Makarova, A.S. Karmishina

The article provides a methodology for assessing the effectiveness of management decisions, based on the identification of sources of high risk and the choice of the most effective solution using the priority number of risk. The identification of technological risks associated with the production of building materials, products and structures is considered on the example of the company "Stroitelnye materialy", Penza. A risk map of the state of the production process is presented.

*Keywords: risks, internal and external losses, performance assessment, quality management system*

В рамках реализации целей и приоритетов стратегии развития строительной отрасли вопросы повышения качества и снижения потерь при производстве строительной продукции являются ключевой задачей и входят в стратегический план развития любого предприятия или организации в настоящее время [1–3].

Как и в любой системе, в строительной сфере возникновение потерь связано с дефектами, транспортировкой продукции, перемещением материалов или полуфабри-

катов в технологическом процессе и т.д. Такого рода потери увеличивают издержки производства, не добавляя при этом потребительской ценности. Кроме того, всё это приводит к увеличению срока окупаемости инвестиций.

В современных условиях успешными являются те предприятия, которые получают конкурентные преимущества в части минимизации издержек на выпуск своей продукции [4–7].

В качестве наиболее приоритетных подходов, позволяющих снизить как внутренние, так и внешние потери на предприятии, можно выделить применение современных цифровых технологий, выбор надёжного поставщика, планирование производства и т.д. (табл. 1).

Таблица 1

Перечень мероприятий, направленных на снижение внутренних  
и внешних потерь предприятия

Наименование инициативы (критерия, задачи)	Описание предполагаемой инициативы (критерия, задачи)	Статьи затрат на реализацию поставленной задачи	Ожидаемый эффект от реализации
1	2	3	4
1. Выбор надёжного поставщика	Выбор поставщика на основании полной и достоверной информации: наличие сайта, кадровый состав организации, общая характеристика производственного процесса (в т.ч. показатели точности и стабильности производственного процесса), документы, подтверждающие особые достижения (выставки, конкурсы, мастер-классы и т.д.)	1. Разработка программ подготовки и переподготовки кадров отдела закупок 2. Модернизация рабочего места (приобретение оргтехники, обеспечение доступа к интернет-ресурсам, базам данных и т.д.) при необходимости 3. Разработка и внедрение процесса системы менеджмента качества «Управление закупками»	Заключение долгосрочных контрактов на приобретение товара с оптимальным соотношением «цена/качество»
2. Обеспечение условий хранения и доставки исходного сырья и комплектующих к рабочему месту (узлу)	Наличие помещений с оптимальными условиями хранения, организация бесперебойной доставки исходного сырья (полуфабрикатов, комплектующих и т.д.) с минимальным воздействием человеческого фактора, повышение оборачиваемости площадей	1. Организация крытых вентилируемых складов 2. Автоматизированная система подачи сырья (комплектующих)	1. Обеспечение стабильности показателей качества исходного сырья и готовой продукции 2. Снижение затрат на транспортировку сырья

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
3. Снижение технологических потерь	Снижение безвозвратных отходов, обусловленных характером производства, организация безотходного производства	1. Наладка имеющегося оборудования или обновление производственных фондов 2. Разработка технологического регламента производства продукции 3. Программа повышения квалификации сотрудников	Снижение себестоимости выпускаемой продукции, повышение производительности
4. Применение современных цифровых технологий	Автоматизация производственных процессов, применение электронного документооборота. Применение современных систем сбора и кодирования информации (автоматическая идентификация готовой продукции по технологическому штриховому коду для оперативного сбора данных по каждому номеру партии изделий или номеру изделия в процессе изготовления, приемки работником ОТК, передачи из цеха в цех, с участка на участок и на склад готовой продукции)	1. Поэтапное внедрение автоматизированных рабочих мест 2. Приобретение комплекса программно-аппаратных средств, в т.ч реализующих автоматическую идентификацию готовой продукции с использованием технологии штрихового кодирования 3. Формирование баз данных 4. Программы подготовки и переподготовки кадров	Идентификация и прослеживаемость сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Снижение уровня брака
5. Планирование производства	Разработка системы планирования производства, заключающаяся в разработке: стратегического бизнес-плана; плана производства; плана потребности в ресурсах; осуществление закупок и контроля над производственной деятельностью	1. Найм или переподготовка специалистов 2. Организация рабочего места (приобретение оргтехники, обеспечение доступа к Интернет-ресурсам, базам данных и т.д.) 3. Приобретение программных продуктов (1С ERP и т.д.)	Снижение себестоимости выпускаемой продукции за счёт снижения потерь материальных и трудовых ресурсов и повышения производительности

1	2	3	4
6. Экологичность производства	Снижение уровня вредного воздействия на окружающую среду (предотвращение или смягчение неблагоприятных экологических воздействий)	1. Разработка и внедрение системы экологического менеджмента ГОСТ Р ИСО 14001-2016 2. Внедрение системы бережливого производства 3. Разработка энергоэффективных технологий 4. Найм или переподготовка специалистов	Достижение финансовых и операционных преимуществ по результатам внедрения экологически значимых решений, направленных на укрепление позиции организации на рынке (снижение налоговых издержек, повышение имиджа компании на внутреннем и внешнем рынках)
7. Безопасность производства	Создание безопасных условий труда, сохранение жизни и здоровья работников; снижение рисков аварий и инцидентов на опасных производственных объектах; обеспечение пожарной безопасности	1. Разработка и внедрение системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда (ОЗБТ), базирующейся на ГОСТ Р ИСО 45001-2020 2. Приобретение средств ОЗБТ 3. Проведение систематического мониторинга, связанного с ОЗБТ 4. Найм или переподготовка специалистов	Повышение имиджа компании за счёт позиционирования системы здоровьесбережения, снижение текучести кадров, сохранение производственного фонда
8. Мотивация трудовой деятельности	Формирование внешней и внутренней мотивации персонала как реализации комплексного подхода при мотивации труда в организации	1. Организация оптимальных условий труда и отдыха сотрудников с позиций эргономики и обеспечения рабочего места необходимым инструментарием 2. Разработка системы мотивации и стимулирование труда персонала на предприятии (в т.ч. оценка деятельности работников, с целью обеспечения профессионального роста) 3. Обеспечение качественного кадрового документооборота в организации 4. Разработка программ подготовки и переподготовки кадров	Повышение удовлетворенности сотрудников, снижение текучести кадров, повышение производительности, снижение уровня брака

Выбор наиболее приоритетного подхода для конкретного предприятия зависит как от факторов внутренней и внешней среды, так и от значимости решаемой задачи.

Основные этапы предварительной оценки эффективности внедрения и реализации того или иного решения, направленного на снижение внутренних и внешних потерь предприятия, представлены на рисунке.



Алгоритм оценки эффективности управленческого решения

Рассмотрим процедуру выбора приоритетного решения, направленного на снижение или ликвидацию источников высокого риска на предприятии стройиндустрии.

Основной задачей предприятия является предварительная идентификация источников риска и событий, которые могут повлиять на достижение каждой из установленных целей предприятия или сделать выполнение этих целей невозможным [8–10].

Методы идентификации риска могут включать в себя [11–13]:

- методы оценки риска на основе документальных свидетельств, примерами которых являются анализ контрольных листов, анализ экспериментальных данных, а также данных и событий, произошедших в прошлом;

- подход, в соответствии с которым группа экспертов следует установленному процессу идентификации риска посредством структурированного множества подсказок или вопросов;

- индуктивные методы (HAZOP и т.д.).

Рассмотрим идентификацию технологических рисков, связанных с производством строительных материалов, изделий и конструкций, на примере предприятия ООО «Строительные материалы» (г. Пенза). Карта рисков состояния производственного процесса приведена в табл. 2, 3.

Анализ результатов, представленных в табл. 3, свидетельствует, что наибольшая величина риска связана с нарушением технологии производства продукции.

Для выбора наиболее эффективного решения данной проблемы (табл. 1) предлагается использовать показатель «приоритетное число риска».

Данный критерий оценки эффективности конкретного управленческого решения рассчитывается по аналогии с методом FMEA [3]:

$$\text{ПЧР} = S \cdot O \cdot D.$$

Карта рисков при производстве строительных материалов

Описание риска	Вероятность возникновения риска			Степень опасности		
	Малая (<20 %)	Вероятно (20-60 %)	Вполне вероятно (60-100 %)	Не опасен (1-2)	Допустимый	Опасен
Риск поставки сырья несоответствующего качества		+				+
Риск нарушения технологии производства:						
– риск нестабильности производственного процесса		+			+	
– риск невоспроизводимости производственного процесса		+			+	
– риск нестабильности и невоспроизводимости производственного процесса			+			+
Риск производства некачественной продукции		+				+
Риск низкой компетенции работающих		+				+

Т а б л и ц а 3

Оценка риска

Наименование риска	Последствия риска	Оценка, баллы
Риск поставки сырья несоответствующего качества	Качество сырья является важным показателем для производства конечной продукции. Риск достаточно важен	4
Риск нарушения технологии производства	Нарушение режима технологического процесса приводит к снижению качества конечного продукта. Риск достаточно важен	5
Риск производства некачественной продукции	Один из самых важных рисков. Приводит к снижению репутации предприятия	4
Риск низкой компетенции работающих	Приводит к снижению качества конечной продукции	3

Однако в отличие от методологии FMEA увеличение значения ПЧР будет характеризовать повышение риска неэффективности применяемого метода, решения или подхода (табл. 4).

Результаты расчёта критических оценок при определении значимости (эффективности) выбранного метода (решения, подхода) представлены в табл. 5.

Квалиметрические шкалы для расчёта ПЧР

Фактор <i>S</i> Значимость ожидания от используемого метода (решения, подхода)	Фактор <i>O</i> Вероятность реализации метода (решения, подхода)	Фактор <i>D</i> Вероятность положительного эффекта от реализации метода (решения, подхода)
1 – крайне высокая	1 – вероятность 100 %	1 – наверняка положительный эффект будет обнаружен
2 – очень высокая	2 – очень высокая	2 – очень хорошая вероятность
3 – довольно высокая	3 – высокая	3 – хорошая
4 – высокая	4 – близка к высокой	4 – умеренно хорошая
5 – выше средней	5 – выше средней	5 – умеренная
6 – средняя	6 – средняя	6 – слабая
7 – ниже средней	7 – ниже средней	7 – очень слабая
8 – не очень серьезная	8 – не очень низкая	8 – плохая
9 – низкая	9 – низкая	9 – очень плохая
10 – очень низкая	10 – очень низкая вероятность	10 – почти невозможно обнару- жить положительный эффект

Т а б л и ц а 5

Критерии оценки значимости (эффективности) метода

Оценка			Значимость метода	Необходи- мость в дополни- тельных мероприя- тиях
<i>S</i> Значимость ожидания от используемого метода (решения, подхода)	<i>O</i> Вероятность реализации метода (решения, подхода)	<i>D</i> Вероятность положительного эффекта от реализации метода (решения, подхода)		
1	1	1	Идеальный случай	Нет
1	10	10	Метод незначим	Да
10	1	10	Метод незначим	Да
10	10	1	Метод условно значим с учетом изучения прин- ципов предла- гаемого решения	Да
10	10	10	Метод незначим	Да

При проведении экспертизы, участниками которой являлись сотрудники ООО «Строительные материалы» (работники ОТК, технологи и т.д.), было установлено, что наиболее приоритетным решением задачи, связанной со снижением потерь в технологическом процессе, является применение цифровых технологий, а именно внедрение на предприятии системы идентификации и прослеживаемости, позволяющей не только узнать о дефекте, но и найти причину его возникновения [14–16].

Высокое значение эффективности реализации данного управленческого решения связано с высокой значимостью ожиданий от его использования, достаточно высокой вероятностью реализации метода на рассматриваемом предприятии и с высокой вероятностью положительного эффекта от его реализации:

$$\text{ПЧР} = 3 \cdot 4 \cdot 1 = 12.$$

Предлагаемый подход позволит реализовать концепцию управления предприятием строительной индустрии, основанную на постоянном стремлении к устранению всех видов внутренних и внешних потерь, путём оптимизации каждого процесса и максимальной ориентации на потребителя.

### Список литературы

1. Стратегия развития строительной отрасли: приоритеты и цифры. – URL: <https://cntd.ru/news/read/strategiya-razvitiya-stroitelnoy-otrasli-priority-i-cifry>
2. Проблема качества бетона в строительстве. – URL: <http://stroyprofile.com/archive/1852>
3. Логанина, В.И. Обеспечение качества и повышение конкурентоспособности строительной продукции: монография / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 176 с.
4. Banach, J.L. European Alerting and Monitoring Data as Inputs for the Risk Assessment of Microbiological and Chemical Hazards in Spices and Herbs / J.L. Banach, I. Stratakou, H.J. van der Fels-Klerx, H.M. W de. Besten and M.H. Zwietering // Food Control. – 2016. – №69. – P.237–249.
5. Culhane, F.H. Risk to the Supply of Ecosystem Services across Aquatic Ecosystems / F.H. Culhane, A.J. Teixeira, A. Nogueira, F. Borgwardt, D. Trauner, A. Lillebø, G. Piet, M. Kuemmerlen, H.M. Donald, T.O. Higgins, J. Barbière and L.A. Robinson // Science of the Total Environment. – 2019. – №660. – P.611–621.
6. Логанина, В.И. Статистическая оценка риска причинения вреда при несоответствии качества лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, вып. 11. – С.1449–1455.
7. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
8. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.
9. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях строительной индустрии: монография / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М.: АСВ, 2008. – 216 с.
10. ГОСТ Р 51901. 14-2005. Управление рисками. Методика схемы структурной надежности. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200039946>
11. ГОСТ Р 51901. 4-2005. Управление рисками. Правила подачи заявок на проекты. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200041477>
12. Kuselman, I. Total risk of a false decision on conformity of an alloy due to measurement uncertainty and correlation of test results / I. Kuselman, Pennechi, Francesca R da Silva, J.N. Ricardo. – Talanta, 2018. – №189. – P. 666–674.
13. Taguchi, G. The Mahalanobis-Taguchi Strategy, A Pattern Technology System / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York: John Wiley & Sons, 2002.
14. Шиндловский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндловский, О. Щюрц. – М.: Мир, 1976. – 598 с.
15. Адлер, Ю.П. Оперативное статистическое управление качеством / Ю.П. Адлер, Б.Л. Розовский. – М.: Знание, 1984. – 102 с.

### References

1. Development strategy of the construction industry: priorities and numbers. – URL: <https://cntd.ru/news/read/strategiya-razvitiya-stroitelnoy-otrasli-priority-i-cifry>
2. The problem of the quality of concrete in construction. – URL: <http://stroyprofile.com/archive/1852>



3. Loganina, V.I. Quality assurance and improving the competitiveness of construction products: monograph / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov. – Penza: PGUAS, 2014. – 176 p.
4. Banach, J.L. European Alerting and Monitoring Data as Inputs for the Risk Assessment of Microbiological and Chemical Hazards in Spices and Herbs / J.L. Banach, I. Stratakou, H.J. van der Fels-Klerx, H.M. W de. Besten and M.H. Zwietering // *Food Control*. – 2016. – №69. – P.237–249.
5. Culhane, F.H. Risk to the Supply of Ecosystem Services across Aquatic Ecosystems / F.H. Culhane, A.J. Teixeira, A. Nogueira, F. Borgwardt, D. Trauner, A. Lillebø, G. Piet, M. Kuemmerlen, H.M. Donald, T.O. Higgins, J. Barbière and L.A. Robinson // *Science of the Total Environment*. – 2019. – №660. – P.611–621.
6. Loganina, V.I. Statistical assessment of the risk of harm when the quality of paint and varnish coatings does not match / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // *Vestnik MGSU*. – 2019. – Vol. 14, Iss. 11. – P.1449–1455
7. Loganina, V.I. On the issue of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2009. – №. 3–4 (603–604). – P. 42–45.
8. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures / V.I. Loganina // *Building materials*. – 2008. – №. 8. – P. 98–99.
9. Loganina, V.I. Quality management at construction industry enterprises: monograph / V.I. Loganina, O. V. Karpova, L.V. Makarova. – M.: Publishing house ASV, 2008. – 216 p.
10. GOST R 51901. 14-2005. Risk management. Method of structural reliability scheme. – URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200039946>
11. GOST R 51901. 4-2005. Risk management. Application guidelines for projects. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200041477>
12. Kuselman, I. Total risk of a false decision on conformity of an alloy due to measurement uncertainty and correlation of test results / I. Kuselman, Pennechi, Francesca R da Silva, J.N. Ricardo. – *Talanta*, 2018. – №189. – P. 666–674.
13. Taguchi, G. The Mahalanobis-Taguchi Strategy, A Pattern Technology System / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York: John Wiley & Sons, 2002.
14. Shindlovsky, E. Statistical methods of quality management / E. Shindlovsky, O. Shchurts. – M.: Mir, 1976. – 598 p.
15. Adler, Yu.P. Operational statistical quality management / Yu.P. Adler, B.L. Rozovsky. – M.: Knowledge, 1984 –102p.

УДК 666.972

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_18

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Тараканов Олег Вячеславович**,  
доктор технических наук, профессор,  
декан факультета «Управление  
территориями»  
E-mail: tarov60@mail.ru

**Белякова Елена Александровна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Кадестр недвижимости и право»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

*ООО «АЗИЯ ЦЕМЕНТ»*

Россия, 440000, г. Пенза,  
ул. Бакунина/Плеханова д.20 «Б»/34,  
тел.: (8412) 28-09-98, факс: (8412) 68-10-26

**Суздальцев Олег Владимирович**,  
кандидат технических наук, начальник  
отдела технологии бетонов ООО «АЗИЯ  
ЦЕМЕНТ»  
E-mail: osuzdaltsev@asiacement.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Tarakanov Oleg Vyacheslavovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Dean of the faculty «Territory Management»  
E-mail: tarov60@mail.ru

**Belyakova Elena Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Real Estate Cadastre and  
Law»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

*ASIA CEMENT LLC*

Russia, 440000, Penza, 20 B/34  
Bakunin/Plekhanova St.,  
tel.: (8412) 28-09-98, fax: (8412) 68-10-26

**Suzdaltsev Oleg Vladimirovich**,  
Candidate of Sciences, Head of Concrete  
Technology Office  
of the «AZIA CEMENT» LLC  
E-mail: osuzdaltsev@asiacement.ru

## СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ЦЕМЕНТА В БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

О.В. Тараканов, О.А. Суздальцев, Е.А. Белякова

Рассматривается получение высокопрочных бетонов нового поколения с низким показателем удельного расхода цемента на единицу прочности ( $K_{вд} = 2,8-5,4$  кг/МПа). Показана высокая эффективность карбонатных микронаполнителей при получении бетонов прочностью при сжатии 74–128 МПа. Экспериментально подтверждено использование в технологии бетонов нового поколения смешанных полиминеральных микронаполнителей.

*Ключевые слова: бетоны нового поколения, пластификаторы, карбонатный микронаполнитель, молотый гранит, водоредуцирование, прочность, удельный расход на единицу прочности*

## REDUCTION OF CEMENT CONSUMPTION IN CONCRETE OF A NEW GENERATION

O.V. Tarakanov, O.A. Suzdaltsev, E.A. Belyakova

Production of high-strength concrete of a new generation with a low rate of specific consumption of cement per unit strength ( $C_d = 2.8-5.4$  kg / MPa) is considered. The high efficiency of carbonate microfillers in the production of concrete with a compressive strength of 70–128 MPa is shown. The direction of using mixed polymineral microfillers in the technology of new generation concretes is proved and experimentally confirmed.

*Keywords: new generation concrete, plasticizers, carbonate microfiller, ground granite, water reduction, strength, specific consumption per unit of strength*

Высокопрочные и многофункциональные бетоны нового поколения (БНП) становятся все более востребованными в строительном производстве, поскольку позволяют не только сокращать количество материала, но и обеспечивать высокую

долговечность конструкций. В настоящее время в строительстве массово применяются бетоны классов В15–В30, имеющие достаточно высокий удельный расход цемента

$$(K_{уд} = \frac{Ц(кг)}{R(МПа)}) \text{ в пределах } 8\text{--}10 \text{ кг/МПа.}$$

Опыт передовых стран свидетельствует о высокой востребованности высокопрочных бетонов классов В65 и выше при возведении высотных зданий и специальных сооружений. Подобные бетоны не только обладают полифункциональными свойствами, но и имеют высокую экономическую эффективность. При ориентировочном удорожании БНП в 1,3–1,5 раза они обеспечивают снижение расходов всех компонентов бетонов вследствие значительно высокой прочности, возможности уменьшения сечения и массы конструкций, а следовательно, снижения параметров фундаментов, транспортных расходов и т.д.

Основными достижениями технологии высокопрочных бетонов является использование высокоэффективных супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП) и тонкомолотых микронаполнителей, позволяющих повышать эффективность пластификаторов, снижать до 30–40% водосодержание и значительно повышать прочность. Однако для традиционных малоцементных бетонов с расходами цемента 200–300 кг/м<sup>3</sup> бетонной смеси СП и ГП малоэффективны, хотя многие бетонные заводы используют именно такие технологии.

Эффективность пластификаторов повышается с увеличением расхода цемента до 500–600 кг/м<sup>3</sup>; можно снизить этот расход на 15–20% и получать равнопрочные бетоны с бездобавочными составами. В работах В.И. Калашникова отмечается высокая эффективность СП и ГП в гидравлически неактивных минеральных порошках, во многих случаях превышающая активность пластифицирующих добавок в цементах. В работе [8] эти факты также подтверждены. Именно это явление и легло в основу получения высоконаполненных суперпластифицированных бетонов нового поколения с высоким водоредуцированием и прочностью до 150 МПа и выше.

Цемент является быстро гидратирующей системой, связывающей на ранних стадиях большое количество воды в метастабильные гидроалюминаты кальция и эттрингит, снижая тем самым эффективность СП и ГП. К тому же, важное значение имеет поверхностный заряд частиц цемента и минеральных микронаполнителей. К примеру, тонкомолотый песок значительно хуже разжижается в присутствии СП и ГП, чем тонкомолотый гранит или кальцит. Несмотря на то, что гранит и кальцит имеют совершенно различную кристаллическую основу, влияние СП и ГП на них весьма эффективно.

Решение проблемы получения высокопрочных бетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности заключается в совместном использовании цемента и каменной муки (до 100% от массы цемента) для создания реологически активной тонкодисперсной матрицы. В зависимости от расхода цемента в бетоне каменная мука может добавляться в количестве от 30 до 100% от массы цемента. Например, при малых расходах цемента (до 200 кг/м<sup>3</sup>) количество наполнителя должно составлять не менее 90–100%, при более высоких расходах (до 500 кг) – 30–50%. Количество каменной муки определяется расчетным путем и тестируется по специальной методике.

Важное значение, кроме реологической активности микронаполнителя, имеет его гидратационная (пуццоланическая) активность, позволяющая связывать избыточное количество гидратной извести в гидросиликатные структуры. При определении целесообразности использования каменной муки преимущество должно отдаваться порошкам, полученным помолом плотных и прочных пород. Например, порошки, полученные на основе диатомита, пористой опоки или песчаника, не обладают реологической активностью вследствие высокой пористости.

В литературе [6–7] отмечаются данные о влиянии карбонатных пород на процессы гидратации и твердения цементных материалов. Однако, сведения о влиянии тонко-

дисперсного кальцита на цементные материалы с низким удельным расходом цемента на единицу прочности весьма ограничены и требуют дополнительного анализа.

В задачу исследования входило изучение влияния добавок молотого известняка и композиционных наполнителей на прочность песчаных и щебеночных бетонов и доказательство возможности получения высокопрочных бетонов при средних расходах цемента.

Исследования проводились совместно с ООО «АЗИЯ ЦЕМЕНТ» на цементах ЦЕМ II/A-II 42,5 Н (с добавкой опоки) и СЕМ 0 52,5 Н (бездобавочный).

В качестве пластификаторов использовались добавки на поликарбоксилатной основе Кратасол ПК и Melflux 5581F.

Результаты испытаний образцов бетона нормального твердения представлены в таблице.

Анализ результатов показал, что использование в составе бетонов молотых горных пород позволяет получать высокопрочные бетоны с пределом прочности при сжатии 74–128 МПа при низком показателе удельного расхода цемента на единицу прочности ( $K_{уд} = 2,9–5,5$  кг/МПа). Самое низкое значение  $K_{уд} = 2,86$  кг/МПа было получено при использовании молотого известняка в количестве 50% от массы цемента. При этом была получена прочность щебеночного бетона  $R_{сж}^{28} = 106$  МПа при расходе цемента всего  $304$  кг/м<sup>3</sup>, а в возрасте 1 суток прочность составила 42 МПа.

Перспективным направлением в технологии бетонов нового поколения является использование бинарных наполнителей. Например, при использовании смеси известняка и гранита была получена прочность  $R_{сж}^{28} = 127,6$  МПа.

Результаты испытания образцов бетона нормального твердения при сжатии на прочность

№ п/п	Марка цемента (Ц)	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>					В/Ц	Прочность образцов при сжатии, МПа, через			Удельный расход цемента на единицу прочности, кг/МПа
		Ц	Минеральная добавка	П	Щ	Вид добавки для бетона, %Ц		1 сут	7 сут	28 сут	
1	ЦЕМ 0 52,5 Н	400	Молотый известняк $S_{уд}=230$ м <sup>2</sup> /кг, 200	875	860	Кратасол ПК, 0,4%	0,38	38,42	60,91	73,8	5,4
2	ЦЕМ II/A-II 42,5 Н	400	Молотый известняк $S_{уд}=230$ м <sup>2</sup> /кг, 200	875	860	Кратасол ПК, 0,55%	0,42	30,73	61,44	80,1	5
3	ЦЕМ 0 52,5 Н	665	Молотый гранит $S_{уд}=370$ м <sup>2</sup> /кг, 313	1166	–	Melflux 5581F, 1,0%	0,347	76,0	118,0	128,0	5,19
4	ЦЕМ 0 52,5 Н	698	Молотый известняк $S_{уд}=320$ м <sup>2</sup> /кг, 117 Молотый гранит $S_{уд}=420$ м <sup>2</sup> /кг, 233	1047	–	Melflux 5581F, 1,0%	0,347	67,2	108	127,6	5,47
5	ЦЕМ 0 52,5 Н	304	Молотый известняк $S_{уд}=320$ м <sup>2</sup> /кг, 152	972	871	Melflux 5581F, 1,0%Ц	0,515	42,0	78,0	106,4	2,86
6	ЦЕМ 0 52,5 Н	300	Молотый известняк $S_{уд}=320$ м <sup>2</sup> /кг, 222	348	961	Melflux 5581F, 1,0%Ц	0,569	34,0	62,0	80,0	3,75

Еще один вывод можно сделать из анализа полученных результатов: применение молотого известняка в количестве 50% от массы цемента позволяет получать более высокую прочность бетона с использованием добавочного ЦЕМ II / А-П 42,5 Н (с добавкой 10% опоки) по сравнению с ЦЕМ 0 52,5 Н (составы 1 и 2) даже при несколько большем значении В/Ц. В возрасте 1 суток прочность бетона на добавочном цементе (ЦЕМ II / А-П 42,5 Н) ниже, чем на ЦЕМ 0 52,5 Н, а к 28 суткам она становится выше.

Следует отметить, что при использовании в бетонах бинарных минеральных порошков уменьшается вероятность снижения эффективности водоредуцирования за счет применения суперпластификаторов различных видов.

Нашими исследованиями [8], например, установлено, что некоторые минеральные микронаполнители лучше разжижаются в присутствии суперпластификатора С-3, чем в присутствии добавок Melflux. Было также установлено, что характеры влияния СП и ГП на растекаемость тонкомолотого кальцита и гранита близки. Карбонатные микронаполнители в смеси с тонкомолотым песком и обычным песком (песком заполнителем) могут быть использованы для получения высокопрочных и самоуплотняющихся бетонов классов В100–В140 [9]. Следует иметь в виду также, что добавки СП и ГП существенно различаются конформационным строением молекул и длиной основных и боковых цепей, поэтому и разжижающее их влияние будет различным на наполнителях различного кристаллохимического строения, частицы которых могут существенно отличаться по зарядовому состоянию.

Известно [1], что первичным актом при гидратации наполненных цементных систем является адсорбция добавок на поверхности цементных частиц и микронаполнителей, поэтому и пластифицирующее влияние добавок будет проявляться различным образом, особенно при домале цементно-минеральных смесей, способствующем появлению дополнительных дефектов поверхности за счет разрыва ионных и ковалентных связей. Известно также, что поверхность частиц любого природного материала гидроксильрована и при возможном совместном помале цемента с минеральным порошком начинается поверхностная гидратация, которая может оказать существенное влияние на эффективность действия добавок.

Рациональное использование отходов горной промышленности, накопленных в колоссальных количествах, позволит не только решать важнейшие экологические проблемы, но и снижать количество цемента в бетонах без снижения прочности. В настоящее время следует задуматься о снижении производства цемента вследствие выделения на одну тонну клинкера почти одной тонны углекислого газа. В передовых странах в настоящее время преимущество отдается увеличению производства композиционных цементов. Малоцементные бетоны и бетоны с использованием композиционных цементов должны занять прочную позицию в бетоноведении в будущем.

Выводы:

1. Подтверждена высокая эффективность применения тонкодисперсных микронаполнителей, в том числе бинарных систем из отходов горных пород в технологии бетонов нового поколения.

2. Выявлено, что реологическая подвижность бетонных смесей в значительной степени зависит от поверхностного заряда частиц микронаполнителя и адсорбции на них молекул гиперпластификаторов, что в свою очередь позволяет получить высококонцентрированные самоуплотняющиеся бетонные смеси.

3. Показано, что введение в состав бетонных смесей тонкомолотых горных пород позволяет значительно снижать расход цемента и получать высокопрочные бетоны с низким удельным расходом цемента на единицу прочности ( $K_{уд} = 2,9–5,5$  кг/МПа).

#### Список литературы

1. Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов, Д.В. Калашников, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 70.

2. Калашников, В.И. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – № 12 (988). – С. 48–52.
3. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С.103–106.
4. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4–6.
5. Тараканов, О.В. Повышение эффективности комплексных противоморозных добавок при зимнем бетонировании / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 27 (46). – С.39–46.
6. Тараканов, О.В. Гидратация и твердение цементных материалов с добавками минеральных шламов / О.В. Тараканов, Т.В. Пронина. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 153 с.
7. Тараканов, О.В. Оценка влияния карбонатного микронаполнителя на кинетику начального структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, К.А. Шешкина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – Вып. 2 (19). – С. 40–46.
8. Тараканов, О.В. Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – Вып. 4 (33). – С. 60–69.
9. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 70–75.

#### References

1. Kalashnikov, V.I. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, O.V. Tarakanov, D.V. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev // Building materials. – 2014. – No. 9. – P. 70.
2. Kalashnikov, V.I. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov // BST: Bulletin of construction equipment. – 2016. – No. 12 (988). – P. 48–52.
3. Kalashnikov, V.I. Terminology of the science of concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov // Stroitelnye materialy. – 2011. – No. 3. – P.103–106.
4. Kalashnikov, V.I. Calculation of the compositions of high-strength self-compacting concrete / V.I. Kalashnikov // Stroitelnye materialy. – 2008. – No. 10. – P. 4–6.
5. Tarakanov, O.V. Improving the efficiency of complex antifreeze additives during winter concreting / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // Bulletin of VolgGASU. Series: Construction and architecture. – 2012. – Iss. 27 (46). – P.39–46.
6. Tarakanov, O.V. Hydration and hardening of cement materials with additives of mineral sludge / O.V. Tarakanov, T.V. Pronina. – Penza: Publishing House of the Penza State University of Architecture and Construction, 2006. – 153 p.
7. Tarakanov, O.V. Evaluation of the effect of carbonate microfiller on the kinetics of initial structure formation and the composition of hydrated phases of cement systems / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, K.A. Steshkina // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 2(19). – P. 40–46.
8. Tarakanov, O.V. Formation of the microstructure of cement materials with mineral and complex additives / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4 (33). – P. 60–69.
9. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov [and others] // Construction materials. – 2014. – No. 9. – P. 70–75.

*Московский политехнический университет*  
Россия, 107023, г. Москва,  
ул. Б.Семёновская, д. 38

**Будылина Евгения Александровна**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Инфокогнитивные  
технологии»

E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гарькина Ирина Александровна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

**Данилов Александр Максимович**,  
доктор технических наук,  
профессор, советник РААСН,  
зав. кафедрой «Математика  
и математическое моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

*Moscow Polytechnic University*

Russia, 107023, Moscow,  
38, B.Semenovskaya St.

**Budylna Eugenia Aleksandrovna**,  
Candidate of Physical and Mathematical  
Sciences, Associate Professor of the  
department «Infocognitive Technologies»

E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Garkina Irina Aleksandrovna**,

Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Mathematics  
and Mathematical Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

**Danilov Alexander Maksimovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, Head of the  
department «Mathematics and Mathematical  
Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

## РАЦИОНАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Рассматриваются большие сложные системы, сформированные по модульному принципу. Определяются условия переноса результатов автономных исследований подсистем на систему в целом (связаны с полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы). Дается методика формализации причинно-следственных связей на основе построения когнитивной карты. Приводится сравнительный анализ методов идентификации в зависимости от форм задания идентификационных моделей. Показывается эффективность использования последовательного анализа Вальда при синтезе композиционных материалов.

*Ключевые слова: сложные системы, композиты, моделирование, идентификация, состояние, рациональные методы*

## RATIONAL IDENTIFICATION OF COMPLEX SYSTEMS

Е.А. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Large complex systems formed according to the modular principle are considered. The conditions for transferring the results of autonomous studies of subsystems to the system as a whole are determined (related to the completeness of understanding the processes of formation of the structure and properties of the system). A technique for formalizing cause-and-effect relationships based on the construction of a cognitive map is given. A comparative analysis of identification methods is given depending on the forms of specifying identification models. The effectiveness of using sequential Wald analysis in the synthesis of composite materials is shown.

*Keywords: complex systems, composites, modeling, identification, state, rational methods*

## 1. Сепаратные подсистемы

Модульный принцип предполагает осуществление декомпозиции системы на сепаратные подсистемы, обладающие определенной степенью автономности. Каждый элемент иерархической структуры системы, находящийся на определенном уровне, представляет собой модуль. С ростом уровня иерархии (понижение номера уровня) происходит объединение модулей в более крупные. Объединение сепаратных подсистем в единую систему производится с учетом межсистемных связей. Каждый элемент в иерархической структуре качества системы определяет автономно (без учета всех межсистемных связей) качество сепаратной системы. Результаты автономных исследований модулей можно использовать для определения интегративных свойств в основном лишь на качественном уровне. Интегративные свойства системы определяются связями между модулями, уровнями и на каждом из уровней. Возможность использования результатов автономных исследований сепаратных подсистем для синтеза системы в целом часто можно обеспечить устранением межсистемных связей с помощью введения настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам. Для переноса результатов автономных исследований смачиваемости на формирование структуры и свойств материала необходимо знать параметры смачиваемости входящих компонентов в стесненных условиях. Принципиально это можно обеспечить использованием настраиваемой эталонной модели, предусматривающей регулирование давления между компонентами. Настройку можно обеспечить с использованием экспериментальных данных на образцах. Использование эталонных моделей с децентрализацией модулей по входам не нова (использовалась С.Д. Земляковым в задачах синтеза систем управления). Здесь же делается попытка распространения метода для решения задач строительного материаловедения [1, 2].

Традиционно используемые в строительном материаловедении данные о кинетических процессах формирования структуры и физико-механических характеристик материала по существу являются автономными исследованиями сепаратных модулей. При этом требуемые параметры кинетических процессов определяются с учетом межсистемных связей.

## 2. Структурирование: когнитивное моделирование

Здесь основу моделирования составляет когнитивная карта. Она позволяет формализовать причинно-следственные связи (взаимодействие в системе основных положительных и отрицательных обратных связей, существующих между процессами), определяющие ее функционирование. При построении таких моделей может быть использована неполная, нечеткая и даже противоречивая информация.

Модели на основе когнитивных карт являются лишь предварительным этапом решения прикладных задач управления слабоструктурированными системами, наряду с не менее важным этапом формализации представлений о системе. В силу неизбежного и существенного участия человека нечеткость и искажение содержательного смысла конструкций модели относительно их математической интерпретации порождает риск недостоверной оценки влияния факторов, особенно при недостатке данных для такой оценки.

В модели когнитивная карта отражает субъективные представления (как индивидуальные, так и коллективные) исследуемой проблемы, связанной с функционированием и развитием системы. На предварительном этапе большинство сложных систем могут рассматриваться как слабоструктурированные. Построение с использованием когнитивной карты иерархической структуры критериев качества, а на ее основе и иерархической структуры собственно системы (если это возможно) в дальнейшем позволяет рассматривать систему как структурированную.

Сложность системы требует ее междисциплинарных исследований и привлечения при построении когнитивной карты специалистов, компетентных в различных узкопредметных областях знаний; формализации первичных представлений о слабоструктурированной проблеме в виде коллективной когнитивной карты (для обобщения и



согласования разных представлений). Решение этой задачи в известной мере возможно с использованием методов концептуальной структуризации, критериев и частных технологий формирования и согласования коллективных понятий [3, 4].

### 3. Идентификация

Особое место в научных исследованиях занимает моделирование процессов и явлений. Наибольшими возможностями обладает математическое моделирование, позволяющее исследовать процессы, имеющие различное физическое содержание, но описываемые одинаковыми математическими соотношениями. Существуют различные методы идентификации, основанные на разных подходах к форме задания идентификационных моделей (дифференциальные уравнения, разностные уравнения, передаточные функции, градиентные выражения и т.п.). Но ни один из методов идентификации не годится для идентификации всех видов систем. Каждый из них имеет свою область или области применения. Сейчас уже можно говорить о теории идентификации, имеющей дело с оцениванием параметров на основании измеренных текущих входных и выходных данных, причем качество идентификации повышается с увеличением числа измерений. Ошибки идентификации, естественно, приводят к ошибкам в управлении или в требуемом выходном параметре системы (эти ошибки могут быть использованы для дальнейшего улучшения идентификации). Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяют получить абсолютно адекватные математические модели. Математическая модель, описывая формализованный процесс функционирования системы, охватывает только основные, характерные закономерности (невозможно указать формальные правила для выбора характеристик состояний и параметров исследуемых реальных систем). Исследователь вынужден руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы процессов функционирования системы.

Анализ каждой сложной системы связан с использованием системного подхода, в котором содержатся экспериментальное, эвристическое и строгое математическое начала.

Задачу идентификации характеристик системы можно рассматривать как дуальную (сопряженную) по отношению к задаче управления системой. Нельзя управлять системой, если она не идентифицирована (заранее, либо в процессе управления). Естественно, знание результатов идентификации до начала процесса управления существенно влияет на его реализацию.

Решение задачи построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением фактически является одним из элементов общей научной методологии. В динамической системе происходит взаимодействие между его разнотипными частями, и формируются наблюдаемые (выходные) сигналы; остальные рассматриваются как возмущения. Модель в широком смысле и определяется как совокупность предполагаемых связей между наблюдаемыми сигналами.

Выбор метода идентификации определяется неоднозначно, ибо в самой постановке задачи заранее предполагается неопределенность (неполнота знаний об объекте, ограничения в наблюдениях объекта во времени, неточность измерения сигналов на входе и на выходе объекта и т. п.). Задача идентификации как обратная относится к классу некорректных задач; необходима оценка влияния ошибок идентификации на качество управления системой по результатам идентификации.

Никакими методами невозможно идентифицировать динамические параметры системы, находящейся в установившемся режиме (идентификация динамических параметров на основании измерений возможна только в случае, когда измерения выполнены в период переходного состояния системы).

При идентификации параметров нелинейных систем последние должны принадлежать к заранее заданному виду: параметр, наилучшим образом описывающий систему при одной форме представления, может оказаться совершенно неудовлетворительным при другом описании системы.

Адекватность модели достигается сужением сферы использования данной системной модели, ограниченностью ее практической применимости. Процесс моделирования позволяет глубже проникнуть в существо объекта-оригинала, а модельные исследования приводят к открытию новых свойств и закономерностей функционирования изучаемой системы.

При сколь угодно глубоком познании невозможно получить исчерпывающую характеристику изучаемого объекта. Задача состоит в том, насколько качественно данный уровень познания позволяет разрешить поставленную проблему. Системные исследования являются симбиозом теоретических модельных экспериментов с наблюдениями, эмпирическими исследованиями, натурными (лабораторными) экспериментами. Ведущая роль моделирования состоит в том, что модель должна предшествовать натурным экспериментам и указывать направления сбора информации в процессе наблюдений. В то же время результаты модельных исследований нуждаются в фактических исходных данных и требуют экспериментального подтверждения.

Основное внимание в публикациях направлено на постановку и исследование математических задач идентификации; при этом практически не затрагиваются содержательные, человеческие аспекты практической идентификации. По [5, 6] наличие модели субъекта идентификации создает потенциальную возможность построения адекватной схемы идентификации в целом. Ее реализация связана в первую очередь с созданием общей схемы рациональной идентификации. Эта схема должна содержать набор четко выделенных гипотез, с помощью которых можно объяснить наблюдаемые особенности идентификационного подхода.

#### 4. Анализ Вальда

В большинстве случаев техническая экспертиза различных объектов (здания и сооружения, транспортные средства и др.) аналогична постановке диагноза врачом (с последовательным добавлением все новых симптомов) заболевания. Здесь число наблюдений, на основании которых принимается решение, заранее не фиксируется и зависит от результатов, полученных на данной стадии эксперимента наблюдений. На каждой стадии результаты наблюдений представляют случайную выборку из генеральной совокупности и являются случайными, равно как и момент прекращения наблюдений, зависящий от полученных результатов. К последовательной схеме наблюдений целесообразно обращаться в ситуациях, когда каждое наблюдение является дорогостоящим, труднодоступным или невозможным.

В последовательной процедуре [7] вместо одного порога, как в классической процедуре, задаются два порога: проверяемая гипотеза (основная или нулевая)  $H_0$  и альтернативная гипотеза (конкурирующее с ней предположение)  $H_1$ . Вследствие ограниченности выборки, полученной из генеральной совокупности, по которой проверяется гипотеза  $H_0$ , возможны ошибки как в ту так и в другую сторону. В небольшой доле случаев  $\alpha$  гипотеза  $H_0$  может оказаться отвергнутой, в то время как на самом деле она является справедливой, или наоборот, в доле  $\beta$  случаев принимается гипотеза  $H_0$ , в то время как она является ошибочной, а справедливой оказывается  $H_1$ .

Выбор величины уровня значимости  $\alpha$  (ошибка первого рода – вероятность  $\alpha$  ошибочного отклонения гипотезы  $H_0$ ) зависит от сопоставления потерь вследствие ошибочных заключений (при  $\alpha = 0,05$  в 5 случаях из 100 ошибочно отвергается гипотеза  $H_0$ ); вероятность  $\beta$  принятия неправильной гипотезы  $H_0$  – ошибка второго рода. Чем весомее потери от ошибочного отказа от  $H_0$ , тем меньше выбирается  $\alpha$ . Однако в большинстве практических задач такое сопоставление затруднительно.

#### Выводы

1. Предложен модульный принцип декомпозиции сложной системы на отдельные подсистемы с определенной степенью автономности. Определены условия переноса результатов автономных исследований подсистем на систему в целом.

2. Указана методика построения когнитивной карты (формализация причинно-следственных связей).

3. Дан сравнительный анализ методов идентификации при разных подходах к форме задания аналитических моделей.
4. Показана эффективность использования последовательного анализа Вальда при синтезе композиционных материалов.

### Список литература

1. Будылина, Е.А. Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 41–45.
2. Гарькина, И.А. Аналитическое конструирование композитов: многомодельность, структура модели, декомпозиция, критерии качества / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 22–28.
3. Абрамова, Н.А. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт / Н.А. Абрамова, С.В. Коврига // Проблемы управления. – №6. – 2008. – С. 23–33.
4. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование и управление качеством специальных композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15, № 4. – С. 660–661.
5. Смирнов, В.А. Стохастическое моделирование наноразмерных систем / В.А. Смирнов, Е.В. Королев, С.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 6–14.
6. Селяев, В.П. Нелинейные модели деградации полимерных композитов, работающих в агрессивных средах / В.П. Селяев, С.Ю. Грязнов, Д.Р. Бабушкина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 5–15.
7. Будылина, Е.А. Синтез композитов: логико-методологические модели / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Д.С. Сорокин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 149.

### References

1. Budylna, E.A. Conceptual approaches to system design of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №1 (46). – P. 41–45.
2. Garkina, I.A. Analytical design of composites: multi-modeling, model structure, decomposition, quality criteria / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 2 (47). – P. 22–28.
3. Abramova, N.A. Some criteria for the reliability of models based on cognitive maps / N.A. Abramova, S.V. Kovriga // Problemy upravleniya. – №6. – 2008. – P. 23–33.
4. Garkina, I.A. Cognitive modeling and quality control of special composites / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Review of applied and industrial mathematics. – 2008. – Vol. 15, № 4. – P. 660–661.
5. Smirnov, V.A. Stochastic modeling of nanoscale systems / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, S.S. Inozemtsev // Nanotechnologies in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4. – № 1. – P. 6–14.
6. Selyaev, V.P. Nonlinear degradation models for polymer composites operating in aggressive environments / V.P. Selyaev, S.Yu. Gryaznov, D.R. Babushkina // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 2 (47). – P. 5–15.
7. Budylna, E.A. Synthesis of composites: logical and methodological models / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov, D.S. Sorokin // Modern problems of science and education. – 2014. – № 5. – P. 149.

УДК 691.54

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_28

*Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева*

Россия, 430005, г. Саранск,  
ул. Большевистская, д.68,  
тел./факс: (8342) 47-71-56

**Низина Татьяна Анатольевна,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»,  
советник РААСН  
E-mail: nizinata@yandex.ru

**Бальков Артемий Сергеевич,**  
кандидат технических наук, преподаватель  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: artbalrun@yandex.ru

**Коровкин Дмитрий Игоревич,**  
инженер научно-исследовательской  
лаборатории эколого-метеорологического  
мониторинга, строительных технологий  
и экспертиз  
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

**Володин Сергей Валерьевич,**  
магистрант архитектурно-строительного  
факультета  
E-mail: svolodin12@gmail.com

**Володин Владимир Владимирович,**  
инженер научно-исследовательской  
лаборатории эколого-метеорологического  
мониторинга, строительных технологий  
и экспертиз  
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

*National Research Ogarev Mordovia State  
University*

Russia, 430005, Saransk,  
68, Bolshevistskaya St.,  
tel./fax: +7(8342)47-71-56

**Nizina Tatyana Anatolevna,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Building structures»,  
Adviser of the Russian Academy Of  
Architecture and Construction Sciences  
E-mail: nizinata@yandex.ru

**Balykov Artemy Sergeevich,**  
Candidate of Sciences, lecturer of the  
department «Building structures»  
E-mail: artbalrun@yandex.ru

**Korovkin Dmitry Igorevich,**  
Engineer of the research laboratory of  
ecological and meteorological monitoring,  
construction technologies and expertise  
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

**Volodin Sergey Valerievich,**  
Master's student of the Faculty of Architecture  
and Construction  
E-mail: svolodin12@gmail.com

**Volodin Vladimir Vladimirovich,**  
Engineer of the research laboratory of  
ecological and meteorological monitoring,  
construction technologies and expertise  
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНОГО СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА И МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ\*

Т.А. Низина, А.С. Бальков, Д.И. Коровкин, С.В. Володин, В.В. Володин

На основе экспериментальных исследований изучено влияние минеральных добавок различного состава (кремнеземистая, алюмосиликатная, сульфоалюминатная, карбонатная) и поликарбоксилатного суперпластификатора на технологические и физико-механические свойства цементных систем с выявлением наиболее эффективных модификаторов и их комплексов. Установлена возможность получения на основе сульфоалюминатного модификатора составов с высокими технологическими показателями при значительно меньшем содержании дорогостоящего поликарбоксилатного пластифика-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-12036.

тора. Выявлено, что наиболее оптимальные комплексы добавок для получения модифицированных цементных композитов с высокими прочностными показателями могут быть получены при совместном применении микрокальцита, микрокремнезема и сульфоалюминатного модификатора.

*Ключевые слова: цементный камень, минеральные добавки, пластификатор, микрокремнезем, метакаолин, расширяющий сульфоалюминатный модификатор, распыл, плотность, предел прочности при сжатии*

## THE EFFECT OF COMPLEX MODIFIERS ON THE BASIS OF POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZER AND MINERAL ADDITIVES OF DIFFERENT COMPOSITIONS ON TECHNOLOGICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT SYSTEMS

T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, S.V. Volodin, V.V. Volodin

On the basis of experimental studies the influence of mineral additives of different composition (siliceous, aluminosilicate, sulfoaluminate, carbonate) and polycarboxylate superplasticizer on technological and physical-mechanical properties of cement systems with identification of the most effective modifiers and their complexes is studied. The invention makes it possible to produce high-tech compositions on the basis of a sulfoaluminate modifier with a significantly reduced content of expensive polycarboxylate plasticizer. The article reveals that the most optimal complexes of additives for producing modified cement composites with high strength indices can be obtained with the combined use of microcalcite, microsilica and sulfoaluminate modifier.

*Keywords: cement stone, mineral additives, plasticizer, microsilica, metakaolin, expanding sulfoaluminate modifier, spreading, density, ultimate strength at compression*

Как известно, свойства цементного бетона предопределяются его структурой, формирование которой начинается и проходит через несколько стадий: выбор сырья и рецептуры; проектирование состава; смешивание компонентов, получение, укладка и уплотнение бетонной смеси; схватывание, твердение и нарастание прочности бетона. Одним из центральных и определяющих направлений формирования структуры бетонов считается управление поровым пространством и минераломорфологическим состоянием системы твердения посредством регулирования соотношения аморфной (скрытокристаллической) и кристаллической фаз новообразований, достигаемых модифицированием состава цементного камня химическими и минеральными добавками, вводимыми как отдельно, так и в комплексах [1–5].

В настоящее время номенклатура минеральных добавок, используемых для повышения физико-механических свойств и технико-экономической эффективности цементных бетонов, включает весьма широкий перечень материалов природного, искусственного и техногенного происхождения. Из многочисленных видов минеральных модификаторов наибольшую эффективность для рецептуры цементных композитов с высокими эксплуатационными свойствами имеют:

- высокоэффективные пластифицирующие добавки, особенно суперпластификаторы IV поколения на основе поликарбоксилатов и акрилатов, обеспечивающие возможность значительного снижения водоцементного отношения и водопотребности цементных систем (до 35÷40 % и более) [6, 7]. Способность разжижения у них значительно выше, чем у традиционных пластификаторов на основе лигносульфоната, сульфомеламинформальдегида и сульфонафталинформальдегида;
- высокодисперсные пуццолановые добавки, содержащие аморфный кремнезем или глинозем и обладающие высокой реакционной активностью, в частности микрокремнезем и метакаолин. Известно, что одним из основных факторов эффективности использования микрокремнезема и метакаолина в рецептуре цементных систем является способность аморфного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) и алюмосиликата ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) взаимодействовать с гидроксидом кальция твердеющего цементного камня с образо-

ванием низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, что, в свою очередь, способствует повышению прочности композитов [3, 4, 8, 9];

- расширяющие добавки сульфоалюминатного типа. Применение данных модификаторов позволяет регулировать линейные и объемные деформации в процессе твердения композитов за счет формирования увеличенных в объеме кристаллогидратов (этtringит первичный и др.) [10, 11];

- карбонатные наполнители (известняки, доломитизированные известняки, доломиты). Действие карбонатных пород основано на способности порообразующего минерала кальцита выступать в качестве центра кристаллизации новообразований, что приводит к формированию кристаллизационных оболочек, срастанию частиц и, в целом, повышению прочности наполненных цементных систем [12–14].

Ввиду многокомпонентности рецептуры модифицированных цементных систем и разнообразия применяемых добавок в рассматриваемой области остается множество нерешенных задач. В частности, мало изучен механизм действия в пластифицированных цементных системах комплексов минеральных добавок разного химико-минералогического состава; не решена проблема совместимости органических и минеральных добавок между собой, с портландцементом и другими компонентами сложной рецептуры модифицированных цементных композитов; в полной мере не раскрыто влияние комплексных добавок на процессы гидратации, формирования структуры и физико-механические свойства модифицированных цементных систем.

Целью данного исследования являлось установление закономерностей влияния поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок (МД) различного состава (кремнеземистая, алюмосиликатная, сульфоалюминатная, карбонатная) на технологические и физико-механические свойства цементных систем с выявлением наиболее эффективных модификаторов и их комплексов.

Исследования проводились на цементных системах с суммарной дозировкой минеральных добавок 20 % от массы вяжущего (Ц+МД) при фиксированном водовязущем отношении  $V/(Ц+МД) = 0,24$ . Основным компонентом вяжущего являлся портландцемент 500-Д0-Н (Ц) производства ПАО «Мордовцемент». В качестве контрольного принят состав без минеральных добавок с равным водосодержанием и дозировкой пластификатора 1 % от массы портландцемента.

Планирование экспериментального исследования осуществлялось на основе специально синтезированного плана, содержащего 18 опытных точек (табл. 1). При этом варьировались две группы факторов (табл. 2, 3):

- содержание пластифицирующей добавки и карбонатного наполнителя:  $x_1$  (поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 1641 F (СП));  $x_2$  (микрокальцит (МКМ)).

- тип и дозировка активных минеральных добавок (АМД):  $v_1$  (кремнеземистая АМД – микрокремнезем конденсированный неуплотненный производства АО «Кузнецкие ферросплавы» (МК));  $v_2$  (алюмосиликатная АМД – высокоактивный метакаолин производства ООО «Пласт-Рифей» (ВМК));  $v_3$  (расширяющий сульфоалюминатный модификатор производства ООО «Парад Русь» (РСАМ)).

Т а б л и ц а 1

План экспериментального исследования в кодированных величинах

№ состава	Варьируемые факторы в кодированных величинах				
	Первая группа факторов		Вторая группа факторов		
	Вид и содержание наполнителя и суперпластификатора		Вид и содержание АМД		
	$x_1$ (СП Melflux)	$x_2$ (МКМ)	$v_1$ (МК)	$v_2$ (ВМК)	$v_3$ (РСАМ)
1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	1	0	0
2	-1	-1	0	1	0
3	-1	-1	0	0	1
4	-1	0	0,5	0	0,5

1	2	3	4	5	6
5	-1	1	0	0	1
6	-1	1	0,5	0,5	0
7	0	1	0	1	0
8	0	-1	0	0,5	0,5
9	1	0	0,5	0,5	0
10	0	0	0,333	0,333	0,333
11	1	-1	1	0	0
12	1	-1	0	0	1
13	1	0	0,5	0	0,5
14	1	1	0	0,5	0,5
15	1	1	1	0	0
16	1	-1	0	1	0
17	0	1	0,5	0	0,5
18	0	-1	0,5	0,5	0
Контроль	0	-1	0	0	0

Т а б л и ц а 2

Уровни варьирования первой группы исследуемых факторов  
в кодированных величинах и их численные значения

Факторы			Уровни варьирования		
			-1	0	+1
Вид компонента	$x_1$	СП, % от массы вяжущего (Ц + МД)	0,5	1,0	1,5
	$x_2$	МКМ, % от массы МД (МК+ВМК+РСАМ+МКМ)	0	25	50

Т а б л и ц а 3

Уровни варьирования второй группы исследуемых факторов  
в кодированных величинах и их численные значения

Факторы			Уровни варьирования			
			0	0,333	0,5	1,0
Вид добавки	$v_1$	МК, % от массы вяжущего (Ц + МД)	0	6,67/5/3,33*	10/7,5/5*	20/15/10*
	$v_2$	ВМК, % от массы вяжущего (Ц + МД)	0	6,67/5/3,33*	10/7,5/5*	20/15/10*
	$v_3$	РСАМ, % от массы вяжущего (Ц + МД)	0	6,67/5/3,33*	10/7,5/5*	20/15/10*

П р и м е ч а н и е . \*Количество АД при содержании карбонатного наполнителя МКМ соответственно 0/25/50 % от массы МД (МК+ВМК+РСАМ+МКМ).

Анализ изменения подвижности цементного теста в зависимости от содержания минеральных добавок и поликарбоксилатного суперпластификатора проводился с применением мини-конуса (кольцо к прибору Вика по ГОСТ 310.3). За показатель подвижности цементной системы принимался диаметр расплыва после 15-секундного истечения теста из усеченного мини-конуса.

Определение прочностных показателей цементного камня при сжатии проводилось на установке WilleGeotechnik® (модель 13-PD/401). Настройка основных параметров и фиксирование полученных экспериментальных результатов осуществлялись с применением программного обеспечения GEOSYS 8.7.8.

Анализ полученных данных, структурированных в зависимости от содержания поликарбоксилатного пластификатора в присутствии разного вида АД, показал (рис. 1), что при концентрации Melflux 1641 F от 1,0 до 1,5 % от массы вяжущего (Ц+МД) диаметр

расплыва варьируется в интервале достаточно высоких значений – 200÷280 мм. Снижение доли химического модификатора до 0,5 % приводит к значительному расширению разброса значений исследуемого показателя, в частности, от 75 до 225 мм. Наиболее низкие значения, не превышающие 90 мм, зафиксированы для составов без карбонатного наполнителя, в которых 20 % портландцемента было заменено на МК или ВМК (составы №1, 2), что подтверждает высокую загущающую способность данных АМД. В то же время использование в качестве единственной МД расширяющего сульфоалюминатного модификатора позволяет увеличить диаметр расплыва из мини-конуса до 225 мм (состав №3), что свидетельствует о возможности получения на основе РСАМ составов с высокими технологическими показателями при значительно меньшем содержании дорогостоящего поликарбоксилатного пластификатора.

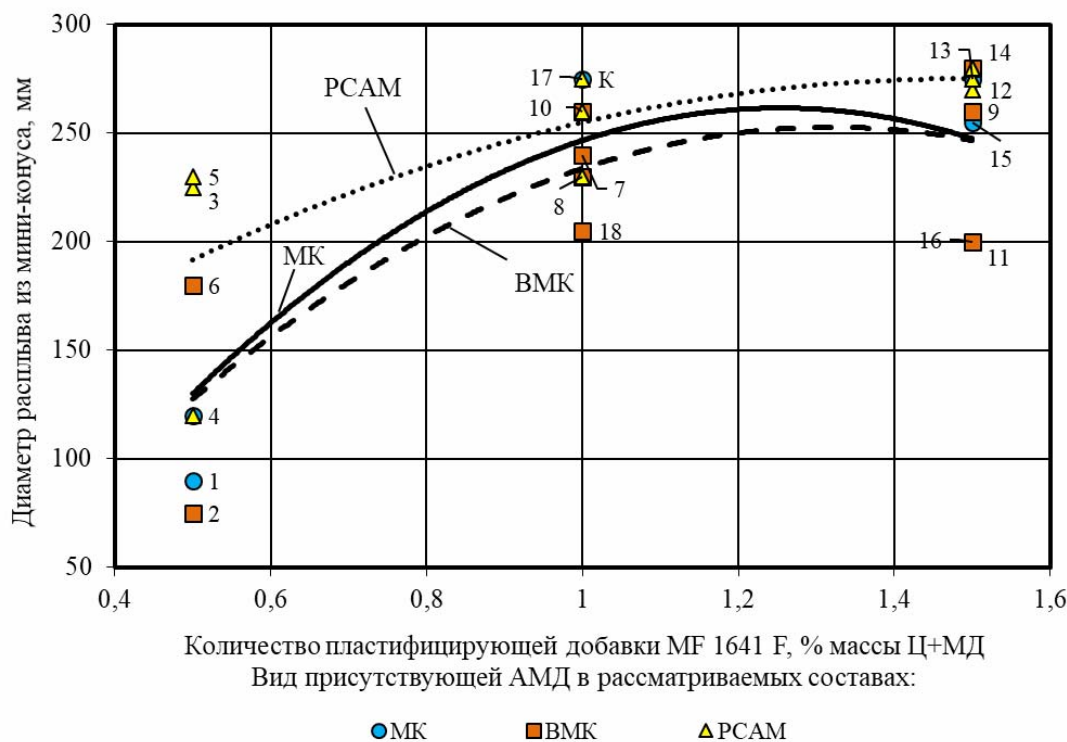


Рис. 1. Изменение подвижности цементного теста в зависимости от содержания поликарбоксилатного суперпластификатора Melflux 1641 F и вида АМД (номера составов на рисунке соответствуют табл. 1)

Увеличение доли карбонатного наполнителя в общей массе минеральных добавок с 0 до 50 %, в целом, приводит к повышению подвижности модифицированного цементного теста (рис. 2). Линиями на рис. 2 показаны кривые аппроксимации, построенные отдельно для составов с расплывом «более 180 мм» и «180 мм и менее». Для составов, в которых доля МКМ составляет 50 % от общей массы МД (для всех составов доля МД=МКМ+АМД=20 % от массы вяжущего (Ц+МД)), диаметр расплыва из мини-конуса составляет не менее 180 мм, что подтверждает эффективность введения микрокальцита для повышения технологических характеристик модифицированных цементных систем.

В табл. 4 представлены результаты исследования плотности модифицированного цементного камня в нормальных влажностных условиях, а также прочности при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток. Установлено, что исследуемые составы с минеральными добавками МК, ВМК и РСАМ отличаются высокими темпами набора прочности цементного камня при сжатии в возрасте 3 и 7 суток – 48÷69 и 71÷83 % от прочности в возрасте 28 суток соответственно.



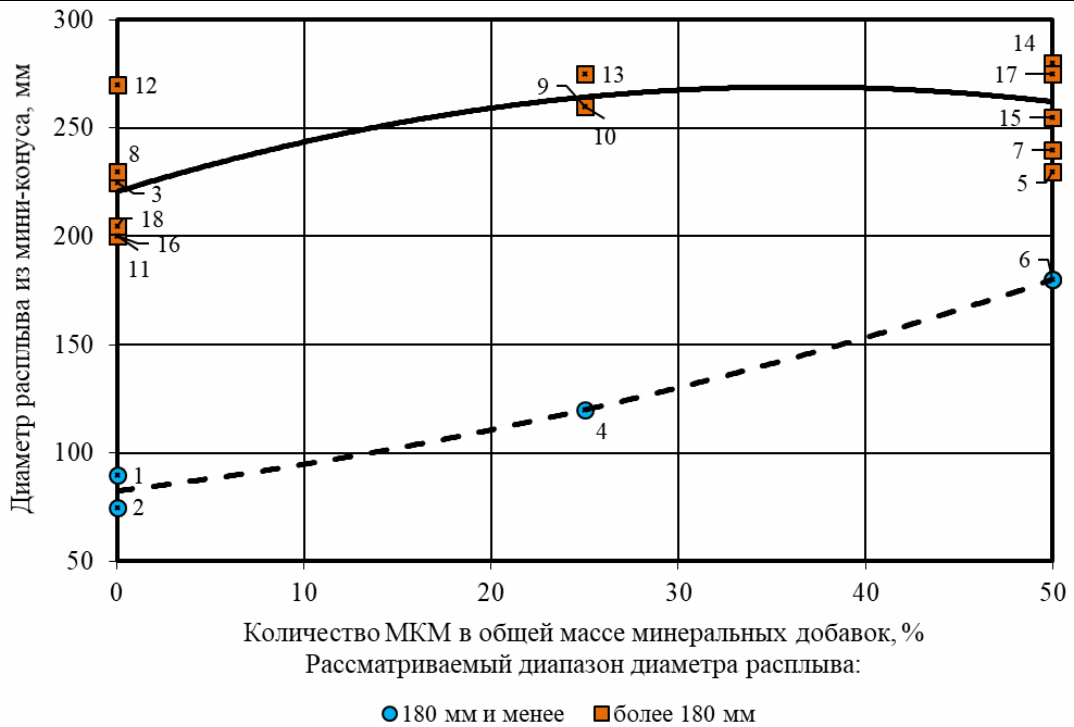


Рис. 2. Изменение подвижности цементного теста в зависимости от доли карбонатного наполнителя в общей массе минеральных добавок и вида АМД (номера составов на рисунке соответствуют табл. 1)

Т а б л и ц а 4

Физико-механические показатели образцов цементного камня  
в возрасте 3, 7 и 28 суток

№ состава	Плотность в нормальных влажностных условиях в возрасте 28 суток, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	Относительный предел прочности при сжатии (к составу К)	Доля набора прочности при сжатии, % от проектной прочности в возрасте	
				3 суток	7 суток
1	2103	96,2	0,98	59,0	82,2
2	2064	88,7	0,90	57,6	77,9
3	2184	96,1	0,98	59,1	82,7
4	2154	111,9	1,14	68,8	79,2
5	2183	100,3	1,02	63,1	82,2
6	2136	100,6	1,02	58,4	75,3
7	2145	105	1,07	58,8	75,4
8	2173	117,5	1,20	61,2	75,4
9	2139	99,1	1,01	48,1	74,0
10	2163	106,4	1,08	61,5	80,3
11	2107	95,9	0,98	50,6	79,7
12	2186	103,7	1,05	53,4	80,2
13	2142	111,1	1,13	63,5	79,4
14	2154	106,5	1,08	58,9	79,5
15	2138	103,5	1,05	58,2	71,3
16	2139	103,7	1,05	58,3	75,2
17	2186	109,6	1,11	54,2	73,0
18	2142	115,5	1,17	58,2	75,8
Контроль (К)	2150	98,3	1,00	61,0	78,4

По сравнению с контрольным составом, относительный предел прочности при сжатии модифицированного цементного камня в возрасте 28 суток варьируется в интервале от 0,9 до 1,2 отн. ед., что подтверждает возможность повышения прочностных показателей разрабатываемых композитов путем целенаправленного управления поровым пространством и минераломорфологическим состоянием структуры цементного камня за счет применения оптимальных комплексов химических и минеральных добавок. Наиболее высокие значения прочности цементного камня в возрасте 28 суток зафиксированы для составов без микрокальцита (№8 и 18) с комплексами минеральных добавок (ВМК + РСАМ), (МК + ВМК) и содержанием суперпластификатора 1 % от массы вяжущего (Ц + МД) – 117,5 и 115,5 МПа соответственно, что на 19,5 и 17,5 % выше, чем аналогичный показатель контрольного состава без минеральных добавок (98,3 МПа). Другим эффективным комплексом минеральных добавок является совместное использование микрокальцита, микрокремнезема и сульфоалюминатного модификатора, позволяющее повысить прочностные показатели в проектном возрасте для цементных систем составов №4, 13 и 17 до соответствующего уровня – 111,9, 111,1 и 109,6 МПа (на 11,5÷13,8 % выше, чем у контрольного состава).

По итогам проведенных экспериментальных исследований получены следующие результаты:

- установлено влияние дозировок минеральных добавок различного состава (кремнеземистая, алюмосиликатная, сульфоалюминатная, карбонатная) и поликарбоксилатного суперпластификатора на подвижность цементного теста;
- выявлено влияние дозировок минеральных добавок и поликарбоксилатного суперпластификатора на основные физико-механические показатели цементного камня – среднюю плотность в нормальных влажностных условиях в возрасте 28 суток, прочность при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток;
- определены наиболее эффективные комплексы модификаторов, позволяющие направленно управлять технологическими и физико-механическими свойствами цементных систем.

Результаты экспериментальных исследований показали возможность повышения подвижности цементного теста и физико-механических показателей цементного камня за счет применения оптимальных комплексов минеральных добавок разного химико-минералогического состава и поликарбоксилатного суперпластификатора.

### Список литературы

1. Rakhimov, R.Z. Effect of the Addition of Thermally Activated Heavy Loam to Portland Cement on the Properties of Cement Stone / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gayfullin, V.P. Morozov // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2018. – Vol. 9. – No. 4. – P. 679–686.
2. Yu, R. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – Vol. 55. – P. 383–394.
3. Nizina, T.A. Modified fine-grained concretes based on highly filled self-compacting mixtures / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, V.V. Volodin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 4. Сер. «IV International Conference on Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures». – 2019. – P. 012048. – DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012048.
4. Nizina, T.A. Physical and mechanical properties of modified fine-grained fiber-reinforced concretes containing carbon nanostructures / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, V.V. Volodin // *International journal of nanotechnology*. – 2019. – Vol. 16. – Nos. 6/7/9/10. – P. 496–509. – DOI: 10.1504/IJNT.2019.106621.
5. Nizina, T.A. Influence of polycarboxylate superplasticizer influence of polycarboxylate superplasticizer and mineral additives of various compositions on the technological and physical-mechanical properties of cement systems / T.A. Nizina, A.S. Balykov,

D.I. Korovkin, V.V. Volodin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – 032090. – DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032090.

6. Smirnova, O.M. Compatibility of portland cement and polycarboxylate-based superplasticizers in high-strength concrete for precast constructions / O.M. Smirnova // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 66(6). – P. 12–22. – DOI: 10.5862/MCE.66.2.

7. Huang, H. Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete / H. Huang, C. Qian, F. Zhao, J. Qu, J. Guo, M. Danzinger // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 110. – P. 293–299. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.041.

8. Рассохин, А.С. Микрокремнеземы различных типов для высокопрочных мелкозернистых бетонов / А.С. Рассохин, А.Н. Пономарев, О.Л. Фиговский // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – №2(78). – С. 151–160. – DOI: 10.18720/MCE.78.12.

9. Kocak, Y. Effects of metakaolin on the hydration development of Portland-composite cement / Y. Kocak // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 31. – 101419. – DOI: 10.1016/J.JOBE.2020.101419.

10. Carballosa, P. Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements / P. Carballosa, J.L. García Calvo, D. Revuelta, J.J. Sánchez, J.P. Gutiérrez // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 93. – P. 223–229. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.113.

11. Le Saoût, G. Hydration of Portland cement with additions of calcium sulfoaluminates / G. Le Saoût, B. Lothenbach, A. Hori, T. Higuchi, F. Winnefeld // Cement and Concrete Research. – 2013. – Vol. 43. – P. 81–94. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.10.011.

12. Lollini, F. Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete / F. Lollini, E. Redaelli, L. Bertolini // Cement and Concrete Research. – 2014. – Vol. 46. – P. 32–40. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.10.016.

13. Tang, J. Synergistic effect of metakaolin and limestone on the hydration properties of Portland cement / J. Tang, S. Wei, W. Li, S. Ma, P. Ji, X. Shen // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 223. – P. 177–184. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.059.

14. Низина, Т.А. Оценка кинетики твердения цементного камня, модифицированного добавками термоактивированной глины и карбонатных пород / Т.А. Низина, В.В. Володин, А.С. Бальков, Д.И. Коровкин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №1. – С. 86–94.

## References

1. Rakhimov, R.Z. Effect of the Addition of Thermally Activated Heavy Loam to Portland Cement on the Properties of Cement Stone / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gayfullin, V.P. Morozov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9. – No. 4. – P. 679–686.

2. Yu, R. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers // Cement and Concrete Composites. – 2015. – Vol. 55. – P. 383–394.

3. Nizina, T.A. Modified fine-grained concretes based on highly filled self-compacting mixtures / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, V.V. Volodin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 4. Сер. «IV International Conference on Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures». – 2019. – P. 012048. – DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012048.

4. Nizina, T.A. Physical and mechanical properties of modified fine-grained fiber-reinforced concretes containing carbon nanostructures / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, V.V. Volodin // International journal of nanotechnology. – 2019. – Vol. 16. – Nos. 6/7/9/10. – P. 496–509. – DOI: 10.1504/IJNT.2019.106621.

5. Nizina, T.A. Influence of polycarboxylate superplasticizer influence of polycarboxylate superplasticizer and mineral additives of various compositions on the technological and physical-mechanical properties of cement systems / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, V.V. Volodin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – 032090. – DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032090.
6. Smirnova, O.M. Compatibility of portland cement and polycarboxylate-based superplasticizers in high-strength concrete for precast constructions / O.M. Smirnova // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 66(6). – P. 12–22. – DOI: 10.5862/MCE.66.2.
7. Huang, H. Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete / H. Huang, C. Qian, F. Zhao, J. Qu, J. Guo, M. Danzinger // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 110. – P. 293-299. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.041.
8. Rassokhin, A.S. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete / A.S. Rassokhin, A.N. Ponomarev, O.L. Figovsky // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 78(2). – P. 151–160. – DOI: 10.18720/MCE.78.12.
9. Kocak, Y. Effects of metakaolin on the hydration development of Portland-composite cement / Y. Kocak // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 31. – 101419. – DOI: 10.1016/J.JOBE.2020.101419.
10. Carballosa, P. Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements / P. Carballosa, J.L. García Calvo, D. Revuelta, J.J. Sánchez, J.P. Gutiérrez // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 93. – P. 223-229. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.113.
11. Le Saoût, G. Hydration of Portland cement with additions of calcium sulfoaluminates / G. Le Saoût, B. Lothenbach, A. Hori, T. Higuchi, F. Winnefeld // Cement and Concrete Research. – 2013. – Vol. 43. – P. 81–94. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.10.011.
12. Lollini, F. Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete / F. Lollini, E. Redaelli, L. Bertolini // Cement and Concrete Research. – 2014. – Vol. 46. – P. 32-40. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.10.016.
13. Tang, J. Synergistic effect of metakaolin and limestone on the hydration properties of Portland cement / J. Tang, S. Wei, W. Li, S. Ma, P. Ji, X. Shen // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 223. – P. 177–184. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.059.
14. Nizina, T.A. Evaluation of kinetics of hardening of cement stone modified with additives of thermally activated clay and carbonate rocks / T.A. Nizina, V.V. Volodin, A.S. Balykov, D.I. Korovkin // Regional Architecture and Engineering. – 2021. – №1. – P. 86–94.

Московский политехнический университет  
Россия, 107023, г. Москва,  
ул. Б.Семёновская, д. 38

**Будылина Евгения Александровна**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Инфокогнитивные  
технологии»

E-mail: bud-ea@yandex.ru

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гарькина Ирина Александровна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

**Данилов Александр Максимович**,  
доктор технических наук,  
профессор, советник РААСН,  
зав. кафедрой «Математика  
и математическое моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University

Russia, 107023, Moscow,  
38, B.Semenovskaya St.

**Budylna Eugenia Aleksandrovna**,  
Candidate of Physical and Mathematical  
Sciences, Associate Professor of the  
department «Infocognitive Technologies»

E-mail: bud-ea@yandex.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Garkina Irina Aleksandrovna**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Mathematics  
and Mathematical Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

**Danilov Alexander Maksimovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, Head of the  
department «Mathematics and Mathematical  
Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, СИНТЕЗ, УПРАВЛЕНИЕ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

С позиций системного анализа приводятся результаты комплексных исследований по разработке композиционных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств. Анализируются ключевые вопросы математического моделирования, вычислительного эксперимента, разработки методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации материалов как сложных систем. Показывается, что модель системы, построенная в терминах паттернов проектирования, является более простой и наглядной, чем стандартная. Подтверждена эффективность использования теории временных рядов при изучении формирования основных физико-механических характеристик композитов с учетом предыстории.

*Ключевые слова:* композиты, сложные системы, системный подход, идентификация, синтез, управление

## COMPOSITES SYSTEM DESIGN: MODELING, SYNTHESIS, CONTROL

E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

From the point of system analysis, the results of comprehensive research on the development of composite materials with a given set of operational properties are presented. The key issues of mathematical modeling, computational experiment, development of methods and algorithms for structural-parametric synthesis and identification of materials as complex systems are analyzed. It is shown that the system model built in terms of design patterns is simpler and more visual than the standard one. The effectiveness of using the theory of time series in studying the formation of the main physical and mechanical characteristics of composites is confirmed, taking into account the prehistory.

*Keywords:* composites, complex systems, systems approach, identification, synthesis, control

## 1. Постановка задачи

В настоящее время системный подход представлен мозаикой отдельных направлений, плохо скоординированных между собой: целеустремленные системы, функциональные системы, системы гомеостатического типа, системы как триада «вещь – свойство – отношение», общая теория систем. К сожалению, ни одна версия системного подхода по стандартам научности XXI века не получила развития. Это относится и к системным исследованиям в области синтеза композиционных материалов. Есть только отдельные опыты применения системной методологии; налицо потребность и демонстрация возможностей разработок в области синтеза систем. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий с его развитием до уровня математической теории, в основе которой лежит идеальный объект, заданный в системе аксиом и способный выходить на уровень приложений в разных областях. Здесь рассматриваются результаты комплексных исследований с позиций системного анализа научных и технических проблем, связанных с разработкой материалов специального назначения с заданным комплексом эксплуатационных свойств, а также с созданием базы компьютерного проектирования и управления технологией их производства. Исследования включают: математическое моделирование, вычислительный эксперимент, разработку методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации материалов как сложных систем [1...3]. При синтезе производится установление взаимосвязи состава, технологии производства, а также структуры и свойств материала. Композиционный материал рассматривается как сложная система, состоящая из элементов различного уровня детализации. Так как сущность системы нельзя понять, рассматривая только свойства элементов, то изучаются как способы взаимодействия элементов, так и взаимодействие элементов и системы с окружающей средой. В частности, анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой не дает возможности судить обо всем технологическом процессе. При создании композиционных материалов на основе анализа технологического процесса выделялись несколько уровней иерархии с отношениями подчиненности. Исходя из иерархической структуры критериев качества, строилась иерархическая структура композита. По существу, разработка методологических принципов синтеза композиционных материалов напрямую связана с разработкой указанных иерархических структур: последовательное решение задач структурной и параметрической идентификации, разработка функционалов качества, определение интегративных свойств систем с использованием автономных исследований сепаратных подсистем, введение настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам, многокритериальный синтез, определение рецептурно-технологических параметров.

## 2. Математическое моделирование сложных систем

Существуют различные методы идентификации, основанные на разных подходах к форме задания идентификационных моделей (дифференциальные уравнения, разностные уравнения, передаточные функции, градиентные выражения и т.п.). Ни один из методов идентификации не годится для идентификации всех видов систем. Каждый из них имеет свою область/ области применения. Это, однако, не означает, что на современном уровне идентификация должна рассматриваться как набор готовых рецептов для различных типов систем. Сейчас уже можно говорить о теории идентификации, имеющей дело с оценением параметров на основании измеренных текущих входных и выходных данных. Ошибки идентификации, естественно, приводят к ошибкам в управлении или в требуемом выходном параметре системы. Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяют получить абсолютно адекватные математические модели. Математическая модель, описывающая формализованный процесс функционирования системы, в состоянии охватить только основные характерные закономерности; нет возможностей указать формальные правила для выбора характеристик состояний и параметров исследуемых реальных

систем. Исследователь вынужден руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы процессов функционирования системы. Подразумевается, если задача сформулирована на математическом языке, то она полностью переходит в сферу математики (строго обоснованной науки). Этим объясняется возросший интерес к тому, как именно осуществляется процесс применения математики: как создаются математические модели, как они изучаются, как интерпретируются и т.д. При этом, конечно, речь идет не о многочисленных конкретных случаях применения математики, а об изучении общих законов применения. По И.В. Прангишвили, важный недостаток современного управления сложными системами заключается в отсутствии именно системного подхода. Для его понимания как единого целостного подхода к системе нужно помнить, что отдельные части системы настолько сильно взаимосвязаны между собой множеством прямых и обратных связей, что изменение одной из них может повлечь за собой значительные изменения в других ее частях. Поэтому часто не работает метод декомпозиции системы на отдельные части и их исследования как более простых, а далее синтеза системы из ее отдельных частей. На самом деле систему надо оценивать и анализировать как целостную или единую, и нельзя осуществить анализ и оценку системы после ее декомпозиции на более простые части.

С общетеоретической точки зрения моделирование есть метод научного познания, а с практической – технология решения прикладных научно-технических задач. Экспериментальное изучение действительности и построение необходимых для решения практической или познавательной проблемы всех возможных с точки зрения исследователя моделей в настоящее время рассматривается как решение задачи идентификации (идентификационный подход еще окончательно не оформился в связи с размытостью представлений об идентификации как об особом типе человеческой деятельности). Процесс познания действительности при создании реальных систем не всегда можно научно объяснить. На сегодня понятия, отражающие роль человека при определении целей идентификации, теоретически не сформулированы; задачу идентификации характеристик системы можно рассматривать как дуальную по отношению к задаче управления системой. Нельзя управлять системой, если она не идентифицирована: структурная идентификация состоит в определении вида математической модели системы; параметрическая – в определении числовых параметров математической модели, при которых решение задачи соответствовало бы экспериментальным данным (найденные значения констант не должны противоречить физическому смыслу и теоретическим соображениям). Роль структуры модели трудно переоценить, неудачный выбор ее сводит на нет и все результаты параметрической идентификации. Выбор метода идентификации определяется неоднозначно, ибо в самой постановке задачи заранее предполагается неопределенность (неполнота знаний об объекте, ограничения в наблюдениях объекта во времени, неточность измерения сигналов на входе и на выходе объекта и т.п.). При любом методе идентификации очень важным является знание размерности вектора состояния и природы внутренних связей или нелинейностей. Всегда необходима оценка влияния ошибок идентификации на качество управления системой по результатам идентификации (задача идентификации, как обратная, относится к классу некорректных задач). Идентификация динамических параметров на основании измерений возможна только в случае, когда измерения выполнены в период переходного состояния системы; никакими методами невозможно идентифицировать динамические параметры системы, находящейся в установившемся режиме. При идентификации параметров нелинейных систем последние должны принадлежать к заранее заданному виду: параметр, наилучшим образом описывающий систему при одной форме представления, может оказаться совершенно неудовлетворительным при другом описании системы. Создание адекватной модели возможно лишь в случае, когда свойства и взаимосвязи моделируемого объекта в достаточной степени изучены. Налицо парадокс: если объект изучен, зачем его моделировать; а если объект не изучен, то как можно построить адекватную модель. Традиционно этот парадокс разрешается тем, что модель

не обосновывается, а постулируется на основе эмпирических сведений, которыми располагает исследователь. Адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать: модель может быть принята либо отвергнута на том основании, что получаемые с ее помощью оценки и выводы противоречат наблюдаемым фактам. Системная модель всегда будет отличаться от оригинала; можно говорить об асимптотическом приближении к нему при выполнении определенных условий для каждой практической задачи. На сегодня пока нет единой теории построения системных моделей, реализующей концепцию системного гомеостазиса. Системные модельные исследования итеративны: любая системная проблема решается на основе последовательного приближения и не имеет окончательного решения. Это согласуется с одним из основных принципов системного подхода: при сколь угодно глубоком познании невозможно получить исчерпывающую характеристику изучаемого объекта. Задача состоит в том, насколько качественно данный уровень познания позволяет разрешить поставленную проблему. При анализе и решении многокритериальной задачи оптимизации необходимо применять только те определения и понятия, методы и процедуры, которые приводят к получению адекватных выводов и рекомендаций. Системный подход к анализу и синтезу сложных систем состоит в упрощении и ограничении разнообразия формализованного описания системы с учетом возможного проявления свойств, неопределенности состояния системы.

### 3. Синтез и управление

При моделировании относительно простых систем приемлемые результаты дает использование детерминистических подходов (по причинно-следственным связям). Так, наилучшие (в некотором смысле) структура и значения параметров системы определяются в результате нахождения экстремумов функции на множествах конечномерного векторного пространства, определяемых линейными и нелинейными ограничениями (однокритериальная оптимизация). При параметрической оптимизации определяются оптимальные значения параметров системы при заданной ее структуре, а при структурной оптимизации – оптимальная структура системы.

При однокритериальной оптимизации среди  $\mathbf{x}$ , образующих множество  $X$ , определяется  $\mathbf{x}^*$  из условия  $f(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x})$ . Корректная постановка задачи оптимизации предполагает задание допустимого множества  $X = \{\mathbf{x} \mid q_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = \overline{1, m}\} \subset R^n$ ; целевой функции, то есть отображения  $f: X \rightarrow R$ ; критерия поиска  $f(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in X}$ .

Наибольшее практическое значение имеют решения задач: найти  $\mathbf{x}^* \in X: f(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x})$ ; если  $\exists \mathbf{x}^*$ , то найти  $\inf_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x})$ . Если минимизируемая функция не является выпуклой, то часто ограничиваются поиском локальных минимумов (в некоторой окрестности  $\mathbf{x}_0$  имеет место:  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}_0)$ ) или максимумов ( $f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x}_0)$ ). Если допустимое множество  $X = R^n$ , то задача сведется к безусловной оптимизации; в противном случае – к задаче условной оптимизации. В случае унимодальной целевой функции экстремум единственен: он же будет и глобальным. Если целевая функция многоэкстремальна, то основная задача при глобальном поиске связана с выявлением тенденций ее глобального поведения. Если целевая функция  $f(\mathbf{x})$  и ограничения  $q_j(\mathbf{x}), j = \overline{1, m}$  являются линейными функциями, то оптимизационная задача является задачей линейного программирования; если целевая функция или ограничения являются нелинейными – задачей нелинейного программирования. Если при решении оптимизационной задачи требуются вычисления целевой функции лишь в точках приближений, то такие методы решения являются прямыми; если требуются вычисления и первых частных производных функции, то методами первого порядка; в методах второго порядка требуются вычисления и вторых частных производных (определение гессиана целевой функции). Среди анали-



тических методов решения оптимизационных задач выделяются метод множителей Лагранжа и условия Куна – Таккера. Особое место среди методов решения оптимизационных задач занимают динамическое и стохастическое программирование. Выбор метода решения задач, естественно, определяется классом задачи. При формализации оптимизационной задачи отбрасываются связи системы с внешним миром, влияние которых на результат оптимизации незначительно, но без которых решение упрощается. Используется и метод «замораживания» данных: управляемая переменная рассматривается как неуправляемая с замороженными ее значениями. При исследовании сложных систем указанные методы являются малоэффективными. Возникает необходимость в разработке иных алгоритмов оптимизации параметров исследуемой системы, позволяющих учитывать специфические требования к системам. Эффективным оказался принцип деления сложной проблемы на более мелкие, пока каждая подпроблема не будет рассмотрена (по различным критериям) и надежно количественно оценена экспертами (особенно при прогнозе, насколько сформулированные цели могут быть достигнуты).

Обычно используются важнейшие принципы системного анализа, а именно:

- определение четкой формулировки конечных целей и критериев, по которым оценивается их достижение;
- установление взаимосвязи каждого частного решения и анализ возможных альтернативных путей достижения цели;
- обеспечение непротиворечивости целей отдельных подсистем, которые не должны вступать в конфликт с целями всей системы;
- выявление ресурсов и их увязка с целями системы.

Сложные иерархические структуры – набор определенным образом типологизированных элементов и связей между ними; многоуровневое представление структур. Переход с одного уровня представления на другой осуществляется путем выделения подструктур (макроскопические элементы), элементы более низкого уровня рассматриваются как микроскопические. Система конфигурируется с использованием так называемых паттернов (типовые решения проблем).

Использование паттернов проектирования дает разработчику ряд неоспоримых преимуществ. Так, модель системы, построенная в терминах паттернов проектирования, фактически является структурированным выделением значимых при решении поставленной задачи элементов и связей (является более простой и наглядной, чем стандартная). Правильно сформулированный паттерн проектирования дает возможность пользоваться однажды удачно найденным решением многократно. Отметим, для больших сложных систем, сформированных по модульному принципу (каждый элемент иерархической структуры системы, находящийся на определенном уровне, рассматривается как модуль) возможна декомпозиция системы на отдельные подсистемы, обладающие определенной степенью автономности (интегративные свойства систем приближенно определяются на основе автономных исследований отдельных подсистем). Указанный подход был использован при синтезе композитов специального назначения [4...6].

#### 4. Кинетические процессы как временные ряды

Ряд задач строительного материаловедения (определение устойчивости материала к длительному радиационному воздействию, установление остаточной прочности строительных материалов по годам эксплуатации, параметров разрушения декоративного покрытия и др.) достаточно просто можно решить с использованием теории временных рядов.

Ряд представляется в виде суммы четырех компонент:

- тренд или долгосрочное движение;
- колебания относительно тренда;
- сезонная компонента;
- случайная составляющая.

Они эффективно использовались при изучении формирования основных физико-механических характеристик композитов с учетом предыстории (оказалось возможным принять предельный порядок  $p$  модели равным четырём). Вычисление коэффициентов модели осуществлялось по процедурам, приведенным в [7].

#### **Выводы**

Осуществлены комплексные исследования по разработке композиционных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

Выделены и проанализированы ключевые вопросы математического моделирования, вычислительного эксперимента, разработки методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации материалов как сложных систем.

Указано, что модель системы, построенная в терминах паттернов проектирования, является более простой и наглядной, чем стандартная.

Показана эффективность реализации теории временных рядов при изучении формирования основных физико-механических характеристик композитов с учетом предыстории.

#### Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // *Архитектура и строительство России*. – 2020. – № 3. – С. 143.
2. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы проектирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2012. – № 1. – С. 39–42.
3. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
4. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2. Сер. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – С. 012006.
5. Смирнов, В.А. Моделирование и инструментальные средства численного анализа в нанотехнологии материаловедения: обзор / В.А. Смирнов, Е.В. Королев, А.В. Евстигнеев // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2014. – Т. 6, № 5. – С. 34–58.
6. Королев, Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы: эффективные модели / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // *Региональная архитектура и строительство*. – 2021. – № 3 (48). – С. 16–25.
7. Отнес? Р. Прикладной анализ временных рядов: монография / Р. Отнес, Р. Энноксон. – М., 1982. – 383 с.

#### References

1. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // *Architecture and construction of Russia*. – 2020. – № 3. – P. 143.
2. Garkina, I.A. Control in complex technical systems: methodological design principles / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – №1. – P. 39–42.
3. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2011. – №1. – P. 4–9.
4. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2. Сер. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – С. 012006.

5. Smirnov, V.A. Modeling and tools for numerical analysis in nanotechnology of materials science: a review / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, A.V. Evstigneev // Nanotechnologies in construction: a scientific online journal. – 2014. – Vol. 6, № 5. – P. 34–58.

6. Korolev, E.V. Composite materials as polydisperse systems: effective models / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 3 (48). – P. 16–25.

7. Retrieved, R. Applied analysis of time series: monograph / R. Retrieved, R. Enokson. – M., 1982. – 383 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.04

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_44

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

*Penza State University of Architecture  
and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Шеин Александр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Механика»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Shein Alexander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Mechanics»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Чуманов Александр Васильевич,**  
ст. преподаватель кафедры «Механика»  
E-mail: 4ymako@mail.ru

**Chumanov Alexander Vasilievich,**  
Senior Lecturer of the department «Mechanics»  
E-mail: 4ymako@mail.ru

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ЛЕНТ (ТРОСОВ) КРЕПЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-ТРОСОВОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ

А.И. Шеин, А.В. Чуманов

Описываются способы определения рационального направления лент (тросов) ленточно-тросового гасителя колебаний сооружений для купольной конструкции. На основе анализа перемещений узлов оцениваются различные подходы к выявлению наиболее эффективного направления односторонней связи. Приводятся результаты численных исследований для колебаний купола. На основе результатов динамических расчетов колебаний купола (сравнение перемещений наиболее податливого узла открытого купола с разными вариантами крепления гасителя) проведен анализ вариантов расположения гасителя колебаний. По результатам численных экспериментов установлен наиболее эффективный способ определения наклона ленты гасителя к защищаемой конструкции.

*Ключевые слова: купольные сооружения, гаситель колебаний, сейсмическая защита, односторонняя связь*

### DETERMINING THE RATIONAL DIRECTION OF FASTENING TAPES (CABLES) OF A TAPE-CABLE VIBRATION DAMPENER OF STRUCTURES

A.I. Shein, A.V. Chumanov

The methods of determining the rational direction of the tapes (cables) of the tape-cable vibration dampener of a dome structure are described. Based on the analysis of nodes movements, various

approaches to identifying the most effective direction of one-way communication are evaluated. The results of numerical studies for dome vibration are presented. Based on the results of dynamic calculations of dome vibrations (comparisons of the movements of the most flexible node of the open dome with different options for mounting the damper), an analysis of the options for the location of the vibration damper is carried out. Based on the results of numerical experiments, the most effective method for determining the inclination of the damper belt to the protected structure has been established.

*Keywords: dome structures, vibration dampener seismic protection, one-way communication*

**Введение.** В работах [1...3] описаны принципы работы ленточно-тросового гасителя колебаний купольных зданий и сооружений. Принцип работы такого гасителя колебаний основан на установке в узлы конструкции односторонних связей. В [2, 3] опубликованы результаты численных экспериментов с различными вариантами крепления, выбор которых был основан на определении наиболее податливых к перемещению узлов, выбранных по результатам анализа форм собственных колебаний. При этом вектор направления гашения не оптимизировался, а место установки катушки ленточного гасителя всегда выбиралось у одного из опорных узлов купольной конструкции, для того чтобы гаситель занимал как можно меньше полезного подкупольного пространства.

**Два способа выбора направления и точки приложения односторонней связи.** Предположим, что пространство купола позволяет установить гаситель в любой точке. Тогда для определения рационального направления воздействия односторонней связи гасителя необходимо найти вектор наиболее податливого направления перемещения защищаемого узла. Можно выделить два способа определения направления перемещения узла: из анализа откликов конструкции на единичные разнонаправленные воздействия на узел или из анализа стоячих волн собственных колебаний. Ниже приведены алгоритмы этих двух способов.

1. Выбор направления по результатам оценки перемещений от единичных воздействий в трех взаимно перпендикулярных плоскостях производится по следующему алгоритму.

1а. В узел поочередно в каждой из взаимно перпендикулярных плоскостей прикладываем сосредоточенную нагрузку под переменным углом к одной из координатных осей, изменяя данный угол с заданным шагом (рис. 1).

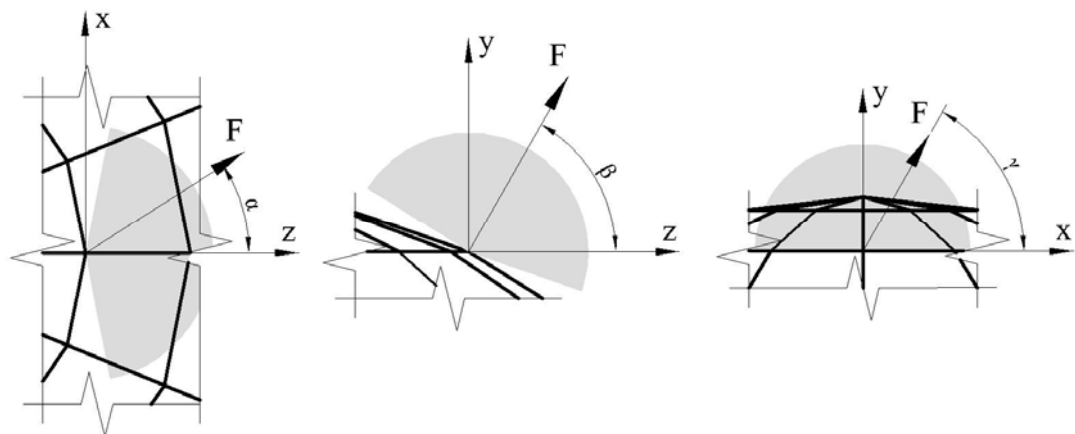


Рис. 1. Расчетная схема приложения сосредоточенной нагрузки в узел конструкции (серым цветом обозначен сектор приложения нагрузки)

1б. Сравниваем результаты перемещения узла с различными значениями углов и выбираем угол, которых обеспечивает наибольшее перемещение узла.

1в. Три полученные силы, лежащие во взаимно перпендикулярных плоскостях, раскладываем по проекциям на оси координат, складывая одноименные проекции.

Геометрическая сумма полученных суммарных проекций ( $F_x, F_y, F_z$ ) является вектором приложенной в узел силы  $F$ , модуль которой равен:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (1)$$

1г. Направление вектора односторонней связи определяем через направляющие косинусы полученной силы:

$$\cos_x = \frac{F_x}{F}; \cos_y = \frac{F_y}{F}; \cos_z = \frac{F_z}{F}. \quad (2)$$

В результате получаем направляющие косинусы для ориентировки направления троса ленточно-тросового гасителя колебаний.

2. Выбор направления вектора односторонней связи по результатам динамического расчета конструкции без гасителя колебаний с помощью анализа основной моды колебания конструкции, т.е. по графикам стоячих волн собственных колебаний купола, производится по следующему алгоритму:

2а. Определяем перемещения узлов при основной моде колебаний конструкции  $U_x, U_y, U_z$ .

2б. Находим полное линейное перемещение наиболее податливого узла:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}. \quad (3)$$

2в. Определяем направляющие косинусы для ленты (троса) гасителя:

$$\cos_x = \frac{U_x}{U}; \cos_y = \frac{U_y}{U}; \cos_z = \frac{U_z}{U}. \quad (4)$$

**Численная реализация алгоритмов.** Данные алгоритмы реализованы в численных экспериментах по гашению колебаний купольной конструкции с высотой стрелы подъёма  $f=15$  метров и диаметром купола  $L=30$  метров (рис. 2) на основе 3 вариантов крепления гасителя (рис. 3).

Первый вариант крепления гасителя взят из работы [2] в качестве сравнения разработанных ранее вариантов крепления с новыми. Второй и третий варианты крепления ленты (троса) получаем из первого и второго способов, рассмотренных в пунктах 1 и 2, соответственно. Ленты размещаем в 2 взаимно перпендикулярных направлениях (всего 4 ленты на один купол).

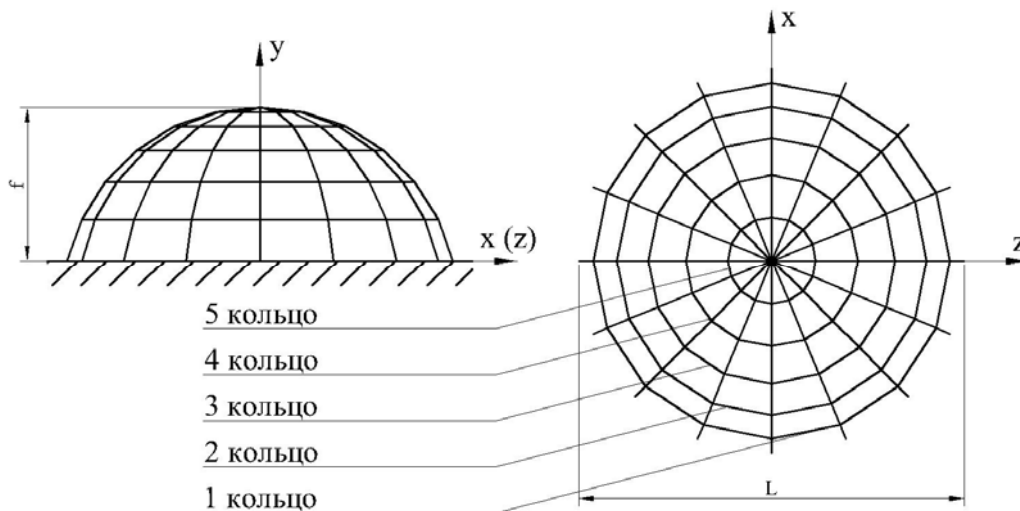


Рис. 2. Схема купола

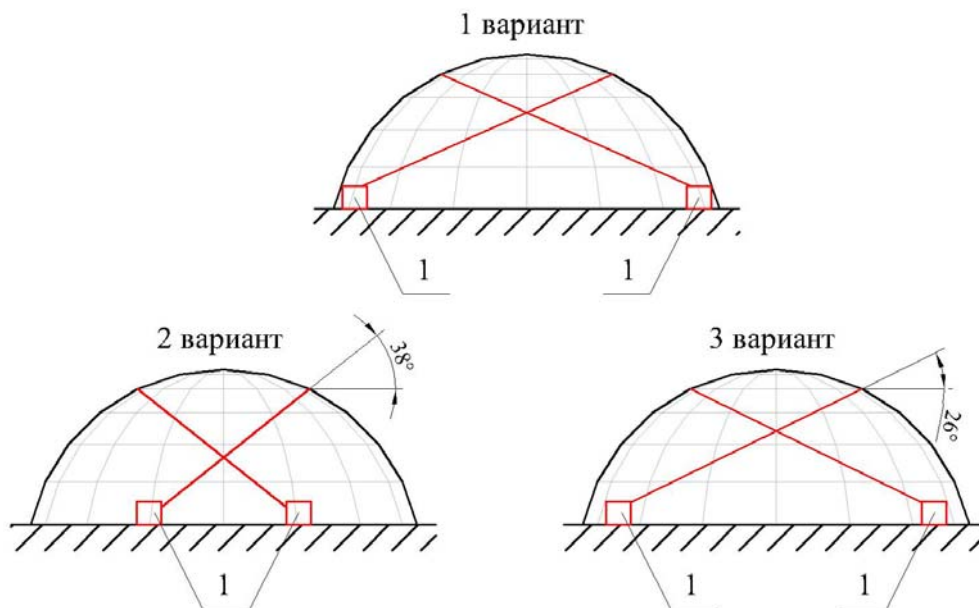


Рис. 3. Варианты крепления гасителей (1 – инерционные катушки)

Стоит отметить, что и результаты динамического расчета, и результаты анализа основной моды колебаний показывают на наибольшую податливость конструкции для (см. таблицу) одного и того же кольца купола (в данном примере – 4-е кольцо).

Перемещения узлов купольной конструкции, см

Номер пояса	1 способ (max)	2 способ
1	2.0	3.7
2	5.6	9.0
3	9.2	13.1
4	11.1	14.6
5	10.2	13.4
полюс	8.5	11.8

Примечательно, что при определении направления ленты (троса) первым способом направление силы, которая приложена в плоскости, параллельной основанию купола ( $Oxz$ ), и при которой перемещение максимально, является продолжением оси горизонтального элемента купола (любого из 2 элементов), что позволяет варьировать расположение катушки колебаний на плане сооружения.

В численных экспериментах конструкцию подвергали сейсмическому воздействию, соответствующему землетрясению в г. Газли (Узбекистан) в 1976 г. (рис. 4).

Графики перемещения (рис. 5) наиболее податливого узла, защищаемого гасителем колебаний, которое устанавливалось тремя вариантами, показывают, что оба предложенных варианта направления лент являются более эффективными по сравнению с предыдущими разработанными вариантами крепления гасителя. Максимальное перемещение узла при первом варианте гасителя 10,66 см, при втором варианте 5,63 см (уменьшение на 47,19 %), при третьем варианте 7,50 см (уменьшение на 29,64 %). В начальной фазе колебаний, при малых перемещениях, значительного эффекта не наблюдается (до момента времени 1,8 с).

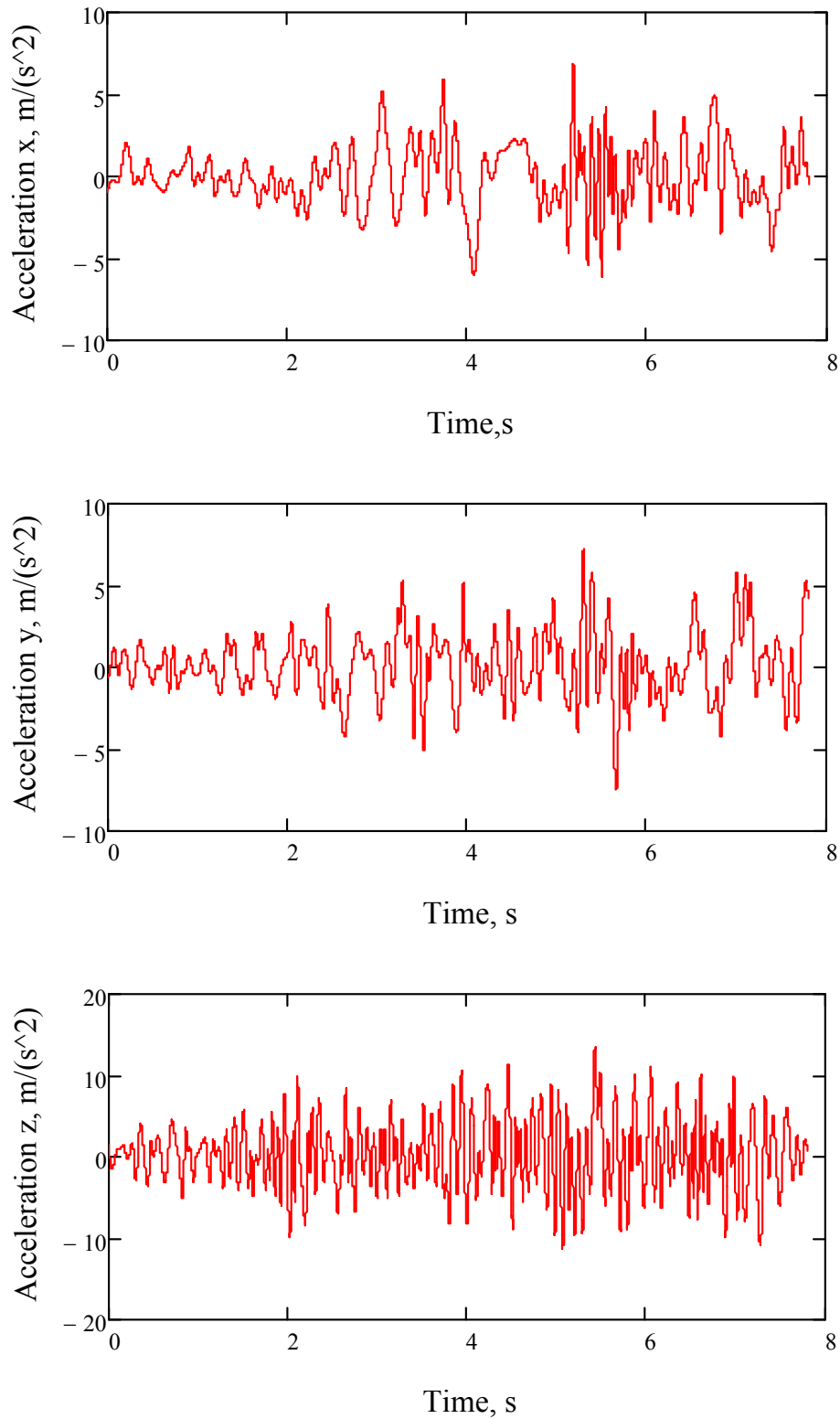


Рис. 4. 3D-акселерограмма землетрясения в г. Газли (Узбекистан)



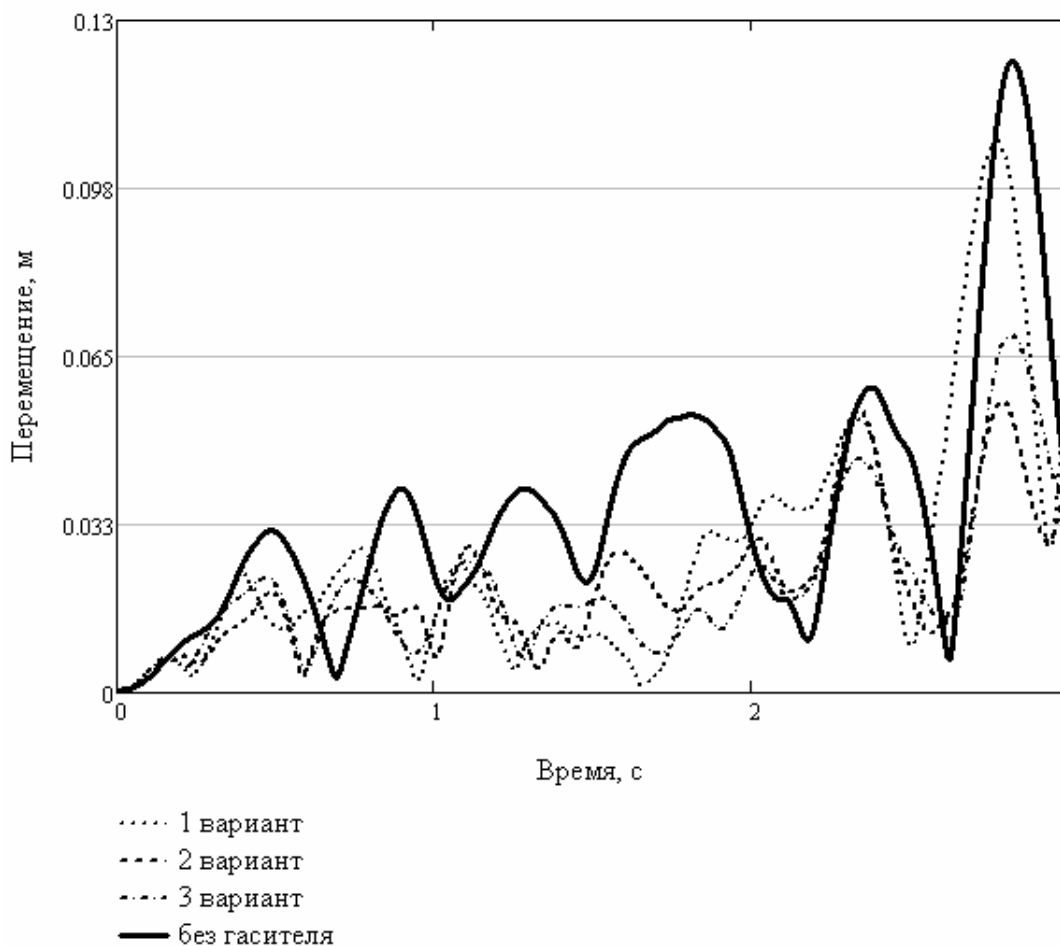


Рис. 5. Результаты расчета

**Выводы.** На основе результатов динамических расчетов колебаний купола – сравнений перемещений наиболее податливого узла купола с разными вариантами крепления гасителя – проведен анализ эффективности трех вариантов расположения гасителя колебаний. По результатам численных экспериментов установлен наиболее эффективный способ определения наклона ленты гасителя к защищаемой конструкции. Таким способом является выбор направления крепления лент по результатам сложения векторов, определяющих максимальные перемещения от единичных воздействий в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

#### Список литературы

1. Шеин, А.И. Инерционно преднатяжительная полиэстерно-ленточная система гашения колебаний циклически симметричных конструкций купольного типа / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – № 10. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at_download/file)
2. Шеин, А.И. Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, В.А. Монахов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 122–129.
3. Шеин, А.И. Колебания закрытых куполов с ленточной системой гашения колебаний / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2020. – № 12. – С. 1–10.

## References

1. Shein, A.I. Inertially pre-tensioning polyester-ribbon vibration damping system of cyclically symmetric dome-type structures / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Modeling and mechanics of structures. – 2019. – № 10. – Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at_download/file)
2. Shein, A.I. Tape vibration damping system for closed domes / A.I. Shein, A.V. Chumanov, V.A. Monakhov // Regional architecture and construction. – 2021. – No. 1 (46). – P. 122–129.
3. Shein, A.I. Vibrations of closed domes with a tape vibration damping system / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Modeling and mechanics of structures. – 2020. – No. 12. – P. 1–10.

УДК 624.04

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_51

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Шеин Александр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Механика»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Азимова Яна Александровна,**  
аспирант кафедры «Механика»  
E-mail: azimova.ya@gmail.com

Penza State University of Architecture  
and Construction  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Shein Alexander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Mechanics»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Azimova Yana Alexandrovna,**  
Postgraduate student of the department  
«Mechanics»  
E-mail: azimova.ya@gmail.com

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФИБРОАРМИРОВАННЫХ БАЛОК

А.И. Шеин, Я.А. Азимова

Дается алгоритм решения оптимизационной задачи для композита (фибробетона). Алгоритм основан на направленном применении пакета символьной математики Maple 21 на этапе формирования математической модели задачи и конечно-элементном представлении поведения балочной системы при решении плоской задачи теории упругости композитной системы. Показана реализация этой модели для получения оптимальных схем армирования композитов. Выполнена оптимизация количества арматурной фибры балочной фибробетонной системы. Приведены численные результаты решения оптимизационной задачи.

*Ключевые слова:* фибробетон, композит, оптимизация армирования, МКЭ, символьная математика

## PRACTICAL OPTIMIZATION OF FIBRO-REINFORCED BEAMS

A.I. Shein, Y.A. Asimova

An algorithm for solving the optimization problem for composite (fiber concrete) is given. The algorithm is based on the directed application of the symbolic mathematics package Maple 21 at the stage of forming a mathematical model of the problem and a finite element representation of the behavior of a beam system when solving a planar problem of the elasticity theory of a composite system. The implementation of this model for obtaining optimal reinforcement schemes of composites is shown. The paper optimizes the amount of reinforcement fiber of the beam fiber-concrete system. Numerical results of solving the optimization problem are presented.

*Keywords:* fiber concrete, composite, reinforcement optimization, FEM, symbolic mathematics

**Введение.** Железобетон, обладая высокими эксплуатационными характеристиками и сравнительно невысокой стоимостью, занял лидирующую позицию в строительной отрасли. В связи с огромными объемами использования этого материала большое значение имеет минимизация его стоимости при сохранении прочностных и жесткостных характеристик. При этом наиболее существенную часть стоимости железобетона составляет стоимость арматуры.

Железобетон можно рассматривать как композитный материал, в котором матрица представлена цементным связующим, песчаным и щебеночным наполнителями, а армирование выполняется стальной стержневой арматурой или стальной фиброй. Для композита в виде фибробетона, так же, как и для железобетона, недостаточная прочность матрицы компенсируется армированием. В ряде случаев более долговечную эксплуатацию армированной бетонной конструкции обеспечивает применение нестальной арматуры. При этом используются пластиковые волокна или стержни

(базальтоволокно и стекловолокно) либо полипропиленовые волокна, микросинтетические волокна.

Известно, что матрица бетона хорошо работает в сжатых зонах, но слабо сопротивляется разрыву. Очевидно, что свойства армированного бетона как композита в конструкции можно существенно улучшать, если правильно, оптимально распределять арматуру по телу конструкции. Актуальность решения данной задачи резко возрастает при переходе к 3D-технологиям строительства и фибробетону.

Математический пакет Maple предоставляет возможность программировать в его среде, создавая пакеты символьных процедур, направленные на подготовку математической модели оптимизации композита и решение сложных оптимизационных задач с использованием встроенных функций и объектно-ориентированного символьного подхода.

В работах [1-3] показано, что виртуальное тестирование реальных композитных конструкций не только может уменьшить затраты на физические эксперименты, но и позволит обеспечить экономичную гибкость проектирования. В работе [6] приведено решение задачи оптимизации стержневой арматуры балок. В статье [5] описаны теоретические основы оптимизации композитов.

Актуальность данной работы заключается в снижении затрат за счет построения и практической реализации алгоритма решения оптимизационной задачи армирования композитных несущих строительных конструкций.

Цель работы заключается в создании оптимизационной модели композита с применением математической вычислительной программы Maple 21 и в реализации этой модели для получения оптимальных схем армирования композитов.

**Построение модели и алгоритма оптимизации.** В Maple реализовано несколько функций для работы с символьными вычислениями, которые оказываются просто необходимыми при построении оптимизационных задач. Здесь следует выделить функции матричных вычислений, функции решения символьных уравнений и систем, функции преобразования систем уравнений из матричной формы к отдельным строкам.

В данной работе представлено выполнение оптимизации количества арматурной фибры композитной системы, находящейся в условиях плоского напряженного состояния (типа железобетонной балки, балки-стенки, арки и т.п). Решение производилось с помощью пакета «Оптимизация» Maple. Программа NLPsolve, представленная в пакете «Оптимизация», позволяет найти глобальный экстремум нелинейной целевой функции при наличии нелинейных ограничений.

Для балок или балок-стенок в условиях плоского напряженного состояния матрицы жесткости конечных элементов композита являются функциями

$$K_i = f(E_{np}(\mu_i), \nu, \delta, x_{ij}, y_{ij}), \quad (1)$$

где  $E_{np}$  – приведенный модуль упругости композита;  $\mu_i$  – доля армирования или тела матрицы  $i$  элемента;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta$  – толщина балки;  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  – координаты узлов  $i$  элемента.

Приведенный модуль упругости плоского конечного элемента композита можно определить по модели Фойхта для моноармированных фибробетонов по формуле

$$E_{np} = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2, \quad (2)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$  – модули упругости бетона и фибры соответственно;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – объемная доля соответственно бетона и фибры в данном типе конечного элемента композита.

Для полиармированных фибробетонов модуль упругости КЭ определяется с помощью формулы

$$E_{np} = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2 + \mu_3 E_3. \quad (3)$$

Здесь  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$  – объемная доля соответственно бетона, первой и второй фибры в композите.

Общая математическая модель задачи оптимизации армирования композита может быть записана в виде задачи поиска суммы минимальных объемных совокупных долей фибры в армированных объемах композита:

$$\min f(\mu_i) = \sum \mu_{si} V_i \quad (4)$$

при 
$$K(\mu_{si})U=P, \quad (5)$$

$$U_{\max} \geq U \geq U_{\min}. \quad (6)$$

$$[\varepsilon^+] \geq \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad (7)$$

$$[\varepsilon^-] \leq \frac{1}{2}(\varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi}) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi})^2 + \gamma_{xyi}^2}. \quad (7')$$

Здесь  $\mu_{si}$  – искомые доли армирования групп конечных элементов  $i$ ;  $V_i$  – объемы этих групп конечных элементов;  $K(\mu_{si})$  – матрица жесткости фибробетона, зависящая от искомых параметров армирования;  $U$  – неизвестный вектор узловых перемещений композита;  $U_{\max}$  – вектор максимальных перемещений, подсчитанный при заданном минимальном армировании композита;  $U_{\min}$  – вектор минимальных перемещений, подсчитанный при заданном максимальном армировании композита;  $P$  – заданный вектор узловых нагрузок;  $[\varepsilon^+]$ ,  $[\varepsilon^-]$  – деформация, соответствующая разрыву и дроблению волокон бетона;  $\varepsilon_{xi}$ ,  $\varepsilon_{yi}$  и  $\gamma_{xyi}$  – деформации конечного элемента.

Армированные конечные элементы композита (зоны) можно наметить, выполнив предварительный расчет однородной конструкции. Первая зона соответствует чистому бетону без армирования. Вторую зону армируем искомой фиброй с долей армирования  $\mu(2)$ , а доля бетона здесь  $\mu(1)$ . Третью зону – с долей  $\mu(4)$  (бетон  $\mu(3)$ ) и т.д.

При числе перемещений в пределах 1-2 сотен и использовании обычных компьютеров уравнения равновесия можно разрешить относительно этих перемещений в символьном виде

$$u_i = f(\mu_i, v, \delta, l, P), \quad (8)$$

и тогда задача оптимизации не будет содержать строгих равенств, а неравенства (6) преобразуются к виду

$$[u_i^+] \geq u_i(\mu_i, v, \delta, l, P) \geq [u_i^-]. \quad (9)$$

При этом задача оптимизации зонального армирования примет вид:

$$\min f(\mu_i) = \sum \mu_{si} V_i \quad (10)$$

при 
$$[u_i^+] \geq u_i(\mu_i, v, \delta, l, P) \geq [u_i^-], \quad (11)$$

$$[\varepsilon^+] \geq \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad (12)$$

$$[\varepsilon^-] \leq \frac{1}{2}(\varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi}) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi})^2 + \gamma_{xyi}^2}. \quad (12')$$

Для расчета при кратковременном нагружении можно принять предельную сжимаемость  $[\varepsilon^-] \approx 2,0 \cdot 10^{-3}$ , предельную растяжимость при осевом растяжении

$[\varepsilon^+] \approx (1,53) \cdot 10^{-4}$ , при изгибе и внецентренном сжатии  $[\varepsilon^-] \approx 3,5 \cdot 10^{-3}$ . Предельная растяжимость при изгибе существенно выше и краевые удлинения в этом случае могут вдвое превышать предельную растяжимость, т.е. ее можно принять равной  $[\varepsilon^+] \approx 5 \cdot 10^{-4}$ .

Ограничения на деформации (12) и (12'), выраженные в символьном виде, представляются чрезвычайно сложными и громоздкими выражениями. А для конечно-элементной модели, состоящей из ста и более элементов, становятся просто громадными выражениями. Поэтому учет ограничений (12) и (12') целесообразно реализовывать одним из следующих двух способов. Для задач малой размерности – путем символьного решения уравнений (5), нахождения (8) и реализации задачи оптимизации (10) – (12'). Для задач большой размерности – решаем задачу оптимизации с ограничениями по перемещениям (10) – (11) и последующей проверкой неравенств (12) – (12'). При их нарушении – пошагово увеличиваем  $\mu_i$  соответствующих зон на  $\Delta\mu_i$  до тех пор, пока неравенства не станут выполняться.

**Реализация оптимизационных задач.** Исходные данные для расчета балки приведены в табл.1 и на рис. 1.

Т а б л и ц а 1

Исходные данные

$L$	1.2 м
$h$	0.12 м
$\delta$	0.1 м
$P$	70000 Н
$E(1)$	$2.4 \cdot 10^{10}$ Па
$E(2)$	$\mu(2) \cdot 20 \cdot 10^{10} + (1 - \mu(2)) \cdot 2.4 \cdot 10^{10}$ Па
$E(3)$	$\mu(3) \cdot 20 \cdot 10^{10} + (1 - \mu(3)) \cdot 2.4 \cdot 10^{10}$ Па
$V(1)$	$0,0072$ м <sup>3</sup>
$V(2)$	$0,0018$ м <sup>3</sup>
$\nu$	0.333

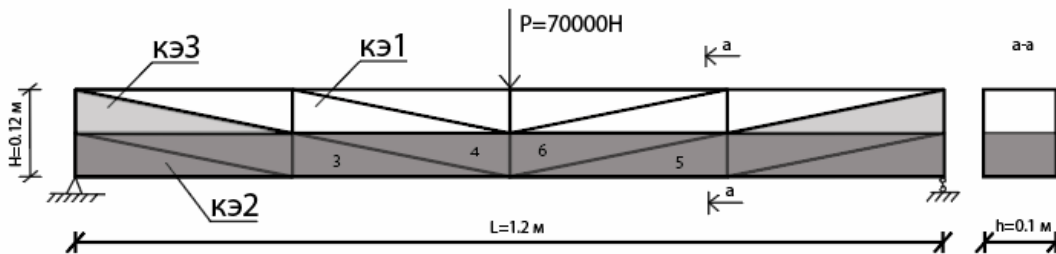


Рис. 1. Схема армированной фиброй балки:  
КЭ1 – неармированные конечные элементы балки; КЭ2 – армирование нижнего слоя;  
КЭ3 – армирование от наклонных припорных трещин

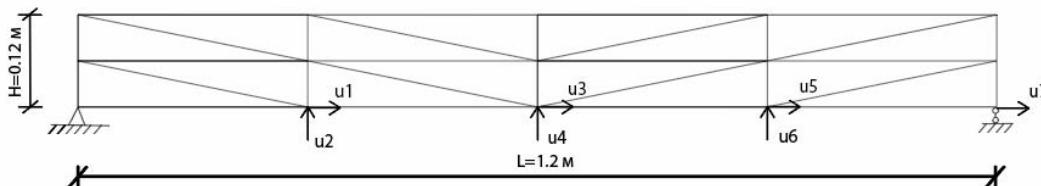


Рис. 2. Схема балки с перемещениями нижних узлов

По результатам решения задачи оптимизации с ограничениями по перемещениям (10) – (11) имеем:

$$\begin{aligned} \mu(2) &= 0,016; \mu(3) = 0,00025; \\ U_1 &= 0.0000359906446981763; \quad U_2 = -0.000628423480450387; \\ U_3 &= 0.000123672495560973; \quad U_4 = -0.000953993502994372; \\ U_5 &= 0.000211354346602010; \quad U_6 = -0.000628423480721535; \\ U_7 &= 0.000247344992158734. \end{aligned}$$

Производим проверку неравенств (12) – (12') для нижних элементов (элементы 3-6), находящихся в растянутой зоне. Проверку осуществляем для максимальной деформации  $[\varepsilon^+] \approx 5 \cdot 10^{-4}$ .

Для третьего и пятого элементов:

$$\varepsilon(\max 3) = 0,000173; \varepsilon(\max 5) = 0,000173; 0,000173 > [\varepsilon^+].$$

Расчетные деформации превышают предельно допустимые.

Для четвертого и шестого элементов:

$$\varepsilon(\max 4) = 0,000522; \varepsilon(\max 6) = 0,000522; [\varepsilon^+] \leq 0,000522.$$

Расчетные деформации превышают предельно допустимые. Следовательно, необходимо увеличить  $\mu_i$  на  $\Delta\mu_i$ .

Увеличиваем  $\mu(2)$  на 50 %. Тогда

$$\mu(2) = 0,024; \mu(3) = 0,00025.$$

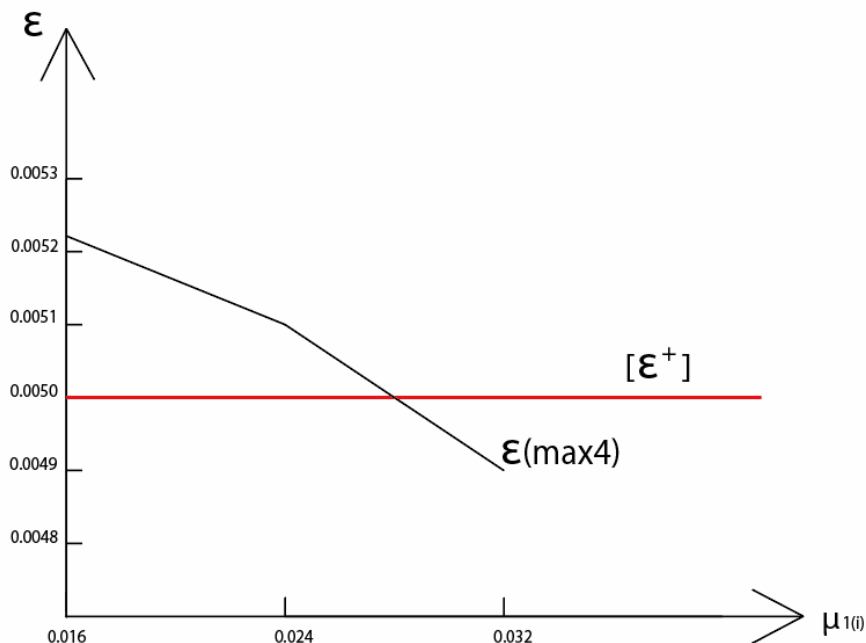


Рис. 3. Максимальные и расчетные деформации

Дальнейший расчет покажем в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчет армирования по предельным деформациям

N п/п	$\mu_i$	$U$	$\varepsilon^+$	$[\varepsilon^+]$	$\Delta\mu$	$\mu_i + \Delta\mu$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,016	0.00003599 – 0.0006284 0.0001236 – 0.0009539 0.0002113 – 0.0006284 0.0002473	$\varepsilon(\max 3) = 0,000173$  $\varepsilon(\max 4) = 0,000522$	0.0005	0.008	0.024

1	2	3	4	5	6	7
2	0.024	0.00003334 – 0.0005960 0.0001145 – 0.0009048 0.00019566 – 0.0005960 0.00022902	$\varepsilon (\max 3)=0,000169$  $\varepsilon (\max 4)=0,000510$	0.0005	0.008	0.032
3	0.032	0.00008252 –0.0010828 0.0002778 –0.0009539 0.00021135 –0.0006284 0.00024734	$\varepsilon (\max 3)=0,000165$  $\varepsilon (\max 4)=0,000490$	0.0005	0	0.032

Условия выполнены. Принимаем  $\mu(2)=3,2\%$ ;  $\mu(3)=0,025\%$ .

**Выводы.** Разработана методика формирования математической задачи оптимизации композита на основе символьной математики Maple. Разработан и реализован практический метод оптимизации армирования композита с учетом ограничений по перемещениям и деформациям. Работоспособность метода проверена на численном примере оптимизации армирования фибробетонной балки.

#### Список литературы

1. Reiner, Johannes. Structural Analysis of Composites With Finite Element Codes: An Overview of Commonly Used Computational Methods / Johannes Reiner, Reza Vaziri // Comprehensive Composite Materials II, Second Edition. – Eight Volume Set. – 2018. – Vol. 8. – P. 61–84.
2. Teotia, Meenu. Applications of finite element modelling in failure analysis of laminated glass composites: A review / Meenu Teotia, R.K. Soni // Engineering Failure Analysis. – 2018. – P. 412–437.
3. Чернякин, С.А. Анализ роста расслоений в композитных конструкциях / С.А. Чернякин, Ю.В. Скворцов // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2014. – №4. – С. 249–255.
4. Игнатьев, Ю.Г. Математическое и компьютерное моделирование фундаментальных объектов и явлений в системе компьютерной математики Maple / Ю.Г. Игнатьев // Лекции для школы по математическому моделированию. – Казань: Казанский университет, 2014. – С. 298.
5. Шеин, А.И. Оптимизация массы фибры фибробетонных конструкций / А.И. Шеин, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – №11. – С. 9–18.
6. Шеин, А.И. Оптимизация арматуры железобетонных конструкций в условиях плоского напряженного состояния / А.И. Шеин, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – №9. – С. 5–17.

#### References

1. Reiner, Johannes. Structural Analysis of Composites With Finite Element Codes: An Overview of Commonly Used Computational Methods / Johannes Reiner, Reza Vaziri // Comprehensive Composite Materials II, Second Edition. – Eight Volume Set. – 2018. – Vol. 8. – P. 61–84.



2. Teotia, Meenu. Applications of finite element modelling in failure analysis of laminated glass composites: A review / Meenu Teotia, R.K. Soni // *Engineering Failure Analysis*. – 2018. – P. 412–437.
3. Chernyakin, S.A. Analysis of the growth of stratifications in composite structures / S.A. Chernyakin, Yu.V. Skvortsov // *Siberian Aerospace Journal*. – 2014. – No.4. – P. 249–255.
4. Ignatiev, Yu.G. Mathematical and computer modeling of fundamental objects and phenomena in the Maple computer mathematics system / Yu.G. Ignatiev // *Lectures for school on mathematical modeling*. – Kazan: Kazan University, 2014. – P. 298
5. Shein, A.I. Optimization of the fiber mass of fibroconcrete structures / A.I. Shein, Ya.A. Azimova // *Modeling and mechanics of structures*. – 2019. – No.11. – P. 9–18.
6. Shein, A.I. Optimization of reinforcement of reinforced concrete structures in a flat stressed state / A.I. Shein, Ya.A. Azimova // *Modeling and mechanics of structures*. – 2019. – No. 9. – P. 5–17.

УДК 624.01

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_58

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Комаров Виктор Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Болдырева Ольга Вячеславовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: boov@yandex.ru

**Трегуб Александр Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: tregubalex@yandex.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Comarov Victor Alexandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Professor of the department «Building  
structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Boldyreva Olga Vajcheslavovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Building structures»  
E-mail: boov@yandex.ru

**Tregub Alexander Yurievich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Building structures»  
E-mail: tregubalex@yandex.ru

## КОРОТКИЕ КОНСОЛИ РИГЕЛЕЙ МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСОВ: ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ СЖАТИЯ И СРЕЗА

V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.Yu. Tregub

Показано, что разрушение бетона в сжатых полосах консольных опор ригелей обуславливается его напряженным состоянием и происходит от сжатия в результате действия наибольших сжимающих напряжений, от сдвига (среза) при действии наибольших касательных напряжений, а также одновременного действия нормальных и касательных напряжений. Определены соотношения между нормальными напряжениями  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и прочностью бетона  $R_b$  при оценке предельного состояния среза по критерию прочности бетона (сжатие-растяжение) с помощью метода компьютерного моделирования. Приведены расчетные зависимости предельного состояния бетона при сжатии и срезе.

*Ключевые слова: короткая консоль ригеля, сжатая бетонная полоса, предельное состояние бетона, сжатие и срез*

## SHORT CONSOLES OF CROSSBARS OF MULTI-STOREY FRAMES: THE STRENGTH OF CONCRETE UNDER THE COMBINED ACTION OF COMPRESSION AND SHEAR

V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.Yu. Tregub

The destruction of concrete in compressed strips of cantilever supports of the crossbars is caused by its stress state and occurs from compression, as a result of the action of the greatest compressive stresses, from shear under the action of the greatest tangential stresses, as well as the simultaneous action of normal and tangential stresses. To determine the relationship between the normal stresses  $\sigma_x, \sigma_y$  and the strength of concrete  $R_b$  when assessing the limiting state of the cut according to the criterion of concrete strength (compression-tension), a computer simulation method is used. The calculated dependences of the limiting state of concrete during compression and shearing are given.

*Keywords: short crossbar console, compressed concrete strip, limit state of concrete, compression and shear*

Разрушение бетона начинается с образования трещин, в том числе в результате действия сжатия. Сжатые полосы бетона в коротких консолях ригелей образуются между грузовыми и опорными площадками (физическими и условными) в виде наклонной сжатой полосы, в пределах которой концентрируются главные сжимающие напряжения.

Разрушение происходит по площадкам, наклонным к направлению вертикальной сжимающей нагрузки, и причиной является возникновение одновременно нормальных и касательных напряжений, развивающихся в сжатой наклонной полосе бетона.

Для анализа напряженно-деформированного состояния сжатого бетона использованы компьютерные (численные) модели образцов. При реализации соотношения между сопротивлениями сжатию и срезу сложное напряженное состояние приведено к эквивалентному одноосному напряжению.

Опасное состояние материалов (близкое к предразрушению) лежит на границе применения закона Гука (с известным, достаточным для практики разрушением). Это позволяет рассматривать условия прочности при компьютерном моделировании опытных образцов в упругой стадии деформирования.

Опытные образцы при моделировании приняты подобными образцам физического эксперимента. Геометрическая модель схемы армирования показана на рис. 1.

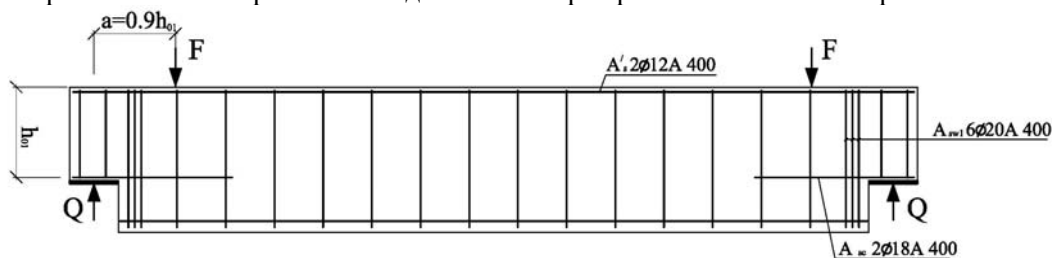


Рис. 1. Схема армирования: геометрическая модель

Для модельного анализа применены следующие типы конечных элементов: бетон – SOLID45, арматура – BEAM4, стальные опоры SOLID45.

Деформативные характеристики бетона и арматуры приняты по диаграмме деформирования. Загрузка образцов выполнено симметрично сосредоточенными силами с пролетом среза  $a=0,9h_{01}$ .

Расчет выполнен с помощью программного комплекса Лира САПР2013.

Изополя главных сжимающих, нормальных и касательных напряжений консольных опор ригелей при пролетах среза  $a=0,9h_{01}$  показаны на рис. 2.

Распределение напряжений позволяет оценить сопротивление бетона сжатию и срезу.

Основное влияние на сопротивление бетона сжатию оказывают главные сжимающие напряжения, действующие в наклонной сжатой полосе между опорной и грузовой площадкой, срезу – одновременно действующие касательные и нормальные напряжения по вертикальному сечению вдоль сосредоточенных хомутов.

При выявлении предельного состояния бетона в наклонных полосах в результате усилий сжатия используется нормативный подход.

Предлагается сопротивление бетона сжатию в наклонных полосах консольных опор ригелей оценивать зависимостями, рекомендованными пособием по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры:

$$Q \leq R_b b l_{\text{sup}} \sin^2 \theta (1 + 5\alpha \mu_w). \quad (1)$$

Для определения предельных напряжений при срезе принят критерий, разработанный А.А. Гвоздевым на основе общего анализа результатов испытаний бетонных образцов железобетонных элементов и конструкций.

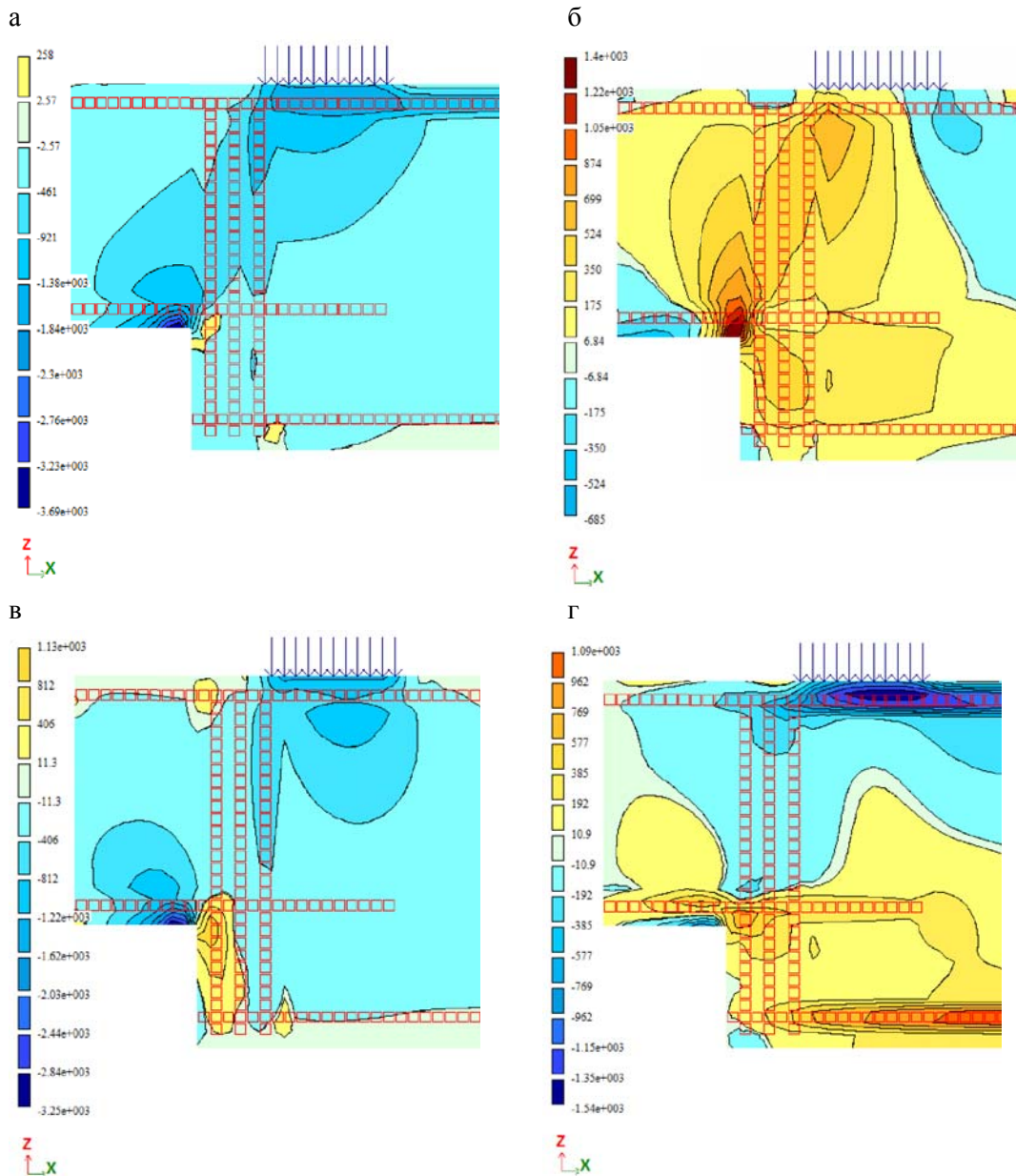


Рис. 2. Изополя напряжений:

а – главные сжимающие  $\sigma_1$ ; б – касательные  $\tau_{xy}$ ; в – нормальные  $\sigma_y$ ; г – нормальные  $\sigma_x$

Расчетные зависимости для определения критерия прочности бетона в зависимости от касательных  $\tau_{xy}$  и нормальных  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  напряжений в области «сжатие – растяжение» имеют вид:

$$m(\tau_{xy}/R_{bt})^2 - 1/m(\sigma_x/R_b)(\sigma_y/R_b) - (\sigma_x/R_b - \sigma_y/R_b) = 0; \quad (2)$$

$$m(\lambda - m)^2 \left( \frac{\tau_{xy}}{R_{bt}} \right)^2 + \lambda \left( \left( \frac{\sigma_x}{R_b} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_y}{R_b} \right)^2 \right) - \frac{\lambda^2 + m^2}{m(\sigma_x / R_b)(\sigma_y / R_b)} - \lambda m \left( \frac{\sigma_x}{R_b} + \frac{\sigma_y}{R_b} \right) - m = 0, \quad (3)$$

где  $m = R_{bt}/R_b$ . (4)

Графически расчетные критерии прочности бетона в координатах  $\tau_{xy}/R_{bt}$  и  $\sigma_x/R_b$  при различных значениях  $\sigma_y/R_b$  представлены на рис. 3.

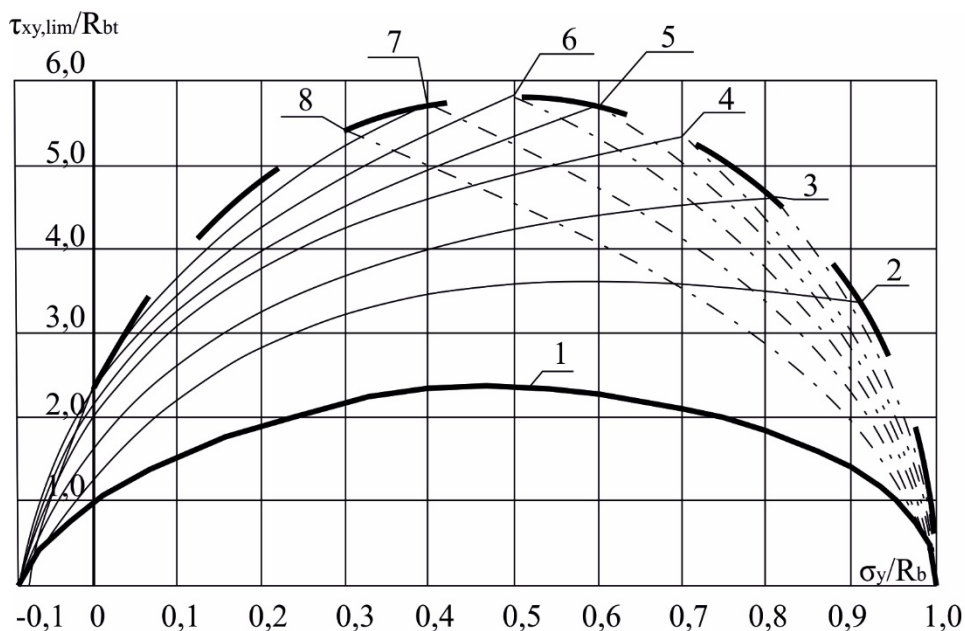


Рис. 3. Оценка прочности бетона при плоском напряженном состоянии в координатах нормальных и касательных напряжений:

1 –  $\sigma_y/R_b=0,2$ ; 2 –  $\sigma_y/R_b=0,1$ ; 3 –  $\sigma_y/R_b=0,2$ ; 4 –  $\sigma_y/R_b=0,3$ ; 5 –  $\sigma_y/R_b=0,4$ ;  
6 –  $\sigma_y/R_b=0,5$ ; 7 –  $\sigma_y/R_b=0,6$ ; 8 –  $\sigma_y/R_b=0,7$

Расчет прочности сжатой полосы при срезе производился по следующей зависимости:

$$Q_{\tau} \leq R_{bt}^* b L, \quad (5)$$

где  $L$  – длина участка линии среза;  $R_{bt}^*$  – прочность бетона при срезе с учетом влияния предельных напряжений,

$$R_{bt}^* = \gamma_{\tau} R_{bt}; \quad (6)$$

здесь  $\gamma_{\tau}$  – коэффициент, определяемый по А.А. Гвоздеву (учитывается влияние плоского напряженного состояния предельных напряжений в зависимости от касательных  $\tau$  и нормальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ).

Отношения  $\sigma_x/R_b$  и  $\sigma_y/R_b$  приняты из анализа напряженно-деформированного состояния и определены по численным моделям (см. рис. 2).

При сопоставлении расчетов и результатов опытов можно отметить, что предлагаемые зависимости хорошо оценивают сопротивление бетона при одновременном действии сжатия и среза: среднее отклонение  $Q^{\text{test}}/Q^{\text{calc}}$  составляет примерно 1,15.

#### Вывод

Предлагается проводить оценку прочности бетона короткой консоли ригелей при сжатии – по нормативной методике, при срезе – по критерию А.А. Гвоздева (с учетом зависимости от касательных  $\tau_{xy}$  и нормальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , определяемых на основе компьютерного моделирования).

#### Список литературы

1. Баранова, Т.И. Расчетные модели сопротивления срезу сжатых зон железобетонных конструкций: монография / Т.И. Баранова. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 250 с.

2. Комаров, В.А. Экспериментальная теория сопротивления ригелей с подрезкой: монография / В.А. Комаров. – М.: Спутник+, 2013. – 199 с.
3. Комаров, В.А. Разрушение по сжатым полосам бетона консольных опор ригелей многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Бетон и железобетон. – 2015. – №3. – С.10–13.
4. Комаров, В.А. Напряженно-деформированное состояние консольных опор балок с подрезкой / В.А. Комаров, О.В. Болдырева, А.Ю. Трегуб // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №1. – С.95–102.
5. Комаров, В.А. Исследования прочности сжатых полос бетона консольных опор ригелей с подрезками многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2021. – №3(296). – С.12–18.

#### References

1. Baranova, T.I. Computational models of shear resistance of compressed zones of reinforced concrete structures: monograph / T.I. Baranova. – Penza: PGUAS, 2005. – 250 p.
2. Komarov, V.A. Experimental theory of resistance of crossbars with trimming: monograph / V.A. Komarov. – M.: Sputnik+, 2013. – 199 p.
3. Komarov, V.A. Destruction by compressed concrete strips of cantilever supports of crossbars of multi-storey frames / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Concrete and reinforced concrete. – 2015. – No.3. – P.10–13.
4. Komarov, V.A. Stress-strain state of cantilever beam supports with trimming / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.Yu. Tregub // Regional architecture and engineering. – 2021. – No.1. – P.95–102.
5. Komarov, V.A. Studies of the strength of compressed concrete strips of con-sol supports of crossbars with trimming of multi-storey frames / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Construction mechanics and calculation of structures. – 2021. – №3(296). – P.12–18.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Бакушев Сергей Васильевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Механика»  
E-mail: bakuchsv@mail.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Bakushev Sergey Vasilevich,**  
Doctor of Sciences,  
Professor of the department «Mechanics»  
E-mail: bakuchsv@mail.ru

## ИЗГИБ ТОНКИХ ЖЁСТКИХ ПЛАСТИН С КАСАТЕЛЬНЫМИ УСИЛИЯМИ

С.В. Бакушев

Рассмотрены вопросы расчёта на изгиб тонких жёстких упругих пластинок, нагруженных нормальными и касательными нагрузками. Сформулированы гипотезы для построения теории расчёта таких пластинок, аналогичные гипотезам Г. Кирхгофа – Лява. Получены выражения для определения деформаций, напряжений и внутренних усилий в поперечных сечениях пластинки. Построено дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности тонкой жёсткой упругой пластинки, отличающееся от уравнения Софи-Жермен – Лагранжа лишь изменённой правой частью. Представлен числовой пример по определению напряжений в тонкой жёсткой пластинке, шарнирно опёртой по контуру и нагруженной нормальными и касательными нагрузками. Полученные соотношения могут найти применение при расчёте тонких жёстких упругих пластинок, нагруженных нормальными и касательными нагрузками.

*Ключевые слова:* тонкая жёсткая пластинка, упругость, касательные и нормальные нагрузки, перемещения, деформации, напряжения, внутренние усилия, дифференциальное уравнение равновесия

## THIN RIGID PLATES BENDING WITH TANGENTIAL FORCES

S.V. Bakushev

The calculation of thin rigid elastic plates bending loaded with normal and tangential loads is considered. Theory construction hypotheses for calculating such plates are formulated, analogous to those of G.Kirchhoff–Lyave. Formula for determining deformations, stresses and internal forces in the cross-sections of the plate has been received. A differential equation is constructed for the curved middle surface of a thin rigid elastic plate, which differs from the Sophie-Germain-Lagrange equation only in the transformed right part. The numerical illustration of determining stresses in a thin rigid plate pivotally supported along a contour and loaded with normal and tangential loads is considered. The obtained relations can be applied in the calculation of thin rigid elastic plates loaded with normal and tangential loads.

*Keywords:* thin rigid plate, elasticity, tangential and normal loads, displacements, deformations, stresses, internal forces, differential equation of equilibrium

**Введение.** В первой половине XX столетия стали появляться уточнённые теории расчёта тонких жёстких пластинок, основанные на гипотезах Г.Кирхгофа – Лява [1–11]. Это обуславливалось тем, что классическая теория, удовлетворяющая требованиям многих инженерных расчетов, в ряде случаев не выдерживает критики ни с практической точки зрения, ни с позиций трехмерной теории упругости.

Оставаясь в рамках гипотез линейной теории упругости, то есть принимая принцип затвердевания, принцип независимости действия сил, принцип Сен-Венана, рассмотрим построение основных уравнений для расчёта тонкой жёсткой упругой пластинки, нагруженной нормальными  $q(x, y)$  и касательными  $t_x(x, y)$  и  $t_y(x, y)$  усилиями по её верхней плоскости, параллельной срединной поверхности (рис. 1).

Таким образом, под действием внешней нагрузки пластинка будет испытывать изгиб со сдвигом. При этом и поперечная, и касательная нагрузки воспринимаются опорными конструкциями, обустроенными по контуру на нижней поверхности пластинки.

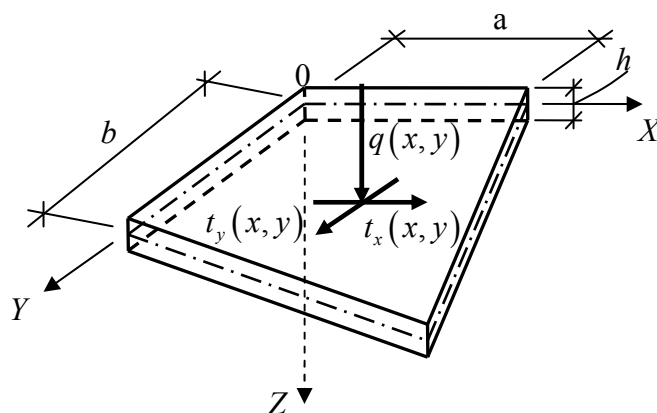


Рис. 1. Тонкая жёсткая пластинка под действием нормальных и касательных нагрузок

У тонких жёстких пластинок основную роль в сопротивлении внешним нагрузкам играют изгибные силовые факторы. Деформациями в срединной поверхности и мембранными усилиями в этом случае можно пренебречь.

Следует отметить, что построению теории расчёта тонких жёстких пластинок, нагруженных кроме нормальной ещё и касательными нагрузками, способствует использование таких пластинок в строительной практике [12, 13].

**Основные гипотезы и допущения.** Тонкие жёсткие пластинки, нагруженные поперечной нагрузкой, рассчитывают по приближённой теории – технической теории изгиба пластинок, основанной на гипотезах, предложенных немецким физиком Г. Кирхгофом [14]. В нашем случае, в силу наличия касательных нагрузок, гипотезы Г. Кирхгофа следует сформулировать в следующей редакции.

1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной плоскости до деформации, остаётся прямолинейным и после деформирования пластинки, однако длина его изменяется.

В локальной системе прямоугольных декартовых координат, координатная плоскость  $XOY$  которой привязана к срединной поверхности пластинки, первая гипотеза предполагает, что прямые углы между направлением рассматриваемого прямолинейного элемента и осями  $OX$  и  $OY$  меняются в процессе изгиба пластинки, то есть не остаются прямыми. Следовательно, сдвиги между слоями пластинки, параллельными срединной плоскости, присутствуют или, по крайней мере, таковы, что их нужно учитывать:

$$\gamma_{zx} = \gamma_1 = \text{const}; \quad \gamma_{zy} = \gamma_2 = \text{const}. \quad (1)$$

2. Гипотеза о сохранении расстояния между верхней и нижней плоскостями пластинки предполагает, что линейная деформация в направлении оси  $Z$  (по толщине пластинки) отсутствует или настолько мала, что ею можно пренебречь:

$$\varepsilon_z = 0. \quad (2)$$

3. Перемещения в срединной плоскости пластинки в направлении координатных осей  $X$  и  $Y$  постоянны, то есть

$$u = u_0 = \text{const}, \quad v = v_0 = \text{const}, \quad (3)$$

и срединная плоскость пластинки в результате деформации перемещается как жёсткое тело.



Эта гипотеза носит характер ограничения ввиду малости вертикальных прогибов пластинки.

**Перемещения, деформации и напряжения в пластинке.** Из соотношения (2) следует, что

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \text{ то есть } w = w(x, y). \quad (4)$$

Это означает, что перемещения точек пластинки в направлении оси  $OZ$  не зависят от координаты  $z$ . Другими словами, все точки пластинки, лежащие на одной вертикали, в результате деформации получают одинаковые перемещения в направлении оси  $OZ$ .

Интегрируя соотношения (1), получаем:

$$u = -z \frac{\partial w}{\partial x} + z\gamma_1 + c_1(x, y); \quad v = -z \frac{\partial w}{\partial y} + z\gamma_2 + c_2(x, y).$$

На основании третьей гипотезы  $c_1(x, y) = u_0$  и  $c_2(x, y) = v_0$ . Тогда перемещения в пластинке будут определяться по формулам

$$u = u_0 - z \frac{\partial w}{\partial x} + z\gamma_1; \quad v = v_0 - z \frac{\partial w}{\partial y} + z\gamma_2. \quad (5)$$

В этом случае для деформаций получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, соотношения (6), с учётом зависимостей (1) и (2), определяют все компоненты тензора деформации:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \gamma_1 \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_2 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Из соотношений (5) и (6) следует, что и перемещения, и деформации в пластинке выражены через функцию прогибов  $w(x, y)$  срединной поверхности.

Зная деформации, можно вычислить напряжения на основании закона Гука в форме Ламе:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2G\varepsilon_x + 3\lambda\varepsilon_0 = -z(2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \lambda z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; & \tau_{xy} &= G\gamma_{xy} = -2Gz \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \\ \sigma_y &= 2G\varepsilon_y + 3\lambda\varepsilon_0 = -z(2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \lambda z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; & \tau_{yz} &= G\gamma_{yz}; \\ \sigma_z &= 2G\varepsilon_z + 3\lambda\varepsilon_0 = -\lambda z \nabla^2 w; & \tau_{zx} &= G\gamma_{zx}. \end{aligned} \quad (7)$$

В соотношениях (7) равенства (7<sub>3</sub>), (7<sub>5</sub>) и (7<sub>6</sub>) получены лишь вследствие принятых гипотез. При этом уравнения равновесия трёхмерной линейной теории упругости не

удовлетворяются. В действительности касательные напряжения  $\tau_{yz}$  и  $\tau_{xz}$  не остаются постоянными. Их значения найдём из первого и второго трёхмерных уравнений равновесия, учитывая соотношения (7<sub>1</sub>) и (7<sub>2</sub>):

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= (2G + \lambda) \frac{z^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w + c_3(x, y); \\ \tau_{yz} &= (2G + \lambda) \frac{z^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w + c_4(x, y).\end{aligned}$$

Постоянные интегрирования  $c_3(x, y)$  и  $c_4(x, y)$  (постоянные по отношению к переменной  $z$ ) найдём из граничных условий на верхней поверхности пластинки:

- при  $z = -\frac{h}{2}$  касательные напряжения  $\tau_{zx} = t_x(x, y)$ ,  $\tau_{zy} = t_y(x, y)$ .

Следовательно,

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= (2G + \lambda) \frac{1}{2} \left( z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w + t_x(x, y); \\ \tau_{yz} &= (2G + \lambda) \frac{1}{2} \left( z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w + t_y(x, y).\end{aligned}\tag{8}$$

Используя полученные соотношения, из третьего уравнения равновесия найдём нормальное напряжение  $\sigma_z$ , учитывая, что на нижней стороне пластинки при  $z = +\frac{h}{2}$  имеем  $\sigma_z = 0$ :

$$\begin{aligned}\sigma_z &= (2G + \lambda) \left( \frac{zh^2}{8} - \frac{z^3}{6} - \frac{h^3}{24} \right) \left[ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + \\ &+ \left( \frac{h}{2} - z \right) \left[ \frac{\partial t_x(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial t_y(x, y)}{\partial y} \right].\end{aligned}\tag{9}$$

Таким образом, напряжения в тонкой жёсткой пластинке, находящейся под воздействием нормальных и касательных нагрузок, приложенных на верхней стороне пластинки, будут определяться формулами (7<sub>1</sub>), (7<sub>2</sub>), (7<sub>4</sub>), (8) и (9).

**Внутренние усилия в поперечных сечениях пластинки.** Для определения внутренних усилий, возникающих в сечениях пластинки, нормальных к её срединной поверхности, вырежем из пластинки элементарный столбик высотой, равной толщине пластинки  $h$ , и размерами в плане  $dx$  и  $dy$  (рис. 2). На боковых гранях этого столбика на расстоянии  $z$  от срединной поверхности выделим элементарные полоски (площадки) с размерами  $dx dz$  и  $dy dz$ . На площадке  $dy dz$ , перпендикулярной к оси  $OX$ , действуют нормальное напряжение  $\sigma_x$  и касательные напряжения  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{xz}$ . На площадке  $dx dz$ , перпендикулярной к оси  $OY$ , действуют нормальное напряжение  $\sigma_y$  и касательные напряжения  $\tau_{yx}$  и  $\tau_{xy}$ .

Далее рассмотрим боковую грань элементарного столбика, перпендикулярную к оси  $OX$ . Совокупности напряжений  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{xz}$ , действующих на элементарной площадке на этой грани величиной  $dA_x = dy dz$ , соответствует совокупность внутренних усилий:  $N_x$  – продольная сила;  $M_x$  – изгибающий момент;  $Q_x$  – поперечная сила;  $S_x$  – сдвигающая сила и  $H_x$  – крутящий момент.

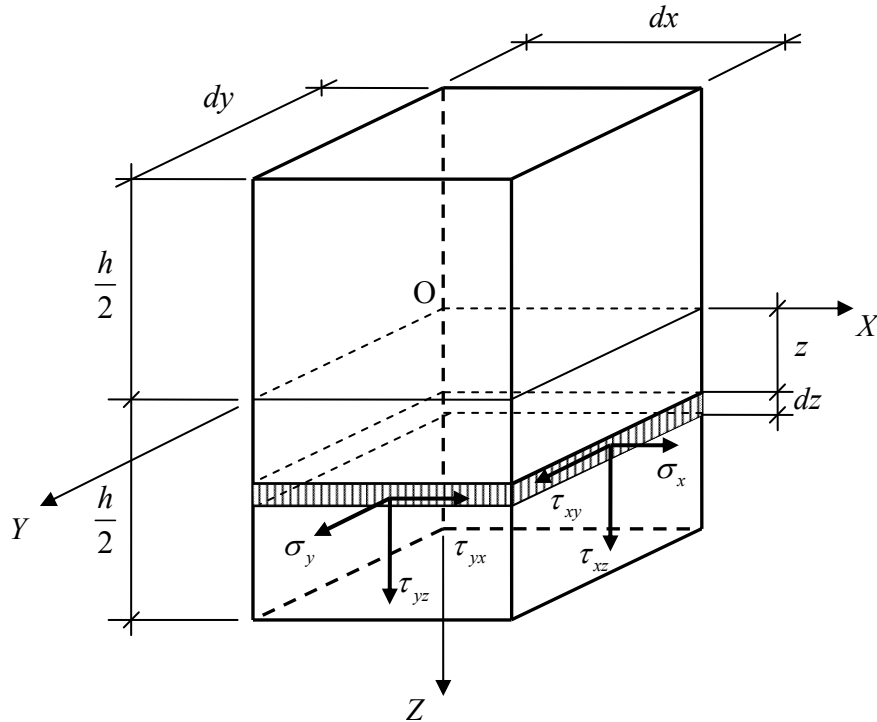


Рис. 2. Напряжения в поперечных сечениях пластинки

Поскольку в любом вертикальном сечении пластинки внутренние усилия в общем случае распределены неравномерно, то мы будем рассматривать внутренние усилия, приходящиеся на единицу длины. В этом случае  $dx = 1$  и  $dy = 1$ . Но тогда величина элементарной площади  $dA_x = dz$  и площадь боковой поверхности столбика будет равна  $A_x = h$ . Следовательно, расчётные формулы для внутренних усилий получают вид:

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_x dz = - \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \left[ (2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] z dz = 0; \quad (10)$$

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_x z dz = - \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \left[ (2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] z^2 dz = \\ = - \left[ (2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \frac{h^3}{12}; \quad (11)$$

$$Q_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xz} dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} - \frac{2G + \lambda}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w dz + \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} t_x(x, y) dz = \\ = - (2G + \lambda) \frac{h^3}{12} \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w + h t_x(x, y); \quad (12)$$

$$S_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xy} dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} -2Gz \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dz = 0; \quad (13)$$

$$H_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} -2Gz^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dz = -2G \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (14)$$

Рассматривая далее боковую поверхность элементарного столбика, перпендикулярную к оси  $OY$ , по аналогии получим ненулевые внутренние усилия  $M_y$ ,  $Q_y$  и  $H_y$ , действующие по этой грани:

$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_y z dz = - \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \left[ (2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] z^2 dz = \quad (15)$$

$$= - \left[ (2G + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \frac{h^3}{12};$$

$$Q_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{yz} dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} - \frac{2G + \lambda}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w dz + \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} t_y(x, y) dz = \quad (16)$$

$$= - (2G + \lambda) \frac{h^3}{12} \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w + h t_y(x, y);$$

$$H_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{yx} z dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} -2Gz^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dz = -2G \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (17)$$

Итак, под действием внешней нагрузки в сечениях пластинки, перпендикулярных её срединной плоскости, возникают внутренние усилия (11), (12), (14), (15), (16), (17) (причём  $H_x = H_y = H$ ), положительные направления которых показаны на рис. 3.

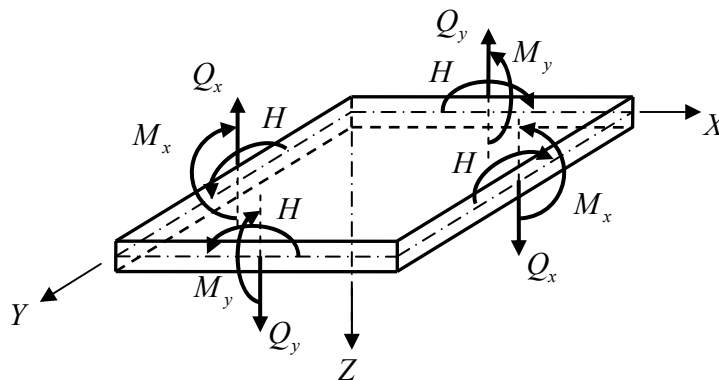


Рис. 3. Внутренние усилия в пластинке

**Дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности пластинки.** Вырежем из пластинки, находящейся под воздействием произвольной поперечной распределённой нагрузки  $q(x, y)$  и произвольной касательной нагрузки  $t_x(x, y)$  и  $t_y(x, y)$ , бесконечно малый элемент срединной плоскости размерами  $dx$ ,  $dy$  и покажем приложенные к нему усилия (рис. 4).

Касательные нагрузки  $t_x(x, y)$  и  $t_y(x, y)$ , приведённые к срединной плоскости, представляют собой распределённые моменты  $M_{tx}(x, y) = t_x(x, y) \cdot \frac{h}{2}$ ,  $M_{ty}(x, y) = t_y(x, y) \cdot \frac{h}{2}$  и распределённые сдвигающие усилия  $T_x(x, y) = t_x(x, y)$ ,  $T_y(x, y) = t_y(x, y)$ .

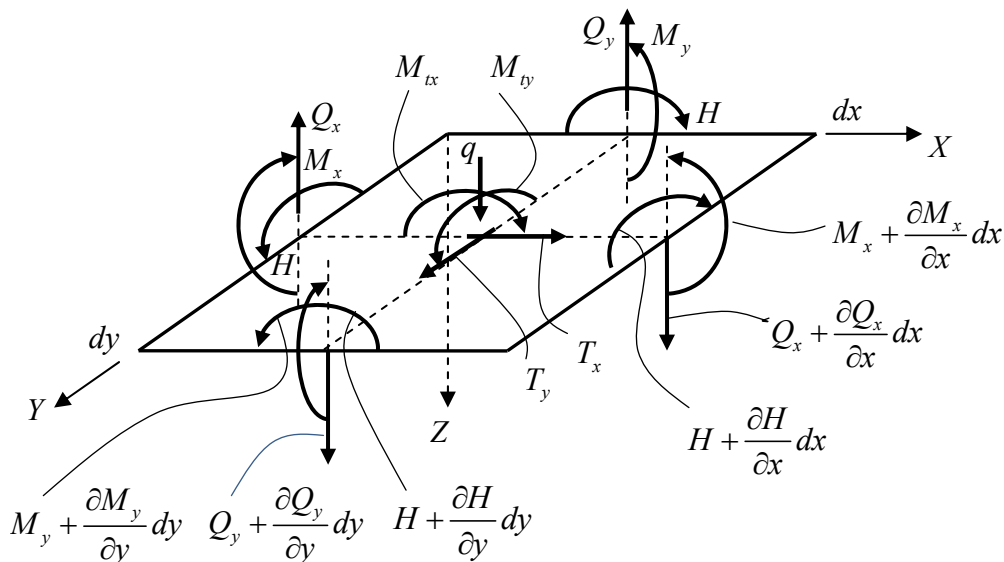


Рис. 4. Бесконечно малый элемент срединной плоскости пластинки с действующими по его боковым сторонам внутренними усилиями и внешней нагрузкой, приведённой к срединной плоскости

Рассматриваемый элемент срединной поверхности будет находиться в равновесии, то есть

$$\sum X \equiv 0: T_x = 0.$$

$$\sum Y \equiv 0: T_y = 0.$$

Полученный результат можно объяснить тем, что, в соответствии с третьей гипотезой, срединная плоскость пластинки не деформируется, и, следовательно, сдвигающие касательные усилия между слоями по толщине пластинки являются самоуравновешенными.

$$\sum Z = 0: -Q_x dy - Q_y dx + \left( Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) dy + \left( Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) dx + q dx dy = 0.$$

Отсюда, пренебрегая бесконечно малыми более высокого порядка малости, получаем:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = -q. \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sum M_x = 0: & \left( M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy \right) dx - M_y dx + \left( H + \frac{\partial H}{\partial x} dx \right) dy - H dy - \left( Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) dx dy + \\ & + Q_x dy \frac{dy}{2} - \left( Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) dy \frac{dy}{2} - M_{ty} dx dy - q dx dy \frac{dy}{2} = 0. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} = Q_y + M_{ty}. \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sum M_y = 0: & \left( M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx \right) dy - M_x dy + \left( H + \frac{\partial H}{\partial y} dy \right) dx - H dx - \left( Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) dy dx + \\ & + Q_y dx \frac{dx}{2} - \left( Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) dx \frac{dx}{2} - M_{tx} dx dy - q dx dy \frac{dx}{2} = 0. \end{aligned}$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} = Q_x + M_{tx}. \quad (20)$$

В формулах (19) и (20) распределённые моменты  $M_{tx}$  и  $M_{ty}$  вычисляются от равнодействующей распределённой по площади касательной нагрузки, приходящейся на один квадратный метр, то есть имеют такую же размерность, как и распределённые поперечные силы.

$$\sum M_z \equiv 0.$$

Подставим поперечные силы из соотношений (19) и (20) в уравнение (18). В результате получим:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -q + \frac{\partial M_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{ty}}{\partial y}. \quad (21)$$

Принимая во внимание выражения для изгибающих и крутящего моментов, записанные через прогибы срединной поверхности (11), (14), (15), (17), формулу (21) запишем в виде:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left[ q - \frac{h}{2} \left( \frac{\partial t_x}{\partial x} + \frac{\partial t_y}{\partial y} \right) \right], \quad (22)$$

где  $D = \frac{2G + \lambda}{12} h^3$  – цилиндрическая жёсткость.

Таким образом, дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности тонкой жёсткой пластинки, находящейся под действием нормальной и касательной поверхностных нагрузок, с учётом изложенных выше гипотез отличается от дифференциального уравнения изогнутой срединной поверхности тонкой жёсткой пластинки, находящейся под действием только нормальной поверхностной нагрузки, построенной на основе гипотез Г.Кирхгофа [14], лишь изменённой правой частью.

Сравнив выражения для внутренних усилий (11), (12), (14), (15), (16), (17) с выражениями для напряжений (7<sub>1</sub>), (7<sub>2</sub>), (7<sub>4</sub>), (8), найдём выражения напряжений через внутренние усилия:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{12M_x}{h^3} z; \quad \sigma_y = \frac{12M_y}{h^3} z; \quad \tau_{xy} = \frac{12H}{h^3} z; \\ \tau_{xz} &= \frac{6}{h^2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \left[ \frac{Q_x}{h} + t_x(x, y) \right]; \\ \tau_{yz} &= \frac{6}{h^2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \left[ \frac{Q_y}{h} + t_y(x, y) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Сопоставив формулы (9) и (22), получим:

$$\sigma_z = \left( \frac{3z}{2} - \frac{2z^3}{h^3} - \frac{1}{2} \right) \left[ q - \frac{h}{2} \left( \frac{\partial t_x}{\partial x} + \frac{\partial t_y}{\partial y} \right) \right] + \left( \frac{h}{2} - z \right) \left( \frac{\partial t_x}{\partial x} + \frac{\partial t_y}{\partial y} \right). \quad (24)$$

При решении практических задач по расчёту тонких жёстких пластинок, нагруженных поверхностными нормальными и касательными нагрузками, следует иметь в виду, что внешний вид эпюр внутренних усилий в поперечных сечениях пластинки может сориентировать пользователя и показать наиболее нагруженные зоны в пластинке. При этом прочность пластинки в точке необходимо будет определять в соответствии с теориями прочности (Треска – Сен-Венана, Губера – Мизеса – Генки и так далее) для трёхмерного напряжённого состояния, то есть в соответствии с напряжениями, определяемыми формулами (7<sub>1</sub>), (7<sub>2</sub>), (7<sub>4</sub>), (8) и (9).

Вопросы формирования статических и геометрических условий на контуре тонкой жёсткой пластинки, находящейся под действием нормальных и касательных поверхностных нагрузок, определяются условиями закрепления и в данной работе не рассматриваются. Что же касается приведённых поперечных сил и реакций в углах прямоугольной пластинки, то формулы Максвелла

$$V_x = Q_x + \frac{\partial H}{\partial y}; \quad V_y = Q_y + \frac{\partial H}{\partial x} \quad (25)$$

остаются справедливыми и в данном случае, однако, принимая во внимание формулы (12) и (16), получаем:

$$\begin{aligned} V_x &= -D \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w - 2G \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} + h t_x(x, y); \\ V_y &= -D \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w - 2G \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + h t_y(x, y). \end{aligned} \quad (26)$$

Сосредоточенные реакции в углах прямоугольной пластинки будут определяться по формулам

$$R = 2H = -2D(1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (27)$$

**З а м е ч а н и е.** Если интенсивность касательных нагрузок остаётся постоянной, то дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности тонкой жёсткой пластинки с касательными нагрузками будет таким же, как и для пластинок, нагруженных только поперечной нагрузкой, и, следовательно, прогибы  $u$  пластинки с касательными нагрузками будут такими же, как и  $u$  пластинок, нагруженных только поперечной нагрузкой.

**Пример расчёта.** Рассмотрим тонкую жёсткую пластинку, шарнирно опёртую по всем четырём сторонам [15, §4.4] (рис. 5). В работе [15] расчёт пластинки, нагруженной равномерно распределённой нормальной нагрузкой интенсивностью  $q$  по всей площади, выполнялся методом конечных разностей.

При этом напряжения в центральном сечении пластинки при  $x = \frac{l}{2}$  и  $y = \frac{l}{2}$  на срединной плоскости при  $z = 0$  определялись соотношениями:

$$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0.$$

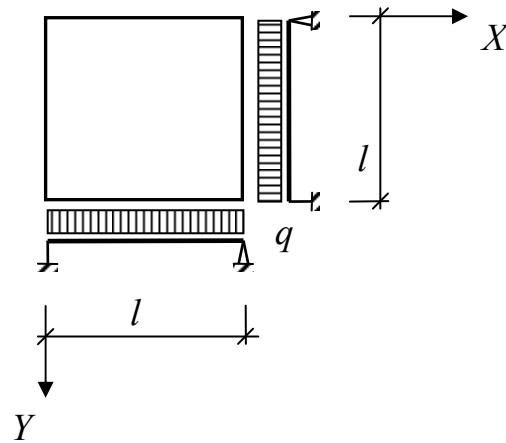


Рис. 5. Пластика, шарнирно опёртая по контуру

На поверхности пластины при  $z = \pm \frac{h}{2}$  напряжения были равны:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \pm 1,828q(1-\mu)\left(\frac{l}{h}\right)^2; \\ \sigma_y &= \pm 1,828q(1-\mu)\left(\frac{l}{h}\right)^2; \\ \tau_{xy} &= 0; \quad \tau_{zx} = 0; \quad \tau_{zy} = 0.\end{aligned}$$

Рассмотрим случай, когда на пластинку кроме нормальной действуют ещё и касательные нагрузки  $t_x$  и  $t_y$ , равномерно распределённые по всей площади пластинки. При этом напряжения в центральном сечении пластинки при  $x = \frac{l}{2}$  и  $y = \frac{l}{2}$  на срединной плоскости при  $z = 0$  будут определяться зависимостями:

$$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 0; \quad \tau_{xz} = \frac{3}{2}t_x; \quad \tau_{yz} = \frac{3}{2}t_y.$$

На поверхности пластины при  $z = \pm \frac{h}{2}$  напряжения будут равны:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \pm 1,828q(1-\mu)\left(\frac{l}{h}\right)^2; \quad \sigma_y = \pm 1,828q(1-\mu)\left(\frac{l}{h}\right)^2; \\ \tau_{xy} &= 0; \quad \tau_{zx} = \frac{3}{2}t_x; \quad \tau_{zy} = \frac{3}{2}t_y.\end{aligned}$$

**Заключение и выводы.** Сформулированы гипотезы для расчёта тонких жёстких пластинок, нагруженных не только нормальной, но и касательными нагрузками по верхней стороне пластинки.

Получены выражения и для деформаций, и для напряжений, и для внутренних усилий, действующих в поперечных сечениях пластинки.

Построено уравнение изогнутой срединной поверхности пластинки. Дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности тонкой жёсткой пластинки, нагруженной нормальными и касательными нагрузками, отличается от уравнения Софи-Жермен – Лагранжа лишь изменённой правой частью.

Полученные соотношения могут найти применение при расчёте тонких жёстких пластинок, нагруженных как нормальными, так и касательными нагрузками.



## Список литературы

1. Reissner, E. On the theory of bending of elastic plates / E. Reissner // *J. of Math, and Phys.* – 1944. – № 23. – P.184–191.
2. Reissner, E. The effect of transverse shear deformation on the bending» of elastic plates / E. Reissner // *J. Appl. Mech.* – 1945. – Vol. 12, 1.
3. Bolle, L. Contribution on probleme lineaire de flexion d'une plaque elastique / L. Bolle // *Bull. Technique de la Suisse Romande.* – 1947. – Vol. 73. – P. 281–285, 293–298.
4. Chi-Teh. Wan. Principle and application of complementary energy method for thin homogeneous and sandwich plates and shells with finite deflections / Chi-Teh Wan // *NACA TN 2620.* – 1952.
5. Schafer, W.M. Uber eine Verfeinerung der Klassischen Theorie dunner schwach gebogener Platten / W.M. Schafer // *ZAMM.* – 1952. – №32. – P.161–171.
6. Frederick, D. On some problems in the bending of thick circular plates on a elastic foundation / D. Frederick // *J. Appl. Mech.* – 1956. – Vol. 23. – P. 2.
7. Гольденвейзер, А.Л. О теории изгиба пластинок Рейсснера / А.Л. Гольденвейзер // *Изв. АН СССР ОТН.* – 1958. – № 4.
8. Koe11er, R.C. Shear deformation in rectangular plates / R.C. Koe11er, F. Essenburg // *Proc. 4th U. S. Congr. Appl. Mech.* – 1962. – Vol. 1.
9. Rudiger, D. Eingespannte Rechteckplatten mit Schubverzerrungen / D. Rudiger // *ZAMM.* – 1963. – № 43. – P. 1–2.
10. Айнола, Л.Я. Об уточненных теориях пластинок типа Рейсснера. Теория оболочек и пластин / Л.Я. Айнола. – Ереван, 1964.
11. Розе, А.В. К изгибу пластин из ориентированных стеклопластиков / А.В. Розе // *Механика полимеров.* – 1965. – № 3.
12. Гаврилов, Т.А. Ориентированная стружечная плита при действии поверхностной касательной нагрузки / Т.А. Гаврилов, Г.Н. Колесников // *Вопросы теории и практики инновационного развития науки и образования / отв. ред. Г.Ю. Гуляев.* – Пенза, 2018. – С. 163–171.
13. Александрова, Н.П. Особенности расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу с учетом накапливания повреждений / Н.П. Александрова, В.В. Чусов // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии.* – 2016. – № 3 (49). – С. 42–50.
14. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Физматгиз, 1963.
15. Бакушев, С.В. Численные методы решения задач механики деформируемого твёрдого тела / С.В. Бакушев. – М.: ЛЕНАНД, 2021. – 426 с.

## References

1. Reissner, E. On the theory of bending of elastic plates / E. Reissner // *J. of Math, and Phys.* – 1944. – № 23. – P.184–191.
2. Reissner, E. The effect of transverse shear deformation on the bending» of elastic plates / E. Reissner // *J. Appl. Mech.* – 1945. – Vol. 12, 1.
3. Bolle, L. Contribution on probleme lineaire de flexion d'une plaque elastique / L. Bolle // *Bull. Technique de la Suisse Romande.* – 1947. – Vol. 73. – P. 281–285, 293–298.
4. Chi-Teh. Wan. Principle and application of complementary energy method for thin homogeneous and sandwich plates and shells with finite deflections / Chi-Teh Wan // *NACA TN 2620.* – 1952.
5. Schafer, W.M. Uber eine Verfeinerung der Klassischen Theorie dunner schwach gebogener Platten / W.M. Schafer // *ZAMM.* – 1952. – №32. – P.161–171.
6. Frederick, D. On some problems in the bending of thick circular plates on a elastic foundation / D. Frederick // *J. Appl. Mech.* – 1956. – Vol. 23. – P. 2.

7. Goldenweiser, A.L. On the theory of bending of Reissner plates / A.L. Goldenweiser // *Izv. AN USSR REL.* – 1958. – No. 4.
8. Koellner, R.C. Shear deformation in rectangular plates / R.C. Koellner, F. Essenburg // *Proc. 4th U. S. Congr. Appl. Mech.* – 1962. – Vol. 1.
9. Rudiger, D. Eingespannte Rechteckplatten mit Schubverzerrungen / D. Rudiger // *ZAMM.* – 1963. – № 43. – P. 1–2.
10. Ainola, L.Ya. About improved theories of Reissner-type plates. The theory of shells and plates / L.Ya. Ainola. – Yerevan, 1964.
11. Roze, A.V. To the bending of oriented fiberglass plates / A.V. Roze // *Mechanics of polymers.* – 1965. – No. 3.
12. Gavrilov, T.A. Oriented strand board under the action of tangential surface loads / T.A. Gavrilov, G.N. Kolesnikov // *Theory and practice issues of science and education innovative development.* – Penza, 2018. – P. 163–171.
13. Alexandrova, N.P. Calculation of asphalt concrete pavements on shear strength taking into account the accumulation of microdamage / N.P. Alexandrova, V.V. Chusov // *Bulletin of Siberian State Automobile and Highway Academy.* – 2016. – No. 3 (49). – P. 42–50.
14. Timoshenko, S.P. Plates and shells / S.P. Timoshenko, S. Voinovsky-Krieger. – M.: Fizmatgiz, 1963.
15. Bakushev, S.V. Numerical methods for solving problems of solid mechanics / S.V. Bakushev. – M.: LENAND, 2021. – 426 p.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 519.87 : 697.956

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_75

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

*Penza State University of Architecture and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Кузина Валентина Владимировна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Kuzina Valentina Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate professor of  
the department «Information and Computing  
Systems»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Кошев Александр Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор,  
действительный член Нью-Йоркской  
академии наук, профессор кафедры  
«Информационно-вычислительные  
системы»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Koshev Alexander Nikolaevich**,  
Doctor of Chemistry Science, Professor,  
the full member of the New York Akademy  
of Sciences, Professor of the department  
«Information and Computing Systems»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Еремкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
советник РААСН, зав. кафедрой  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Eremkin Alexander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architecture, Head of the  
Department «Heat and Gas Supply and  
Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА НАД КОМПАКТНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТОЧЕЧНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

В.В. Кузина, А.Н. Кошев, А.И. Еремкин

Рассматривается задача математического моделирования аэродинамических процессов, происходящих в результате формирования конвективного потока над ограниченным множеством компактно расположенных точечных тепловых источников.

*Ключевые слова: конвективный поток, тепловой источник, математическое моделирование*

### MATHEMATICAL MODELING OF DISTRIBUTION OF CONVECTIVE FLOW OVER A LIMITED SET OF COMPACT POINT HEAT SOURCES

V.V. Kuzina, A. N. Koshev, A.I. Eremkin

The problem of mathematical modeling of aerodynamic processes occurring as a result of the formation of a convective flow over a limited set of compactly located point heat sources is considered

*Keywords: convective flow, heat source, mathematical modeling*

Проблема отведения тепла от компактно расположенных тепловых источников встречается при решении различных задач теплофизики, теплоснабжения и вентиляции [1-3]. Например, актуальной является задача теплоотведения от элементов бытовых и электронных приборов, нагревателей, осветительных приборов и пр. в процессе их эксплуатации, для решения которой чаще всего используется вынужденная конвекция. Однако для решения задачи обеспечения вынужденной конвекции и вентиляции воздуха необходимы знания о распределении и интенсивности тепловых потоков и геометрии так называемых плюмов – тепловых течений, образующихся в условиях постоянного действия источника тепла [4].

В данной работе мы будем рассматривать тепловые потоки от точечных тепловых источников, расположенных на круге симметрично его центру (рис. 1, а). Над каждым источником возникает конвективный поток заданной мощности, который схематично изображен на рис. 1, б.

Согласно теории, тепловые потоки от точечных тепловых источников имеют круговую симметрию относительно вертикальной оси и обычно называются компактными [5].

Примем следующие обозначения:  $z, r$  – цилиндрические координаты.

Приращение импульса конвективного потока, равное подъемной силе, действующей на нагретый воздух на уровнях  $z$  и  $z + dz$ :

$$dy_z = dP_z. \quad (1)$$

Количество тепла, проводимое нагретым воздухом через поперечное сечение потока, равное конвективной теплопроводности источника:

$$Q_z = Q_0. \quad (2)$$

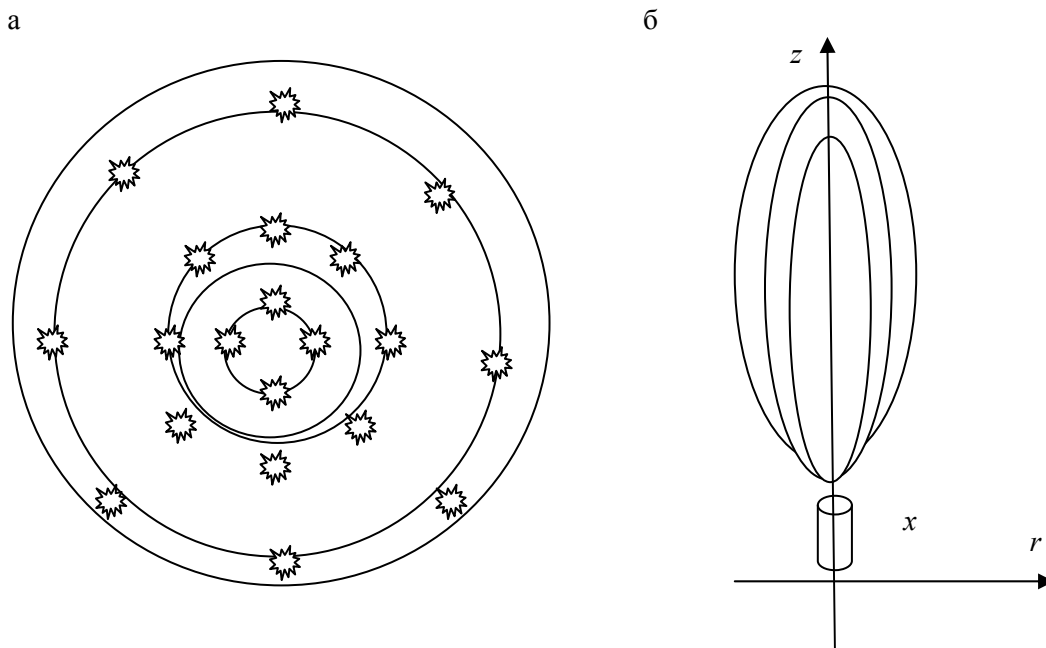


Рис. 1. Схематичное изображение точечных тепловых источников (а) и создаваемых ими конвективных потоков (б)

Распределение скорости:  $w$  – в поперечном сечении ( $z = \text{const}$ ) в произвольной точке,  $w_z$  – на оси  $z$  конвективного потока:

$$w = w_z \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{r}{cz}\right). \quad (3)$$

Избыточные температуры воздуха:  $v$  – в поперечном сечении ( $z = \text{const}$ ) в произвольной точке,  $v_z$  – на оси  $z$  конвективного потока:

$$v = v_z \exp\left(-\frac{\sigma}{2} \cdot \frac{r}{cz}\right). \quad (4)$$

В уравнениях (3), (4)  $c$  и  $\sigma$  – некоторые экспериментально найденные константы. В [1, с. 76] приводятся  $c = 0,082$ ;  $\sigma = 0,8$ .

$$v = T - T_\infty; \quad (5)$$

$$v_z = T_z - T_\infty. \quad (6)$$

В уравнениях (5), (6)  $T$ ,  $T_z$ ,  $T_\infty$  – абсолютные температуры воздуха, соответственно, в произвольной точке сечения, на оси  $z$  и в окружающей среде.

С использованием естественных допущений, а также ряда преобразований получены уравнения [5, с. 75–78] для вертикальной составляющей скорости движения и избыточной температуры воздуха в любой точке пространства:

$$w^3 = \frac{3(1+\sigma)gQ_0}{4\pi c^2 \sigma c_p \rho_\infty T_\infty z} \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{r}{cz}\right)^2\right); \quad (7)$$

$$v^3 = \frac{\sigma(1+\sigma)^2 T_\infty Q_0^2}{6\pi^2 c^4 g c_p \rho^2 z^5} \exp\left(-\frac{3\sigma}{2} \cdot \left(\frac{r}{cz}\right)^2\right). \quad (8)$$

В уравнениях (7), (8):  $\rho_\infty$  – плотность воздуха вне потока;  $c_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

На основании уравнений (7), (8) с использованием естественных предположений (1) – (4), а также несложных преобразований и допущений получены уравнения [5, с. 81–87] для расчета скорости движения воздуха и избыточной температуры воздуха в произвольной точке сложного конвективного потока, образованного двумя одинаковыми тепловыми источниками, расположенными на одинаковом уровне и на одинаковом расстоянии от центра координат (примерно, как на рис. 2).

$$w^3 = \frac{\alpha Q}{z} \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{x}{cz}\right)^2\right) \cdot \left( \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{y-a}{cz}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{y+a}{cz}\right)^2\right) \right); \quad (9)$$

$$v^3 = \frac{\beta Q^2}{z^5} \exp\left(-\frac{3\sigma}{2} \cdot \left(\frac{x}{cz}\right)^2\right) \frac{\left( \exp\left(-\frac{1+\sigma}{2} \cdot \left(\frac{y-a}{cz}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1-\sigma}{2} \cdot \left(\frac{y+a}{cz}\right)^2\right) \right)^3}{\exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{y-a}{cz}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{y+a}{cz}\right)^2\right)}. \quad (10)$$

В приведенных уравнениях величина  $a$  – расстояние от начала координат до источников;  $\alpha = \frac{3(1+\sigma)g}{4\pi c^2 \sigma c_p \rho_\infty T_\infty}$ ;  $\beta = \frac{\sigma(1+\sigma)^2 T_\infty}{6\pi^2 c^4 g c_p \rho_\infty^2}$ ;  $Q$  – тепловая мощность каждого источника (считается одинаковой для каждого источника).

При выводе формул (9) – (10) принято естественное предположение, что в силу симметрии взаимное перетекание воздуха из частей пространства, занятых воздухом каждого из источников, невозможно. Кроме того, принято известное положение, что при взаимодействии конвективных потоков можно использовать правила сложения кубов скоростей.

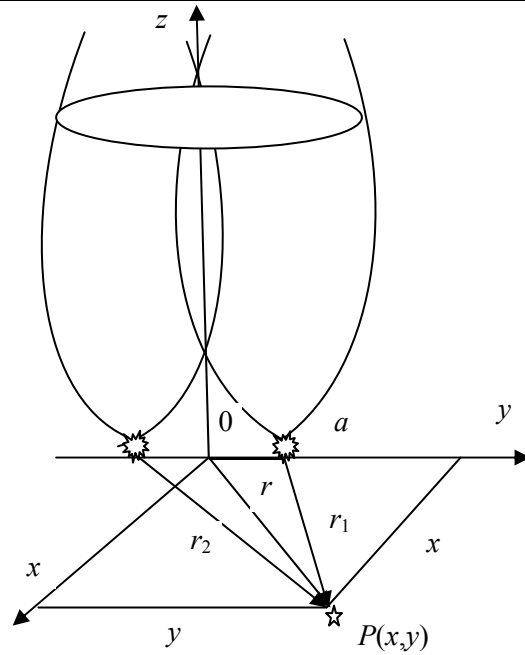


Рис. 2. Схематическое изображение сложного конвективного потока, образованного двумя одинаковыми тепловыми источниками, расположенными на одинаковом уровне и на одинаковом расстоянии от центра координат

Эти же предположения и положения будем использовать и при расчете взаимодействия  $n$  конвективных потоков, расположенных симметрично относительно центра некоторого круга (рис. 3).

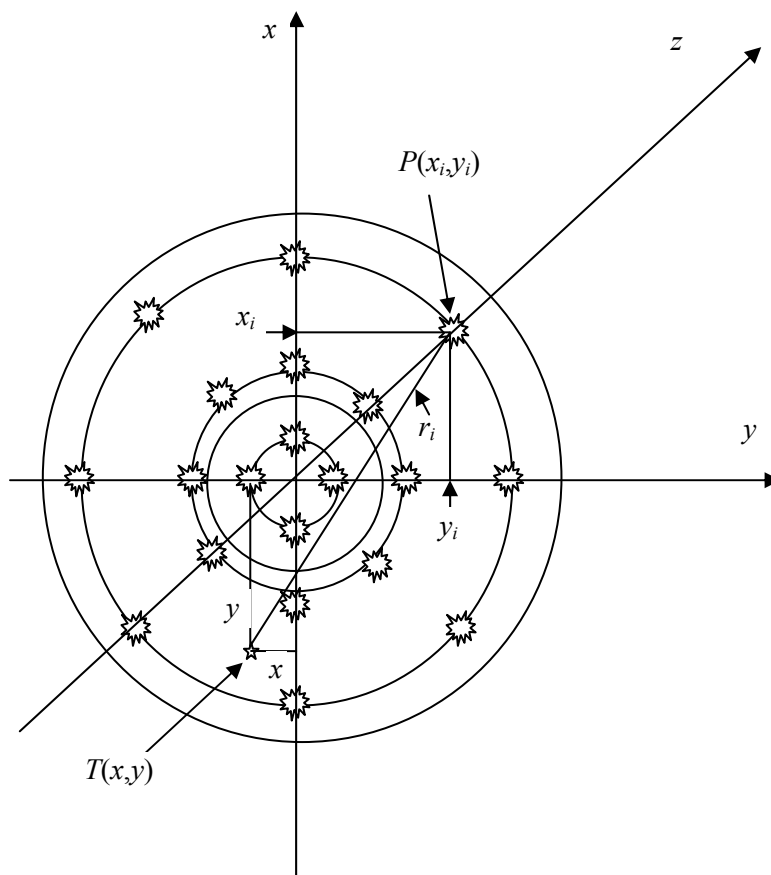



Рис. 3. Схематическое изображение  $n$  конвективных потоков, расположенных симметрично относительно центра некоторого круга

На рис. 3  – верхний конец источника (например свечи). Общее количество источников  $n - P_i(x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ;  $T(x, y)$  – произвольная точка на круглой подставке;  $R_i$  – расстояние от точки  $T$  до точки  $P_i$ .

Очевидно, что  $R_i = \sqrt{(y_i - y)^2 + (x_i - x)^2}$  и на основании формул (7), (8) получим выражения для скоростей конвективного потока, продуцированного  $i$ -м тепловым источником ( $i$ -й свечой)  $w_i$ :

$$w_i^3 = \frac{\alpha Q}{z} \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{R_i}{cz}\right)^2\right). \quad (11)$$

По правилу сложения кубов скоростей независимых конвективных потоков, скорость движения воздуха в произвольной точке сложного конвективного потока выражается формулой

$$w^3 = \sum_1^n w_i^3 = \frac{\alpha Q}{z} \sum_1^n \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{R_i}{cz}\right)^2\right). \quad (12)$$

Теперь можно записать общее уравнение для плотности сложного теплового потока в произвольной точке  $T(x, y)$ :

$$v^3 = \sum_1^n v_i^3 = \frac{\beta(2Q)^2}{z^5} \sum_1^n \exp\left(-\frac{3\sigma}{2} \cdot \left(\frac{R_i}{cz}\right)^2\right). \quad (13)$$

Использование уравнений (12), (13) при конкретных заданных параметрах тепловых источников позволило определить:

- координаты  $z$  – значения  $z_{\max}(w)$  и  $z_{\max}(v)$ , соответствующие максимальной скорости и максимальной плотности теплового потока;
  - значения  $w_{\max}$  и  $v_{\max}$  в сложном конвективном потоке;
  - значение  $R_{\max}$  в плоскостях  $z = z_{\max}(w)$  и  $z = z_{\max}(v)$ ,
- а также исследовать функцию  $R = R(w)$ , т.е. форму теплового потока.

#### Список литературы

1. Cheikh, N.B. Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below / N.B. Cheikh, B.B. Beya, T. Lili // International communications in heat and mass transfer. – 2007. – Vol. 34, № 3. – P. 369–379.
2. Kuznetsov, G.V. Conjugate natural convection in an enclosure with local heat sources / G.V. Kuznetsov, M. Sheremet // Computational Thermal Sciences: An International Journal. – 2009. – Vol. 1, № 3. – P. 341–360.
3. Sezai, I. Natural convection from a discrete heat source on the bottom of a horizontal enclosure / I. Sezai, A. Mohamad // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2000. – Vol. 43, № 13. – С. 2257–2266.
4. Turner, J. Buoyant plumes and thermals / J. Turner // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1969. – Vol. 1, № 1. – P. 29–44.
5. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

#### References

1. Cheikh, N.B. Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below / N.B. Cheikh, B.B. Beya, T. Lili // International communications in heat and mass transfer. – 2007. – Vol. 34, № 3. – P. 369–379.

2. Kuznetsov, G.V. Conjugate natural convection in an enclosure with local heat sources / G.V. Kuznetsov, M. Sheremet // *Computational Thermal Sciences: An International Journal*. – 2009. – Vol. 1, № 3. – P. 341–360.
3. Sezai, I. Natural convection from a discrete heat source on the bottom of a horizontal enclosure / I. Sezai, A. Mohamad // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – Vol. 43, № 13. – С. 2257–2266.
4. Turner, J. Buoyant plumes and thermals / J. Turner // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1969. – Vol. 1, № 1. – P. 29–44.
5. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in a room / I.A. Shepelev. – М.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.



УДК 698

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_81

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Аверкин Александр Григорьевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: tgv@pguas.ru

**Мишин Андрей Алексеевич**,  
студент  
E-mail: an.mishin299@gmail.com

**Мочалов Александр Вячеславович**,  
студент  
E-mail: alex.mo4alov2016@yandex.ru

*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

**Пономарева Инна Константиновна**,  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Информационное  
обеспечение управления и производства»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Eremkin Aleksander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Averkin Aleksander Grigorevich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the «Heat,  
Gas Supply and Ventilation»  
E-mail: tgv@pguas.ru

**Mishin Andrey Alekseevich**,  
Student  
E-mail: an.mishin299@gmail.com

**Mochalov Alexander Vyacheslavovich**,  
Student  
E-mail: alex.mo4alov2016@yandex.ru

*Penza State university*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 36-82-09

**Ponomareva Inna Konstantinovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Information Support  
Management and Production»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ САЖИ И КОПОТИ В ВОЗДУХЕ ЗАЛОВ БОГОСЛУЖЕНИЯ

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин, А.В. Мочалов

Разработана методика измерения массовой концентрации копоти и сажи при сжигании свечей и расчета воздухообмена для их ассимиляции в залах богослужения соборов, храмов и церквей с учетом имеющейся нормативной базы.

*Ключевые слова:* зал богослужения, свеча, пламя, продукты сгорания, копоть, сажа, воздухообмен

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES TO DETERMINE MASS CONCENTRATION OF SOOT IN THE AIR OF WORSHIP HALLS

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin, A.V. Mochalov

Method for measuring mass concentration of soot when burning candles and calculating the air exchange for their assimilation in the worship halls of cathedrals, temples and churches, taking into account the existing regulatory framework has been developed.

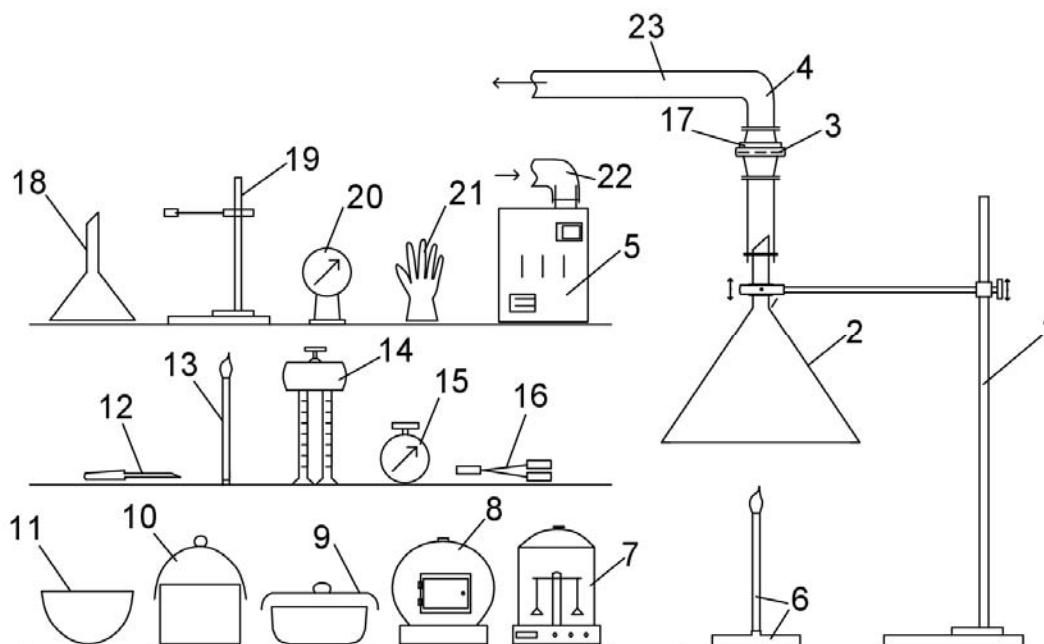
*Keywords:* worship hall, candle, flame, combustion products, soot, air exchange

В 2000 году в Государственном научно-исследовательском институте реставрации была выполнена НИР «Микроклимат церковных зданий (основы нормализации температурно-влажностного режима памятников культовой архитектуры)», которая была посвящена определению качественного и количественного состава веществ, образующихся при сгорании свечей и лампадного масла. В результате было установлено, что в объем зала богослужения поступают продукты сгорания в виде твердой фазы (сажа, копоть и смолянистые вещества), а также газообразные составляющие – углекислый газ, водяной пар, водород, кислород. Согласно полученным данным, в состав сажи входят технический углерод (сажа – до 80–95 %) и углеводородистые фракции. Практика показала, что на процесс загрязнения убранства существенно влияют температура и влажность на внутренних поверхностях стен и убранства культовых сооружений [1].

Для решения данной задачи авторами статьи разработана и апробирована методика измерения массовой концентрации копоти и сажи в воздухе с учетом требований ГОСТ Р ИСО 5725- 1- 2002.

Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие оборудование и материалы [10, 12]: штатив с держателем; стеклянная воронка; фильтр бумажный диаметром 50 мм по ГОСТ 33007-2014; бюкс; эксикатор по ГОСТ 25336, заполненный твердым осушителем; весы аналитические с пределами взвешиваний 200 – 0,00015 г по ГОСТ Р 53228-2008; свечи парафиновые различных номеров (20, 40, 80, 120, 140); психометр Ассмана; барометр-анероид МИ 2705-2013; секундомер; медицинские латексные перчатки; пинцет; аппарат для отбора проб воздуха «Воздух» (пробоотборник); сушильный шкаф лабораторный.

Авторами предлагается методика экспериментальных исследований, представленная на рисунке.



Экспериментальный стенд и оборудование для измерений массовой концентрации копоти и сажи при сжигании церковных свечей в храмах и соборах:

- 1, 19 – штатив; 2, 18 – стеклянная воронка; 3, 17 – фильтродержатель с бумажным фильтром; 4, 22, 23 – пластиковая трубка для соединения с воронкой, фильтром, пробоотборником; 5 – аппарат для отбора проб воздуха «Воздух» (пробоотборник); 6, 13 – свеча; 7 – аналитические весы; 8 – муфельная печь; 9 – эксикатор; 10 – бюкса; 11 – фарфоровая чашка; 12 – шпатель; 14 – психометр Ассмана; 15 – секундомер; 16 – пинцет; 20 – барометр; 21 – медицинские перчатки

В начале эксперимента готовятся бумажный фильтр и воронка. В процессе работы использовались медицинские латексные перчатки. Для определения массы бумажного фильтра его помещают в бюкс, который предварительно доводят до постоянного веса, затем бюкс с фильтром помещают в эксикатор на 30 минут и взвешивают на аналитических весах. После чего бумажный фильтр помещается в фильтродержатель пробоотборника, который закрепляют держателем на штативе на определенном расстоянии от нижней кромки воронки до горящих свечей и столешни подсвечника.

Выходной патрубок воронки с помощью пластиковой трубки соединяют с пробоотборником типа «Воздух». Воздух, загрязненный копотью и сажей, с помощью насоса, работающего со скоростью до 35 л/мин, прокачивается через бумажный фильтр пробоотборника. Для сбора загрязненного воздуха в низу стеклянной воронки устанавливают парафиновую свечу № 80. Предварительно свеча и воронка взвешиваются на аналитических весах. Затем свеча поджигается, и включаются насос пробоотборника и секундомер. Сажа и копоть, образующиеся при сжигании свечи, оседают на поверхности бумажного фильтра и воронки.

По окончании контрольного времени сжигание свечи прекращается, отключается насос пробоотборника, фильтр извлекают пинцетом и помещают в бюкс, который предварительно доводят до постоянного веса. Бюкс с фильтром и осаженными на нем компонентами копоти и сажи помещают в эксикатор, где выдерживают в течение 30 минут. Затем производится взвешивание бюкса с фильтром на аналитических весах для определения осажденных компонентов копоти и сажи. Далее воронка снимается с экспериментального стенда и с осажденными на внутренней поверхности сажей и копотью взвешивается на аналитических весах.

Расчет объемной концентрации в твердой фазе сажи и копоти в воздухе помещения  $C_2^v$ , мг/м<sup>3</sup>, образующихся при сжигании свечей в зале богослужения, производится по формулам:

$$C_2^v = \frac{m_{sv} + m_{sf}}{L \cdot \tau_s}; \quad (1)$$

$$m_{sv} = m_1 - m_v; \quad (2)$$

$$m_{sf} = m_2 - m_f; \quad (3)$$

здесь  $m_{sv}$  – масса сажи и копоти, осажденных на поверхности воронки, мг;  $m_{sf}$  – масса сажи и копоти, отфильтрованных на поверхности фильтра, мг;  $m_1$ ,  $m_v$  – соответственно масса воронки с сажей и копотью, осажденными на ее поверхности, и масса чистой воронки, мг;  $m_2$ ,  $m_f$  – соответственно масса фильтра с сажей и копотью, осажденными на его поверхности, и масса чистого фильтра, мг;  $L$  – объемный расход воздуха, прокачиваемый насосом через фильтр в воронке пробоотборника, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – скорость прокачиваемого воздуха через фильтр в пробоотборнике, м/с;  $F$  – площадь поперечного сечения «ножки» воронки, м<sup>2</sup>.

Определение удельного расхода массы сажи и копоти при сгорании одной свечи  $C_{ud}$ , мг/г, осуществляется по формуле

$$C_{ud} = \frac{m_{sv} + m_{sf}}{m_s}, \quad (4)$$

где  $m_s$  – масса свечи, г.

Показатель  $C_{ud}$  рассчитывается при сгорании парафиновых и восковых свечей для каждого номера свечи. Расчетный воздухообмен  $L_{ks}$ , м<sup>3</sup>/ч, для ассимиляции копоти и сажи в воздухе зала богослужения определяется по формуле

$$L_{ks} = \frac{G_{ks}}{C_{yx} - C_{pr}}, \quad (5)$$

где  $G_{ks}$  – количество сажи и копоти, выделяющихся в воздух зала богослужения при сжигании свечей, мг/м<sup>3</sup>;  $C_{yx}$  – концентрация сажи и копоти в удаляемом воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $C_{pr}$  – концентрация сажи и копоти в приточном наружном воздухе, мг/м<sup>3</sup> (согласно СанПиН 1.2.3685-21  $C_1 = 0,3$  ПДК, для сажи и копоти ПДК = 0,05 мг/м<sup>3</sup>).

Количество сажи и копоти, выделяющихся в зал богослужения при сжигании свечей, находим по формулам:

$$G_{ks} = \frac{C_{ud} \cdot \sum m_c}{\tau}, \quad (6)$$

где  $\tau$  – время горения свечей;

$$C_{yx} = \frac{C_{ud} \cdot \sum m_c}{V_v}; \quad (7)$$

здесь  $V_v$  – внутренний объем зала богослужения, м<sup>3</sup>.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по апробации разработанной методики представлены в таблице.

Приведенные в таблице данные позволяют рассчитать количество воздуха, необходимого для ассимиляции копоти и сажи, выделяющихся в зале богослужения при сжигании парафиновых свечей.

Экспериментальные и расчетные данные по определению количества копоти и сажи в твердой фазе при сгорании парафиновых свечей в зале богослужения

Номер свечи	Масса одной свечи, г	Высота одной свечи, см	Время горения одной свечи, мин	Масса сажи и копоти при сгорании одной свечи, мг	Расход воздуха через пробоотборник при сжигании одной свечи, м <sup>3</sup> /с	Объемная концентрация сажи и копоти в воздухе, мг/м <sup>3</sup>
20	20	30	84,6	$4,3970 \cdot 10^3$	$5,83 \cdot 10^{-4}$	2340,3
40	10	26	73,8	$2,1180 \cdot 10^3$	$5,83 \cdot 10^{-4}$	1165,5
80	5	18	51,4	$1,1094 \cdot 10^3$	$5,83 \cdot 10^{-4}$	616,68
120	3,3	15,5	45,1	$0,7220 \cdot 10^3$	$5,83 \cdot 10^{-4}$	398,7
140	2,86	15	40,9	$0,6310 \cdot 10^3$	$5,83 \cdot 10^{-4}$	347,4

Апробация разработанной методики представлена в виде примера расчета требуемого объема воздухообмена для ассимиляции копоти и сажи, выделяющихся в православных культовых сооружениях. Расчеты основаны на результатах теоретических и экспериментальных исследований, приведенных выше.

Исходные данные на примере храма размером 40×30×14 м:

- продолжительность богослужения – 1 час;
- количество сжигаемых парафиновых свечей (из расчета 10 подсвечников по 25 парафиновых свечей);
- количество прихожан – 250 чел. (одна свеча на одного человека);
- масса одной свечи 5,0401 г (номер свечи 80), то есть общее количество свечей равно 500 шт.

Р а с ч е т н ы е д а н н ы е .

Масса сажи и копоти, осажденных на поверхности воронки, рассчитывается по формуле (2):

$$m_{sv} = m_1 - m_2 = 34,8593 - 34,0943 = 0,7650 \text{ г.}$$

Масса сажи и копоти, осажденных на поверхности фильтра, вычисляется по формуле (3):

$$m_{sf} = m_2 - m_f = 0,3562 - 0,0118 = 0,3444 \text{ г.}$$

Объемную концентрацию сажи и копоти в воздухе храма находим по формуле (1):

$$C_2^v = \frac{m_{sv} + m_{sf}}{L \cdot \tau_s} = \frac{(0,765 + 0,3444) \cdot 10^3}{35 \cdot 10^{-3} \cdot 51,4} = 616,68 \text{ мг/м}^3,$$

где 35 л/мин – производительность пробоотборника по отсасываемому воздушному потоку (см. рисунок); 51,4 мин – продолжительность работы пробоотборника; 60 – переводной коэффициент с мин на сек.

Удельный расход массы сажи и копоти при сгорании одной парафиновой свечи определяем по формуле (4):

$$C_{ud} = \frac{m_{sv} + m_{sf}}{m_s} = \frac{(0,7650 + 0,3444) \cdot 10^3}{5,0401} = 220,1 \text{ мг/г},$$

где 5,0401 – масса сгоревшей свечи.

Количество сажи и копоти, выделяющихся в храме во время богослужения, рассчитывается по формуле (3):

$$G_{ks} = \frac{C_{ud} \cdot \sum m_s}{\tau_s} = \frac{220,1 \cdot 500 \cdot 5,0401}{1} = 554663 \text{ мг/ч.}$$

На основе полученных данных для расчета воздухообмена определяем концентрацию копоти и сажи в удаляемом воздухе по формуле (7):

$$C_{yx} = \frac{C_{ud} \cdot \sum m_s}{V_v} = \frac{220,1 \cdot 500 \cdot 5,0401}{40 \cdot 30 \cdot 14} = 33,02 \text{ мг/м}^3,$$

где 33,02 мг/м<sup>3</sup> – концентрация сажи и копоти в удаляемом воздухе.

Рассчитываем воздухообмен для ассимиляции копоти и сажи в зале богослужения по формуле (5):

$$L_{ks} = \frac{G_{ks}}{C_{yx} - C_{pr}} = \frac{554663}{33,02 - 0,3 \cdot 0,05} = 16805 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где 0,05 мг/м<sup>3</sup> – предельно допустимая концентрация углерода.

Для сравнительного анализа находим воздухообмен для ассимиляции углекислого газа (двуокиси углерода) для аналогичных исходных данных.

Количество углекислого газа, выделяющегося в помещении храма во время богослужения, рассчитывается по формуле (6):

$$G_{ks} = \frac{C_{CO_2} \cdot \sum m_s}{\tau_s} = \frac{16,47 \cdot 10^3 \cdot 500}{1} = 8235 \cdot 10^3 \text{ мг/ч},$$

где 16,47·10<sup>3</sup> мг/ч – количество углекислого газа, выделяющегося при сгорании одной парафиновой свечи.

При сгорании одной парафиновой свечи выделяется 9 л/ч углекислого газа или 9·10<sup>-3</sup>·1,83·10<sup>6</sup>=16,47·10<sup>3</sup> мг/ч (где 1,83 кг/м<sup>3</sup> – плотность углекислого газа при t=20 °С).

На основе полученных данных для расчета воздухообмена определяем концентрацию углекислого газа, выделяющегося в зале богослужения, по формуле (7):

$$C_{yx} = \frac{C_{ud} \cdot \sum m_s}{V_v} = \frac{8235 \cdot 10^3}{40 \cdot 30 \cdot 14} = 0,49 \cdot 10^3 \text{ мг/м}^3.$$

Необходимый воздухообмен для ассимиляции углекислого газа, выделяющегося в зале богослужения при сгорании свечей и от прихожан, рассчитывается по формуле (5):

$$L_{ks} = \frac{G_{ks}}{C_{yx} - C_{pr}} = \frac{8235 \cdot 10^3}{0,49 \cdot 10^3 - 0,3 \cdot 5} = 16858 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $0,49 \cdot 10^3 \text{ мг}/\text{м}^3$  – концентрация углекислого газа в удаляемом воздухе;  $5 \text{ мг}/\text{м}^3$  – предельно допустимая концентрация углекислого газа.

Из приведенного расчета следует, что вредности, выделяющиеся в храме во время богослужения в виде сажи и копоти, требуют обеспечить расчетный воздухообмен в объеме  $16805 \text{ м}^3/\text{ч}$ , практически такой же воздухообмен необходим для ассимиляции углекислого газа, который составляет  $16858 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Следовательно, проблема сохранения культурного наследия в залах богослужения остается актуальной, так как именно копоть и сажа совместно с углекислым газом наносят ощутимый ущерб убранству культового сооружения и здоровью прихожан.

Существующую проблему можно решить путем разработки местной вытяжной системы вентиляции за счет улавливания и удаления из помещения вышеуказанных вредностей.

### Список литературы

1. Микроклимат церковных зданий (основы нормализации ТВР памятников культовой архитектуры). – М.: ГосНИИР, 2000. – 125 с.
2. Щукина, Т.В. Влияние на микроклимат количества людей с разной заполняемостью храмов / Т.В. Щукина, Н.А. Драпалюк, М.Н. Шерлькина, М.А. Бойченко // СОК. – 2019. – № 11. – С. 66–69.
3. Беляевская, О. Как защитить храм от сажи / О. Беляевская, И. Фомин // Храмовоздатель. – 2013. – № 2. – С. 20–25.
4. Мачулин, Л. Золушка углеродного мира / Л. Мачулин // Наука и жизнь. – 2021. – № 1. – С. 40–47.
5. Еремкин, А.И. Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова, А.Г. Багдасарян // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 125–136.
6. Еремкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 161–168.
7. Михеева, Ю.Л. Результаты исследования температурно-влажностного режима Петропавловского собора г. Симферополь / Ю.Л. Михеева // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 7. – С. 46–51.
8. Беляевская, О. Копоть в храме / О. Беляевская, И. Фомин // Благоукраситель. – 2013. – № 39. – С. 30–35.
9. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
10. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – М., 2002.
11. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М., 2021.
12. Федеральный закон от 11.06.2008 N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902107146>.

### References

1. Microclimate of church buildings (the basis for the normalization of the TVR of monuments of religious architecture). – М.: GosNIIR, 2000. – 125 p.

2. Shchukina, T.V. Influence of people on the microclimate of temples with different occupancies / T.V. Shchukina, N.A. Drapalyuk, M.N. Sherlykina, M.A. Boychenko // SOK. – 2019. – No. 11. – P. 66–69.
3. Belyaevskaya, O. How to protect the temple from soot / O. Belyaevskaya, I. Fomin // Temple builder. – 2013. – No. 2. – P. 20–25.
4. Machulin, L. Cinderella of the carbon world / L. Machulin // Science and life. – 2021. – No. 1. – P. 40–47.
5. Eremkin, A.I. Ways to improve the quality of the microclimate in the worship hall of the Spassky Cathedral in Penza / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova, A.G. Bagdasaryan // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4. – P. 125–136.
6. Eremkin, A.I. Method for calculating the air exchange of a displacement air conditioning system in the worship halls of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 161–168.
7. Mikheeva, Yu.L. The results of the study of temperature and humidity regime of the Peter and Paul Cathedral in Simferopol / Yu.L. Mikheeva // Industrial and civil construction. – 2017. – No. 7. – P. 46–51.
8. Belyaevskaya, O. Soot in the temple / O. Belyaevskaya, I. Fomin // Decorator. – 2013. – No. 39. – P. 30–35.
9. Vargaftik, N.B. Handbook on thermophysical properties of gases and liquids / N.B. Vargaftik. – M.: Nauka, 1972. – 720 p.
10. GOST R ISO 5725-1-2002. Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. – M., 2002.
11. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. – M., 2021.
12. Federal Law of 11.06.2008 N 102-FZ «On Ensuring the Uniformity of Measurements». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902107146>

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 56-35-11

**Розен Андрей Евгеньевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Сварка, литейное  
производство и материаловедение»  
E-mail: aerozen@bk.ru

**Перельгин Юрий Петрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Химия»  
E-mail: pyp@pnzgu.ru

**Киреев Сергей Юрьевич,**  
доктор технических наук, декан факультета  
промышленных технологий,  
электроэнергетики и транспорта  
E-mail: sergey58\_79@mail.ru

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гришин Борис Михайлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Penza State University  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 56-35-11

**Rosen Andrey Evgenievich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Welding, Foundry and Materials  
Science»  
E-mail: aerozen@bk.ru

**Perelygin Yuriy Petrovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Chemistry»  
E-mail: pyp@pnzgu.ru

**Kireev Sergey Yurievich,**  
Doctor of Sciences, Dean of the Faculty of  
Industrial Technologies, Electric Power  
Engineering and Transport  
E-mail: sergey58\_79@mail.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Grishin Boris Mikhailovich,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department «Water Supply,  
Sewerage and Hydraulic Engineering»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

## МНОГОСЛОЙНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВОДОПРОВОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ОТ КОРРОЗИИ

А.Е. Розен, Ю.П. Перельгин, С.Ю. Киреев, Б.М. Гришин

Приведены данные исследований трехслойного материала с внутренним протектором для защиты металлических трубопроводов от коррозии. Показана схема развития коррозии в многослойном материале, контактирующем с агрессивной водной средой. Сделан детальный анализ работы различных слоев предлагаемого материала в условиях питтинговой коррозии. Экспериментально доказана высокая антикоррозионная эффективность трехслойного материала, который может быть использован для изготовления водопроводных труб, эксплуатируемых в условиях транспортировки воды с агрессивными свойствами.

*Ключевые слова:* металлические водопроводные трубы, коррозия, способы защиты от коррозии, трехслойный материал с внутренним протектором

## MULTI-LAYER MATERIAL FOR WATER METAL PIPES PROTECTING FROM CORROSION

A.E. Rosen, Yu.P. Perelygin, S.Yu. Kireev, B.M. Grishin

The data of studies of a three-layer material with an internal protector to protect metal pipelines from corrosion are presented. The scheme of corrosion development in a multilayer material in contact with an aggressive aqueous medium is shown. A detailed analysis of the work for various layers of the proposed material under conditions of pitting corrosion is made. The high anticorrosive efficiency of a three-layer material, which can be used for the manufacture of water pipes operated in conditions of water transportation with aggressive properties, has been experimentally proven.

*Keywords:* metal water pipes, corrosion, corrosion protection methods, three-layer material with inner protector



Металлические трубы достаточно широко используются в системах водоснабжения, однако при эксплуатации таких труб неизбежно возникают проблемы, связанные с коррозией. Коррозия стальных труб значительно сокращает срок их службы, кроме того, приводит к огромным потерям металла. Коррозия металлических труб является причиной аварий и утечек воды на водопроводных сетях, из-за неё происходит увеличение шероховатости внутренней поверхности труб, сопровождающееся возникновением дополнительного гидравлического сопротивления и повышением затрат на транспортировку воды потребителям. В связи с этим вопросы борьбы с коррозией являются весьма актуальными при эксплуатации сетей водоснабжения, в которых используются трубы из различных металлов.

От коррозии металла страдают как внутренние, так и внешние поверхности труб. Внешняя коррозия возникает вследствие соприкосновения наружных стенок труб с почвой. Растворы солей, содержащихся в почве, являются электролитами, поэтому при длительном воздействии они разрушают структуру металла. Внутренняя коррозия возникает от коррозионных свойств воды, транспортируемой по металлическим трубам. Вода с низкими значениями pH и высоким содержанием кислорода, хлоридов, сульфатов и углекислоты вызывает интенсивную коррозию внутренних поверхностей трубопроводов. Внутренняя коррозия также может быть вызвана деятельностью анаэробных микроорганизмов, которые закрепляются на стенках металлических труб в виде биоплёнки [1, 2].

Одним из наиболее опасных видов коррозионного разрушения является питтинговая коррозия, которая наблюдается у металлических труб в результате образования сквозных пор [3]. Питтинговой коррозии подвержены многие стали и сплавы. Она характерна для пассивирующихся материалов: нержавеющей сталей, сплавов титана, алюминия. Питтинг развивается вследствие неоднородности химического состава металла или сплава, шероховатости поверхности, структурных несовершенств и неметаллических включений. Выделяют два необходимых условия образования питтинга – смещение электрохимического потенциала металла положительнее некоторого критического значения и наличие окислителей и активирующих ионов.

Известны следующие способы защиты от питтинговой коррозии металлических труб: добавление ингибиторов коррозии в реакционную среду, покрытие цинком или эмалью, применение сталей и сплавов, легированных хромом и молибденом, в том числе с пониженным содержанием серы, электрохимическая защита, при которой искусственно создается пассивное состояние поверхности металла, нанесение защитных покрытий из битума, полиэтилена или полиуретана на внешние поверхности труб. Все эти способы имеют ограничения к применению и не всегда обеспечивают требуемую защиту в течение необходимого времени эксплуатации трубопроводов, что может создавать экологическую опасность.

В [4] предложен и запатентован способ защиты от питтинговой коррозии, названный авторами патента принципом «протекторной питтинг-защиты». Сущность предложенного способа состоит в том, что вместо монометалла или биметалла используют многослойный материал, который имеет по крайней мере три слоя. Многослойный композит может быть приспособлен для одностороннего или двустороннего контакта с агрессивной водной средой или средами, имеющими различный состав. Состав слоев многослойного материала выбирают в зависимости от состава водной среды и электрохимических потенциалов металлов, составляющих слои. Принципиально новым является то, что протектор располагается между защищаемыми слоями.

Материалы, содержащие два или более слоя различного состава, могут быть получены по различным технологиям. К ним относят литейное плакирование, горячую пакетную прокатку, холодное плакирование, сварку взрывом, наплавку [5]. Одним из самых распространенных и высокоэффективных промышленных способов производства многослойных материалов является сварка взрывом, которая и использовалась в нашем случае для изготовления образцов.

В качестве материала первого (наружного) слоя, контактирующего с рабочей средой, выбирается такой материал, который имеет достаточно высокую коррозионную стой-

кость и проявляет пассивность в эксплуатационной среде. В результате действия среды в наружном слое возникают очаги поражения в виде питтинга, которые с течением времени увеличивают глубину и достигают второго слоя. Материал второго слоя выбирается таким образом, чтобы величина его стационарного электрохимического потенциала в условиях контакта с рабочей средой была меньше стационарного электрохимического потенциала металла первого слоя. При достижении питтингом металла второго слоя последний становится анодом, а металл первого слоя – катодом, т.е. второй слой становится протектором и постепенно растворяется, предотвращая при этом растворение металла первого слоя.

Состав третьего слоя аналогичен составу первого. Когда глубина полости в протекторе оказывается равной его толщине, третий слой также становится катодом, как и первый. На рис. 1 показана схема развития коррозии в многослойном материале в водной среде, содержащей водные растворы щелочей, солей или кислот.

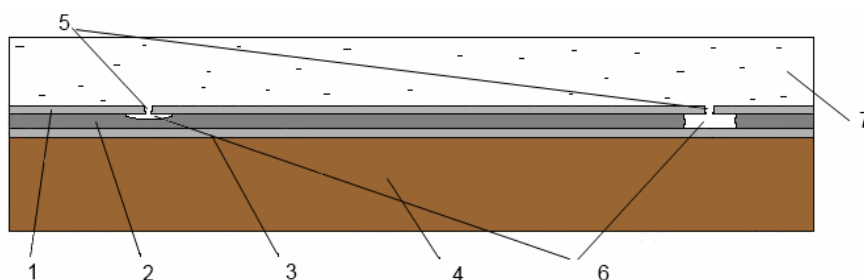


Рис. 1. Схема развития коррозии в многослойном материале в агрессивной водной среде:  
1 – наружный слой, контактирующий с рабочей средой; 2 – протектор; 3 – третий слой;  
4 – несущий слой; 5 – питтинги в наружном слое; 6 – линзы в протекторе; 7 – водная среда

Если продуктами реакции являются нерастворимые вещества, они могут зашлаковать отдельные питтинги и тем самым снижать скорость коррозионного разрушения трехслойного материала в целом.

Поскольку малоуглеродистые стали Ст3, 10, 15, 20 имеют более отрицательный потенциал по сравнению с потенциалом высоколегированных сталей 12Х17, 12Х18Н9, 10Х17Н13М2Т, то эти стали могут быть использованы в качестве протектора (второго слоя) в сочетании с высоколегированными коррозионно-стойкими сталями (первого или третьего слоя) для сред, содержащих водные растворы щелочей, солей или кислот.

Испытания трехслойных образцов 08Х18Н10Т + Ст3 + 08Х18Н10Т проводили путем погружения в 6 %-й раствор  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  с выдержкой в течение 1900 ч при комнатной температуре с периодической заменой раствора через каждые 160...180 ч. Аналогичные испытания образцов 08Х18Н10Т + Ст10 + 08Х18Н10Т проводили в растворе хлорида натрия (0,1 моль/л) при выдержке в течение 4100 ч.

После извлечения из раствора образцы были разрезаны по центру искусственно созданного питтинга. Как видно из рис. 2, за счет анодного растворения в протекторе образовалась полость. Граница растворения проходит в месте контакта первого слоя с протектором.

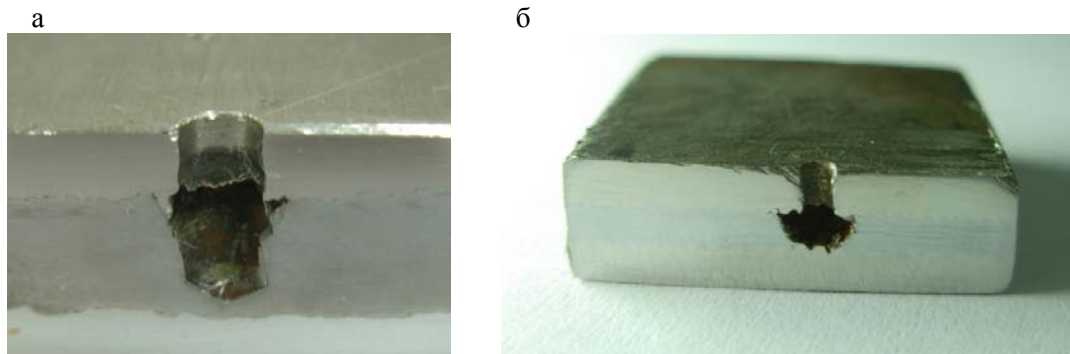


Рис. 2. Образцы материала после испытаний:  
а – в растворе  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; б – в растворе  $\text{NaCl}$

Анализ результатов эксперимента свидетельствует о высокой эффективности данного способа коррозионной защиты. Массовый показатель коррозии  $K_m^-$  стали 08X18H10T снижается в условиях контакта со сталью Ст3 более чем в 21 раз, в то время как для стали Ст3 происходит увеличение  $K_m^-$  в 2,5 раза. Соотношение площадей образцов сталей 08X18H10T и Ст3 составило примерно 7:1.

Предлагаемый трехслойный материал с внутренним протектором может быть использован для изготовления металлических труб, применяемых в системах холодного и горячего водоснабжения жилых, общественных и производственных зданий (рис. 3).



Рис. 3. Трубопровод, изготовленный из трехслойного материала с внутренним протектором

Сварка трубопроводов из данного материала может производиться по технологии, изложенной в [6].

#### **Выводы.**

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность предлагаемого трехслойного материала с внутренним протектором, обладающего высокой коррозионной стойкостью в различных условиях при контакте с агрессивными водными средами.

2. Трубопроводы, изготовленные из трехслойного материала, могут быть использованы в системах холодного и горячего водоснабжения жилых, общественных и производственных зданий.

#### Список литературы

1. Pizarro, G. Biocorrosion in drinking water pipes / G. Pizarro, I.T. Vargas // *Water Supply*. – 2016. – №16(4). – P. 881–887.
2. Wang, H. Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system / H. Wang, C. Hu, X. Hu, M. Yang, J. Qu // *Water Research*. – 2012. – Vol.46, iss.4. – P.1070–1078.
3. Enkuahone, A.A. Study of iron pipe corrosion in municipal water distribution sistem and its effect / A.A. Enkuahone // *American Journal of Chemical Engineering*. – 2018. – №6(2). – P.19–24.
4. Евразийский патент № 016878 ЕАПВ. С23F 13/06, В 32В 7/02. Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения / Розен А.Е., Лось И.С., Перельгин Ю.П., Первухин Л.Б., Гордополов Ю.А., Кирий Г.В., Абрамов П.И., Усатый С.Г., Крюков Д.Б., Первухина О.Л., Денисов И.В., Розен А.А. – Выдан 30.06.2012; приоритет от 26.09.2008.
5. Производство слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев [и др.]. – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 496 с.
6. Корольков, А.О. Физико-химические особенности дуговых способов сварки слоистых металлических материалов с внутренним протектором / А.О. Корольков, Е.Г. Исаков, А.Е. Розен // Сб. тез. докл. IX Межвузовской конференции-конкурса (с международным участием) научных работ студентов имени члена-корреспондента АН СССР А.А. Яковкина (18 ноября 2020 года). – СПб.: Типография «НОВЫТХИМ», 2020. – С. 34–37.

1. Pizarro, G. Biocorrosion in drinking water pipes / G. Pizarro, I.T. Vargas // *Water Supply*. – 2016. – №16(4). – P. 881–887.
2. Wang, H. Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system / H. Wang, C. Hu, X. Hu, M. Yang, J. Qu // *Water Research*. – 2012. – Vol.46, iss.4. – P.1070–1078.
3. Enkuahone, A.A. Study of iron pipe corrosion in municipal water distribution system and its effect / A.A. Enkuahone // *American Journal of Chemical Engineering*. – 2018. – №6(2). – P.19–24.
4. Eurasian patent No.016878 EAPO. C23F 13/06 B 32B 7/02. Multilayer material with increased corrosion resistance (options) and methods for its production / Rosen A.E., Los I.S., Perelygin Yu.P., Pervukhin L.B., Gordopolov Yu.A., Kiriy G.V., Abramov P.I., Usatii S.G., Kryukov D.B., Pervukhin O.L., Denidov I.V., Rosen A.A. – Issued on June 30, 2012; priority from 26.09.2008.
5. Production of laminated composite materials / A.G. Kobelev [and others]. – M.: Interment Engineering, 2002. – 496 p.
6. Korolkov, A.O. Physicochemical features of the methods of welding layered metal materials with an internal protector / A.O. Korolkov, E.G. Isakov, A.S. Rosen // Thesis IX Interuniversity Conference-Competition (with international participation) of scientific works of students named after Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences A.A. Yakovkina, November 18, 2020. – SPb.: Printing house «NOVBYTHIM», 2020. – P. 34–37.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_93

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Андреев Сергей Юрьевич,**

доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»

E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Шиляев Александр Михайлович,**

студент  
E-mail: xfaktor2014@gmail.com

*Самарский государственный технический университет*

Россия, 443100, Самара  
Ул. Молодогвардейская, 244,  
главный корпус  
тел.: +7-8462-78-43-11

**Степанов Сергей Валерьевич,**

доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение  
и водоотведение»

E-mail: stepanovsv3@yandex.ru

*Акционерное общество «Научно-  
производственное предприятие "Рубин"»*

Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,  
тел.: +7-8412-20-48-08

**Князев Владимир Александрович,**

кандидат технических наук,  
инженер 1-й категории

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Andreev Sergey Yuryevich,**

Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»

E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Shilyaev Alexander Mikhailovich,**

Student  
E-mail: xfaktor2014@gmail.com

*Samara State Technical University*

Russia, 443100, Samara, 244,  
Molodogvardeyskaya St., main building  
tel.: +7-8462-78-43-11

**Stepanov Sergei Valerievich,**

Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water Supply and Sewerage  
Engineering»

E-mail: stepanovsv3@yandex.ru

*Joint Stock Company «Research And  
Production Enterprise Rubin»*

Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,  
tel.: + 7-8412-20-48-08

**Knyazev Vladimir Aleksandrovich,**

Candidate of Sciences,  
1st Category Engineer

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ВТОРИЧНОГО ВВЕДЕНИЯ ВО ФЛОТАЦИОННЫЙ ОБЪЕМ КРУПНОДИСПЕРСНОЙ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

С.Ю. Андреев, С.В. Степанов, В.А. Князев, А.М. Шиляев

Приведены результаты теоретических исследований возможности использования технологического приема вторичного введения во флотационный объем крупнодисперсной водовоздушной смеси, содержащей пузырьки воздуха размером  $d_{п} = 100-300$  мкм, всплывающие в ламинарном режиме, для интенсификации процесса напорной флотационной очистки сточных вод. Показано, что мелкодисперсные пузырьки воздуха диаметром  $d_{п} = 20-50$  мкм, образующиеся при напорной флотации, позволяют эффективно формировать флотокомплексы с гидрофобными дисперсными частицами загрязнений сточных вод, которые имеют незначительную скорость всплывания, в результате чего увеличивается продолжительность их нахождения во флотационном объеме, повышается вероятность разрушения флотокомплексов и снижается эффективность флотационной очистки. Разработана новая технология напорной флотационной очистки сточных вод, позволяющая за счет использования технологического приема

вторичного введения во флотационной объем водовоздушной смеси, содержащей пузырьки воздуха размером  $\bar{d}_п = 100-300$  мкм, обладающие увеличенной гидравлической крупностью и всплывающие в ламинарном режиме, существенно повысить эффективность процесса флотационной очистки.

*Ключевые слова:* напорная флотация, водовоздушная смесь, флотокомплекс, флотационный объем, скорость всплывания, циркуляционная установка

## INTENSIFICATION OF PRESSURED FLOTATION WASTEWATER TREATMENT DUE TO THE SECONDARY INTRODUCTION OF A COARSE WATER-AIR MIXTURE IN THE FLOTATION VOLUME

S.Yu. Andreev, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev, A.M. Shilyaev

The results of theoretical studies of the possibility of using the technological method of secondary introduction into the flotation volume of a coarse water-air mixture containing air bubbles of size  $d_p = 100-300$  mkm, floating up in a laminar mode, to intensify the process of pressure flotation wastewater treatment are presented. It is shown that finely dispersed air bubbles with a diameter  $d_p = 20-50$  mkm formed during pressure flotation make it possible to effectively form flotation complexes with hydrophobic dispersed particles of sewage pollution, which have an insignificant floating rate, as a result of which the residence time in the flotation volume increases, the probability of destruction of flotation complexes increases and the efficiency of flotation cleaning decreases. A new technology of pressure flotation wastewater treatment has been developed, which makes it possible to significantly increase the efficiency of the flotation treatment process through the use of a technological method of re-introducing a water-air mixture into the flotation volume containing air bubbles of size  $\bar{d}_p = 100-300$  mkm, which have an increased hydraulic fineness and float in a laminar mode.

*Keywords:* pressure flotation, water-air mixture, flotation complex, flotation volume, float rate, circulating plant

В настоящее время в технологических процессах очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод широкое распространение получили методы флотационного удаления содержащихся в сточных водах загрязнений. Флотационные методы очистки отличаются универсальностью и могут быть использованы для удаления загрязняющих веществ, находящихся в различных фазово-дисперсных состояниях. Высокую эффективность флотационный метод очистки показывает при удалении из сточных вод мелкодисперсных загрязнений, имеющих гидрофобную поверхность.

Процесс флотационного удаления из сточных вод мелкодисперсных частиц загрязнений происходит в результате их молекулярного прилипания к поверхности раздела фаз «вода – воздух», обусловленного наличием избыточной свободной энергии на внешней поверхности пузырька воздуха.

Дисперсная частица загрязнений закрепляется на поверхности пузырька воздуха в водной среде в результате их физико-химического взаимодействия на линии соприкосновения частицы воды и воздуха, определяемого явлениями смачивания.

В отличие от метода гравитационного выделения из сточных вод дисперсных частиц загрязнений эффективность флотационного метода очистки определяется величиной гидравлической крупности образующихся флотокомплексов «дисперсная частица – пузырек воздуха», и она мало зависит от седиментационных свойств отделяемых дисперсных частиц, что позволяет существенно интенсифицировать процесс очистки сточных вод.

Теоретические основы термодинамического описания процесса флотационного захвата дисперсной частицы поверхностью всплывающего во флотационном объеме пузырька воздуха были созданы Б.В. Дерягиным и представителями его научной школы. В основу термодинамического описания процесса образования флотокомплекс-

са были положены представления об уменьшении величины свободной поверхностной энергии при слиянии дисперсной частицы с пузырьком воздуха.

Описание кинетических закономерностей процесса флотационного удаления из сточных вод дисперсных частиц было сделано в работах [1, 2].

Процесс флотационного удаления из сточных вод загрязняющих дисперсных частиц можно разделить на три основные стадии:

1. Стадия слипания всплывающего во флотационном объеме пузырька воздуха с загрязняющей дисперсной частицей и образования флотокомплекса «дисперсная частица – пузырек воздуха».

2. Стадия всплытия образовавшегося флотокомплекса на поверхность флотационного объема.

3. Стадия формирования на поверхности флотационного объема пенного слоя, содержащего в себе удаляемые из сточных вод дисперсные частицы.

Математическое описание кинетики процесса флотационного удаления из сточных вод загрязняющих дисперсных частиц было разработано Б.С. Ксенофоновым. В основу математического описания было положено предположение о том, что в процессе флотационной очистки происходит переход дисперсных частиц из их исходного состояния (состояния  $A$ ) в состояние образовавшихся флотокомплексов «дисперсная частица – пузырек воздуха» (состояние  $B$ ), которые, всплывая, накапливаются на поверхности флотационного объема и переходят в состояние пенного слоя (состояние  $C$ ).

В состояниях  $A$ ,  $B$  и  $C$  концентрации дисперсных частиц, находящихся в виде взвешенных частиц, флотокомплексов «дисперсная частица – пузырек воздуха», пенного слоя, будут иметь значения  $C_A$ ;  $C_B$ ;  $C_C$ , кг/(м<sup>3</sup>·с).

Величины удельных скоростей изменения концентраций дисперсных частиц  $\frac{dC_A}{dt}$ ;  $\frac{dC_B}{dt}$ ;  $\frac{dC_C}{dt}$ , кг/м<sup>3</sup>, находящихся в виде взвешенных частиц, флотокомплексов и пенного слоя, могут быть описаны системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -K_1 C_A + K_2 \cdot C_B - K_5 \cdot C_A + K_6 \cdot C_C, \\ \frac{dC_B}{dt} = K_1 C_A - K_2 \cdot C_B - K_3 \cdot C_B + K_4 \cdot C_B, \\ \frac{dC_C}{dt} = K_3 C_B - K_4 \cdot C_C - K_5 \cdot C_C + K_6 \cdot C_A, \end{cases} \quad (1)$$

где  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  – коэффициенты скорости перехода соответственно из состояния  $A$  в состояние  $B$ ; из состояния  $B$  в состояние  $A$ ; из состояния  $B$  в состояние  $C$ ; из состояния  $C$  в состояние  $B$ ; из состояния  $C$  в состояние  $A$ ; из состояния  $A$  в состояние  $C$ , с<sup>-1</sup>.

Система уравнений (1) предполагает, что на каждой стадии процесса флотации возможны как прямые, так и обратные переходы.

Величина коэффициента скорости перехода дисперсной частицы из состояния взвешенного вещества в состояние флотокомплекса  $K_1$  может быть определена по формуле, приведенной в диссертационной работе Н.Н. Рулева:

$$K_1 = \frac{3}{2} \frac{q_b \cdot E}{d_{\Pi}}, \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где  $q_b$  – расход воздуха, проходящего в единицу времени через единицу площади поперечного сечения флотационного объема, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $d_{\Pi}$  – средняя величина диаметров пузырьков воздуха, м;  $E$  – коэффициент эффективности захвата дисперсной частицы поверхностью всплывающего пузырька воздуха.

Как пузырьки воздуха водовоздушной смеси во флотационном объеме, так и дисперсные частицы загрязнений имеют некоторый диапазон изменения их линейных размеров (диаметров  $d_{\Pi}$  и  $d_r$ ). Поскольку распределение размеров пузырьков воздуха и дисперсных частиц загрязнений в реальных полидисперсных процессах флотации близко к нормальному, то в качестве линейных размеров принято использовать среднеарифметические величины диаметров  $\bar{d}_{\Pi}$  и  $\bar{d}_r$ , м.

В соответствии с рекомендациями Н.Н. Рулева величина коэффициента эффективности захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха, всплывающим в стоксовском режиме, может быть определена по формуле (3), а пузырьком воздуха, всплывающим в режиме, отличном от стоксовского режима, – по формуле (4):

$$E = \frac{3}{2} \left( \frac{\bar{d}_r}{\bar{d}_{\Pi}} \right)^2; \quad (3)$$

$$E = 3 \frac{\bar{d}_r}{\bar{d}_{\Pi}}. \quad (4)$$

Величина константы  $K_2$ , характеризующей переход дисперсной частицы из состояния флотокомплекса в состояние свободной взвешенной частицы, зависит от прочности образовавшегося флотокомплекса и величины концентрации флотокомплексов  $C_B$ , кг/м<sup>3</sup>, во флотационном объеме, а также от средней продолжительности пребывания флотокомплексов во флотационном объеме  $\bar{T}_{\Phi}$  и степени турбулентности флотационного объема.

Величина средней продолжительности пребывания флотокомплексов во флотационном объеме может быть определена по формуле

$$\bar{T}_{\Phi} = \frac{H_{\Phi}}{\bar{v}_{\Phi}}, \text{ с}, \quad (5)$$

где  $H_{\Phi}$  – глубина флотационного объема, м;  $\bar{v}_{\Phi}$  – величина средней скорости всплывания флотокомплексов во флотационном объеме, м/с.

Величину константы  $K_3$ , характеризующей скорость перехода флотокомплекса в пенный слой, можно рассчитать по формуле

$$K_3 = K_3 \frac{1}{\bar{T}_{\Phi}} = K_3 \frac{\bar{v}_{\Pi}}{H_{\Phi}}, \text{ с}^{-1}, \quad (6)$$

где  $K_3$  – эмпирический коэффициент.

Величина константы  $K_2$ , характеризующей переход дисперсной частицы из состояния флотокомплекса в состояние свободной взвешенной частицы, в значительной мере зависит от степени турбулентности флотационного объема, которая определяется режимом всплывания пузырьков воздуха во флотационном объеме.

Наиболее интенсивно процесс разрушения образовавшихся флотокомплексов протекает при турбулентном режиме всплывания пузырьков воздуха во флотационном объеме.

В соответствии с представлениями Кэмпса степень турбулентности флотационного объема зависит от величины градиента пульсационной составляющей скорости в пристеночном слое всплывающего пузырька воздуха, которая может быть определена для турбулентного режима всплывания пузырька по формуле

$$G_* = \frac{gd_{\Pi}}{6\nu} \frac{\rho - \rho_B}{\rho}, \text{ с}^{-1}, \quad (7)$$



где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематический коэффициент вязкости;  $\rho$  и  $\rho_{\text{в}}$  – соответственно плотность воды и воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Пузырек воздуха диаметром  $d_{\text{п}} = 0,0015 \text{ м}$ , всплывающий в воде со скоростью  $v_{\text{п}} = 0,34 \text{ м/с}$  в турбулентном режиме, в соответствии с формулой (7) будет иметь величину градиента пульсационной составляющей скорости в пристеночном слое, равную:

$$G_* = \frac{9,8 \cdot 0,0015}{6 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}} \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 2423 \text{ с}^{-1}, \quad (8)$$

при этом касательное напряжение сил вязкого трения в пристеночном слое всплывающего пузырька будет иметь величину

$$\tau_* = 2,5 \rho \nu G_* = 2,5 \cdot 998,2 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6} \cdot 2423 = 6,1 \text{ н/м}^2, \quad (9)$$

что приведет к интенсивному разрушению образовавшихся флотокомплексов.

Существенно повысить эффект флотационной очистки сточных вод при условии низкой прочности образующихся флотокомплексов позволит технологический прием использования водовоздушных смесей, содержащих пузырьки воздуха, всплывающие в ламинарном режиме и турбулизирующие флотационный объем в гораздо меньшей степени, чем пузырьки воздуха, всплывающие в турбулентном режиме.

Режим всплывания одиночного пузырька воздуха в воде характеризуется величиной критерия Рейнольдса, определяемой по формуле

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{п}} d_{\text{п}}}{\nu}. \quad (10)$$

В работе (Дерягин Б.В. Кинетическая теория флотационного процесса // Успехи химии. – 1982. – Т.51. – С.92–118) приводятся сведения о том, что ламинарный режим всплывания одиночного пузырька воздуха в воде сохраняется до величины критерия Рейнольдса  $\text{Re}=20$ .

Верхнюю границу размера пузырька воздуха, всплывающего в воде в ламинарном режиме, можно определить, используя формулу Стокса:

$$v_{\text{п}} = \frac{1}{18} \frac{g d_{\text{п}}^2}{\nu} \frac{\rho - \rho_{\text{в}}}{\rho}, \text{ м/с}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (10), получим:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{п}} d_{\text{п}}}{\nu} = \frac{d_{\text{п}}}{\nu} \frac{1}{18} \frac{g d_{\text{п}}^2}{\nu} \frac{\rho - \rho_{\text{в}}}{\rho} = \frac{g d_{\text{п}}^3}{18 \nu^2} \frac{\rho - \rho_{\text{в}}}{\rho} = 20. \quad (12)$$

Откуда

$$d_{\text{п}}^3 = \sqrt{\frac{18 \cdot 20 \nu^2}{g} \frac{\rho}{\rho - \rho_{\text{в}}}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 20 (1,01 \cdot 10^{-6})^2}{9,8} \frac{998,2}{998,2 - 1,2}} = 0,00034 \text{ м} \approx 300 \text{ мкм}. \quad (13)$$

В практике очистки сточных вод в настоящее время широкое распространение получил метод напорной (компрессионной) флотации.

Процесс напорной флотации, предусматривающий выделение воздуха из перенасыщенного раствора, позволяет получить пузырьки воздуха размером  $\bar{d}_{\text{п}} = 20\text{--}50 \text{ мкм}$ . При напорной флотационной очистке сточных вод, как правило, используются две основные технологические схемы.

Первая схема (прямоточная) предусматривает насыщение всего потока очищаемых сточных вод воздухом при избыточном давлении в емкостном сооружении, называемом «сатуратор», с последующим сбросом повышенного давления в дросселирующем устройстве и подачей образовавшейся водовоздушной смеси во флотационный объем.

Вторая схема (циркуляционная) предусматривает забор части очищенных сточных вод и насыщение циркуляционного потока воздухом под избыточным давлением в сатураторе, сброс повышенного давления с последующим смешением образовавшейся водовоздушной смеси с основным потоком очищаемых сточных вод и их подачу во флотационный объем.

Мелкодисперсная водовоздушная смесь, содержащая пузырьки воздуха, имеющие средний диаметр  $\bar{d}_{\Pi} = 20-50$  мкм, получаемая в процессах напорной флотации, позволяет эффективно образовывать флотокомплексы с дисперсными частицами загрязнений сточных вод, имеющих гидрофобную поверхность, однако вторая стадия процесса флотации, предусматривающая всплывание образовавшихся флотокомплексов на поверхность флотационного объема, при этом является чрезвычайно медленным процессом, что увеличивает продолжительность нахождения образовавшихся флотокомплексов во флотационном объеме, вследствие чего повышается вероятность их разрушения и снижается эффективность процесса флотации.

Увеличить скорость всплывания образовавшихся флотокомплексов и за счет этого существенно повысить эффективность процесса флотационной очистки можно за счет использования технологического приема вторичного насыщения флотационного объема пузырьками воздуха, имеющими размер  $\bar{d}_{\Pi} = 100-300$  мкм.

Пузырьки воздуха, имеющие средний диаметр  $\bar{d}_{\Pi} = 100-300$  мкм, так же, как и пузырьки воздуха диаметром  $\bar{d}_{\Pi} = 20-50$  мкм, всплывают в ламинарном режиме и незначительно турбулизируют флотационный объем, но при этом величина скорости их всплывания в 25–36 раз больше, чем у мелкодисперсных пузырьков, получаемых в процессе напорной флотации.

В отличие от пузырьков воздуха, всплывающих в ламинарном режиме, пузырьки воздуха, всплывающие в турбулентном режиме, не движутся по прямолинейной траектории. Траектория их движения имеет вид сплюсненной эллиптической спирали с тенденцией к увеличению диаметра ее витка по мере всплывания пузырьков воздуха. Спиралевидная траектория пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентном режиме, существенно турбулизирует водовоздушную смесь во флотационном объеме, что приводит к интенсивному разрушению образовавшихся флотокомплексов.

Исследования профессора Б.С. Ксенофонтова показали, что при вторичном введении во флотационный объем пузырьков воздуха, имеющих увеличенные размеры, наблюдается интенсивный процесс слипания (коалесценции) мелких пузырьков, входящих в состав образовавшихся флотокомплексов, с поверхностью вторично добавляемых пузырьков, что приводит к существенному увеличению гидравлической крупности всплывающих флотокомплексов, за счет чего повышается эффект флотационной очистки сточных вод.

Учеными Пензенского государственного университета архитектуры и строительства совместно со специалистами ГК «ЭкоЛос» (г.Самара) была разработана технология напорной флотационной очистки сточных вод, предусматривающая вторичное введение во флотационный объем пузырьков воздуха увеличенного размера, всплывающих в ламинарном режиме (см. рисунок).

Напорная флотационная установка имеет корпус 1, разделенный наклонной перегородкой на две зоны: зону флотационной очистки 4 с использованием тонкодисперсной водовоздушной смеси ( $\bar{d}_{\Pi} = 20-50$  мкм) и зону флотационной очистки 5 с использованием крупнодисперсной водовоздушной смеси ( $\bar{d}_{\Pi} = 100-300$  мкм).

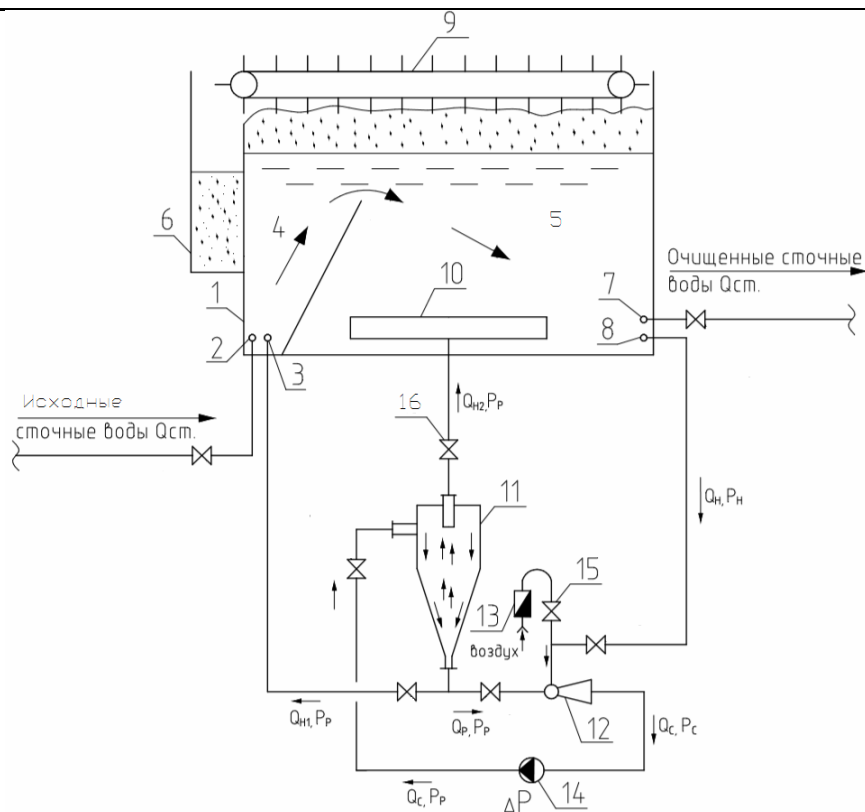


Схема напорной флотационной очистки сточных вод с вторичным введением во флотационный объем пузырьков воздуха увеличенного размера, всплывающих в ламинарном режиме

Сточные воды подаются в трубчатую распределительную систему неочищенных сточных вод 2, откуда они поступают в зону флотационной очистки 4, где происходит смешивание сточных вод с тонкодисперсной водовоздушной смесью, образующейся на выходе из трубчатой распределительной системы рециркуляционного потока 3.

Восходящий поток очищаемых сточных вод, содержащий флотокомплексы, образованные дисперсными частицами загрязнений и пузырьками воздуха размерами  $\bar{d}_{П} = 20-50$  мкм, проходя через верхнюю кромку наклонной перегородки, разделяющей флотационные зоны 4 и 5, изменяет направление своего движения и отводится из флотатора через трубчатую систему очищенных сточных вод 7.

Во флотационной зоне 5 протекает интенсивное образование флотокомплексов, обладающих повышенной гидравлической крупностью, за счет слипания (коалесценции) поверхностей мелкодисперсных пузырьков воздуха, входящих в состав образовавшихся в зоне 4 флотокомплексов с поверхностью крупнодисперсных пузырьков воздуха, имеющих размеры  $\bar{d}_{П} = 100-300$  мкм, формирующихся на выходе из трубчатой распределительной системы потока водовоздушной смеси.

В результате всплывания образующихся во флотационной зоне 5 флотокомплексов, имеющих повышенную гидравлическую крупность на поверхности флотационного объема, образуется пенный слой, который механизмом для сгребания пены 9 сгружается в пенный карман 6.

Перекачивание рециркуляционного потока очищенных сточных вод из сборной трубчатой системы 8 в распределительную трубчатую систему 3 производится циркуляционной установкой, включающей в себя лопастной циркуляционный насос 14, струйный насос 12 и сатуратор-гидроциклон 11.

Рециркуляционный поток очищенных сточных вод собирается из флотационного объема трубчатой системой 8 и с расходом  $Q_H$ , м<sup>3</sup>/с, под давлением  $P_H$ , Па, подсасывается в патрубок гидроструйного насоса 12, куда также подсасывается атмо-

сферный воздух. Расход подсосываемого воздуха измеряется ротаметром 13. Расход подсосываемого из атмосферы воздуха регулируется вентилем 15.

Циркуляционная установка выполнена по схеме с отбором полезного расхода жидкости перед гидроструйным насосом 12. При расчете циркуляционной установки принимается допущение о том, что гидроструйный насос 12 пропускает через себя однородную жидкость (сточную воду), поскольку объемный расход подсосываемого воздуха составляет незначительную часть от объема перекачиваемой жидкости. На сопло гидроструйного насоса 12 из гидроциклона-сатуратора 11 поступает рабочий поток жидкости с расходом  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/с, и абсолютным давлением  $P_p$ , Па. Образовавшаяся на выходе из диффузора гидроструйного насоса 12 водовоздушная смесь с расходом  $Q_c$ , м<sup>3</sup>/с, и давлением  $P_c$ , Па, поступает во входной патрубок лопастного насоса 14.

Объемный расход воздуха в водовоздушной смеси, подаваемой на лопастной насос с целью предотвращения срыва режима его работы, не должен превышать 3–5 % от объемного расхода жидкости.

В лопастном насосе 14 происходит интенсивное диспергирование пузырьков воздуха, содержащихся в водовоздушной смеси, и повышение ее давления до значения

$$P_p = P_c + \Delta P, \text{ Па}, \quad (14)$$

где  $\Delta P$  – величина повышения давления циркуляционного потока жидкости при прохождении его через лопастной насос (избыточное давление, создаваемое лопастным насосом).

Поток водовоздушной смеси, содержащей тонкодисперсные пузырьки воздуха, по тангенциально присоединенному патрубку подается в гидроциклон-сатуратор. При тангенциальном подводе водовоздушной смеси в гидроциклоне-сатураторе из-за наличия момента количества движения формируются два сопряженных между собой спиралеобразных потока, вращающихся в одну и ту же сторону: нисходящий периферийный поток, движущийся к нижнему выходному патрубку и восходящий внутренний поток, движущийся к верхнему выходному патрубку. На пузырьки воздуха, движущиеся по спиралеобразной траектории во вращающихся потоках, действует центробежная сила, переносящая их к оси гидроциклона-сатуратора, откуда они выносятся восходящим потоком водовоздушной смеси с расходом  $Q_{H2}$ , м<sup>3</sup>/с, который отводится через верхний отводящий патрубок и подается в трубчатую распределительную систему потока водовоздушной смеси 10. В гидроциклоне-сатураторе происходит интенсивное насыщение рециркуляционного потока сточных вод растворенным воздухом, который отводится через нижний патрубок и с расходом  $Q_{H1}$ , м<sup>3</sup>/с, поступает в трубчатую распределительную систему рециркуляционного потока 3.

На трубопроводе, отводящем рециркуляционный поток сточных вод из гидроциклона-сатуратора 11, установлен регулирующий вентиль 16, позволяющий понизить давление потока на выходе из трубчатой распределительной системы 10, в результате чего раствор воздуха в воде становится перенасыщенным и из него выделяются пузырьки воздуха диаметром  $d_{\Pi} = 20\text{--}50$  мкм.

Проведенные теоретические исследования процесса удаления из сточных вод гидрофобных дисперсных частиц позволили сделать следующие выводы:

- метод напорной (копресссионной) флотации позволяет получить мелкодисперсные пузырьки воздуха размером  $d_{\Pi} = 20\text{--}50$  мкм, в процессе всплывания которых во флотационном объеме эффективно образуются флотокомплексы с дисперсными частицами загрязнений;
- всплывание флотокомплексов, образованных мелкодисперсными пузырьками воздуха, на поверхность флотационного объема из-за незначительной величины их гидравлической крупности является медленным процессом, что увеличивает продолжительность нахождения образовавшихся флотокомплексов во флотационном объеме,

вследствие чего повышается вероятность их разрушения и снижается эффективность процесса флотационной очистки сточных вод;

- повысить эффективность очистки сточных вод методом напорной флотации можно за счет использования технологического приема вторичного введения во флотационный объем водовоздушной смеси, содержащей пузырьки воздуха размером  $\bar{d}_{\text{п}} = 100\text{--}300$  мкм, обладающие увеличенной гидравлической крупностью, всплывающие в ламинарном режиме и, вследствие этого, незначительно турбулизирующие флотационный объем.

#### Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Моделирование процессов флотационной очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, В.Г. Камбург // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – №2 – С. 91–99.

2. Андреев, С.Ю. Теоретическое обоснование интенсификации процесса напорной флотационной очистки сточных вод за счет повышения эффективности растворения воздуха в сатураторе / С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, С.В. Степанов, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №1. – С. 160–170.

#### References

1. Andreev S.Yu. Modeling of processes of flotation wastewater treatment / S.Yu. Andreev, B.M. Grishin, V.G. Kamburg // Regional architecture and engineering. – 2009. – No. 2 – P. 91–99.

2. Andreev S.Yu. Theoretical substantiation of the intensification of the process of pressure flotation wastewater treatment by increasing the efficiency of air dissolution in the saturator / S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 160–170.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Лебединский Константин Валерьевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Транспортные машины»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

**Андреев Виктор Сергеевич**,  
студент

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 56-35-11;  
факс: (8421) 56-51-22

**Lebedinskiy Konstantin Valerevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
department «Transport Machines»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

**Andreev Viktor Sergeevich**,  
Student

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА КИСЛОРОД И АЗОТ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ МИКРОЦИКЛОНА

С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований процесса разделения воздуха на азот и кислород в высокоградиентном центробежном поле микроциклона. Разработана методика расчета микроциклона, позволяющая определять теоретические и экспериментальные значения его основных технологических характеристик: коэффициента разделения  $K_p$ ; удельной объемной производительности по кислороду  $q_w$  и др. Использование предложенной методики расчета, позволит оптимизировать параметры процесса разделения воздуха на кислород и азот в микроциклоне.

*Ключевые слова: роторная центрифуга, микроциклон, коэффициент разделения, массовая производительность, объемная производительность, критерий Фруда*

## THEORETICAL ANALYSIS AND RECOMMENDATIONS FOR THE CALCULATION OF THE PROCESS OF SEPARATING AIR INTO OXYGEN AND NITROGEN IN THE HIGH-GRADIENT CENTRIFUGAL FIELD OF A MICROCYCLONE

S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev

The results of theoretical analysis and experimental studies of the process of air separation into nitrogen and oxygen in a high-gradient centrifugal field of a microcyclone are presented. A method for calculating a microcyclone has been developed that allows determining the theoretical and experimental values of its main technological characteristics: separation coefficients  $K_p$ ; values of specific volumetric oxygen productivity  $q_w$  and others. The use of the proposed calculation method

will optimize the parameters of the process of air separation into oxygen and nitrogen in a microcyclone.

*Keywords: rotary centrifuge, microcyclone, separation coefficient, mass productivity, volumetric productivity, froude criterion, centrifugal force*

В настоящее время кислород, используемый в промышленности и медицине, получается из атмосферного воздуха, являющегося газовой смесью, содержащей 78 % азота и 20,9 % кислорода. Оставшиеся 1,1 % приходятся на инертный газ аргон, углекислый газ и другие газы. Также воздух содержит водяные пары, концентрация которых изменяется в широких пределах.

Для получения чистого кислорода из воздуха используются кислородные установки, которые по принципу действия подразделяются на:

- установки криогенного разделения воздуха на составляющие компоненты;
- мембранные установки;
- короткоцикловые адсорбционные установки.

По данным Росстата, промышленное производство газообразного кислорода в России в 2021 году составило 11 тыс. т в сутки[1].

Наибольшее количество из получаемого в нашей стране газообразного кислорода (80 %) потребляется предприятиями металлургической и химической промышленности.

Используемый в больших объемах в качестве окислителя в химических реакциях, реализуемых в различных технологических процессах на этих предприятиях, газообразный технический кислород вырабатывается на промышленных установках криогенного разделения воздуха на составляющие компоненты.

Пятая часть производимого в нашей стране газообразного кислорода используется в других отраслях хозяйственной деятельности.

Газообразный кислород используется при сварке и резке металлов, в биореакторах фармацевтической промышленности, в медицине, в процессах водоподготовки, предусматривающих получение озона. Эти потребители газообразного кислорода, как правило, получают его из кислородных установок небольшой производительности, работающих по принципу короткоциклового адсорбции. Установки короткоциклового напорной адсорбции используют свойства селективного гетерогенного поглощения азота из воздуха твердым адсорбентом. В качестве адсорбента в установках короткоциклового напорной адсорбции, как правило, применяется гранулированный синтетический цеолит.

Степень поглощения газа твердым адсорбентом зависит от природы поглощаемого газа, его температуры и давления. Кислород, в отличие от азота, который является легко адсорбируемым газом, практически не поглощается и свободно проходит через слой цеолита. Азот при повышенном давлении полностью поглощается из воздуха цеолитом. Процесс регенерации адсорбента осуществляется путем отдувки из него поглощенного азота чистым кислородом при нормальном давлении.

Установки короткоциклового напорной адсорбции в составе имеют два поочередно работающих адсорбера, заполненных гранулами цеолита.

Один адсорбер в рабочем цикле участвует в процессе получения чистого кислорода, другой в это время регенерируется.

На рабочий адсорбер подается под давлением 0,6–0,8 МПа очищенный и осушенный атмосферный воздух, из которого молекулы азота активно поглощаются цеолитом, а кислород при этом свободно проходит через слой адсорбента и поступает потребителю. Часть полученного на рабочем адсорбере кислорода подается под атмосферным давлением на другой адсорбер, который в это время находится в режиме регенерации, в результате чего из цеолита выдувается в атмосферу адсорбированный в предыдущем цикле азот.

В установках получения кислорода из воздуха методом селективного гетерогенного поглощения азота на производство 1 м<sup>3</sup> кислорода потребляется 14–16 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха. Необходимость поддержания в адсорбере высокого давления 0,6–0,8 МПа обуславливает высокую энергоемкость процесса получения кислорода.

Наряду с повышенной энергоёмкостью установки короткоциклового напорной адсорбции являются весьма сложным оборудованием и имеют высокую стоимость. Один из наиболее дешёвых генераторов кислорода китайского производства производительностью 50 м<sup>3</sup>/ч, вырабатывающих газовую смесь с концентрацией кислорода 90–96 %, в настоящее время стоит около 250000 долларов США [2].

Используемый в установках короткоциклового напорной адсорбции гранулированный цеолит имеет ограниченный срок службы и подлежит замене через определенное время, что также повышает себестоимость процесса получения газообразного кислорода.

Значительно снизить энергоёмкость процесса получения технического кислорода можно, используя технологию разделения компонентов атмосферного воздуха в высокоградиентном центробежном поле.

В статье Ю.Б. Харитона «К вопросу разделения газов центрифугированием», вышедшей в 1937 году, отмечалось, что механизм молекулярно-диффузионного разделения компонентов атмосферного воздуха, имеющих различную плотность, в высокоградиентном центробежном поле близок к обратимому процессу, что приводит к выводу о наличии теоретических предпосылок, позволяющих предположить высокую экономичность этого процесса.

По нашим данным, обратимый процесс разделения 5 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха в центробежном поле на 1 м<sup>3</sup> чистого кислорода и 4 м<sup>3</sup> азота потребует при нормальных условиях менее 0,09 кВт·ч электроэнергии. Также в статье Ю.Б. Харитона было показано, что наличие турбулентности в разделяемом в центробежном поле потоке газовой смеси совершенно недопустимо, поскольку турбулентная диффузия интенсивно перемешивает компоненты газовой смеси и обеспечивает равномерное их распределение по всему обрабатываемому объёму.

Таким образом, для успешного разделения компонентов воздуха в центробежном поле необходимо обеспечить в разделяемом потоке ламинарный режим движения газовой смеси, что возможно лишь в роторе газовой центрифуги, где разделяемая газовая смесь вращается синхронно с ротором и медленно двигается при этом вдоль его оси. В виду сложности устройства газовой центрифуги и крайне низкой скорости протекания процесса молекулярной диффузии в создаваемом ей центробежном поле Ю.Б. Харитоном был сделан вывод о нецелесообразности применения газовой центрифуги для разделения воздуха на азот и кислород.

В соответствии с моделью Козна газовая центрифуга работает вследствие действия сил принудительной газовой диффузии, вызванной градиентом давления газов, возникающего под действием центробежной силы, и ее основной технологической характеристикой является коэффициент разделения, величина которого может быть определена по формуле, приводимой в работе [3]:

$$K_p = \frac{C_{кп}}{C_{ко}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b)r_0^2}{2RT}}, \quad (1)$$

где  $C_{кп}$  – концентрация отделяемого из воздуха кислорода на периферии ротора центрифуги (у его стенки), кг/м<sup>3</sup>;  $C_{ко}$  – концентрация кислорода на оси центрифуги, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_k$  и  $\mu_b$  – соответственно молекулярные массы кислорода ( $\mu_k = 0,0320$  кг/моль) и воздуха ( $\mu_b = 0,0288$  кг/моль);  $T$  – температура воздуха, °K;  $R$  – газовая постоянная

$$(R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{°K}}).$$

В работе [4] приведены результаты анализа теоретических основ процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле. Было показано, что с учетом

$$V_T = \omega \cdot r_0, \text{ м/с}, \quad (2)$$



где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $r_0$  – радиус ротора центрифуги, м, формула (1) может быть записана в виде

$$K_p = \frac{C_{\text{кп}}}{C_{\text{ко}}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0^2}{2RT}}. \quad (3)$$

Величина центробежной силы, действующей в пристеночной области ротора центрифуги на объём воздуха, равный одному молю  $W_\mu$ ,  $\text{м}^3/\text{моль}$ , может быть определена по формуле

$$F_{\text{ц}} = (\mu_k - \mu_b) \cdot a_{\text{ц}} = (\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где  $a_{\text{ц}}$  – ускорение центробежной силы.

С учетом формулы (4) формула (3) была записана в виде

$$K_p = e^{\frac{F_{\text{ц}} \cdot r_0}{2RT}}. \quad (5)$$

В реальности объём ротора центрифуги  $W_{\text{ц}}$  может быть не равен объёму одного моля воздуха  $W_\mu$ .

Величину силы давления теплового движения молекул воздуха на вертикальные стенки теоретического цилиндра объёмом один моль  $W_\mu$ , имеющего высоту, равную длине ротора центрифуги  $l_{\text{ц}}$ , м, и радиус  $r_\mu$ , м, можно определить по формуле

$$F_{\text{д}} = P \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{\text{ц}}, \text{ Н/моль}, \quad (6)$$

где  $P$  – величина давления теплового движения молекул воздуха на вертикальные стенки цилиндра, Па.

Величина давления  $P$  может быть определена из уравнения Менделеева – Клайперона

$$R \cdot T = P \cdot W_\mu, \text{ Дж/моль}, \quad (7)$$

откуда

$$P = RT / W_\mu, \text{ Па}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6), с учетом  $W_\mu = \pi r_\mu^2 l_{\text{ц}}$  получим:

$$F_{\text{д}} = \frac{RT}{W_\mu} \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{\text{ц}} = \frac{RT}{\pi r_\mu^2 l_{\text{ц}}} \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{\text{ц}} = \frac{2RT}{r_\mu}, \text{ Н/моль}. \quad (9)$$

В работе [4] представлено уравнение, позволяющее учесть неравенство объёма ротора центрифуги  $W_{\text{ц}}$  и одного моля воздуха  $W_\mu$ :

$$K_p = e^{\frac{F_{\text{ц}}}{F_{\text{д}}}} = e^{\frac{F_{\text{ц}} \cdot r_\mu}{2RT}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0 \cdot r_\mu}{2RT}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot V_m^2 \cdot r_\mu}{2RT \cdot r_0}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot V_m^2 \cdot \bar{r}}{2RT}}. \quad (10)$$

Уравнение (10) отличается от формулы (1) лишь наличием безразмерного коэффициента  $\bar{r}$ .

$$\bar{r} = \frac{r_\mu}{r_0} \cdot \frac{2\pi l_{\text{ц}} F_{\text{ц}}}{2\pi l_{\text{ц}} F_{\text{д}}} = \frac{P_{r_0}}{P_\mu}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что коэффициент  $\bar{r}$ , характеризующий конструктивные особенности ротора центрифуги, является отношением величины давления  $P_{r_0}$  центробежной силы  $F_{\text{ц}}$ , действующей на вертикальные стенки ротора центрифуги

длиной  $l_{\mu}$ , к величине давления  $P_{\mu}$  центробежной силы  $F_{\mu}$ , оказываемого на вертикальные стенки теоретического цилиндра объёмом один моль, имеющего высоту, равную длине ротора  $l_{\mu}$ , и радиус  $r_{\mu}$ .

Величина радиуса  $r_{\mu}$  может быть определена по формуле

$$r_{\mu} = \sqrt{\frac{W_{\mu}}{\pi \cdot l_{\mu}}}, \text{ м.} \quad (12)$$

В работе [3] приводится описание промышленной центрифуги *DMS-1*, используемой для разделения изотопов газовой смеси при температуре  $T=318$  °К, имеющей параметры ротора: длина  $l_{\mu} = 1,5$  м, радиус  $r_0 = 0,06$  м.

Объём ротора центрифуги *DMS-1* примерно равен объёму одного моля газовой смеси, и для расчета ее рабочих характеристик с удовлетворительной точностью может быть использована формула (1).

Для расчета центробежных аппаратов, имеющих рабочий объём существенно меньше одного моля, необходимо использовать формулу (10), в соответствии с которой величина коэффициента разделения значительно увеличивается при уменьшении радиуса центрифуги  $r_0$ .

Приведенный в работе [4] теоретический анализ процесса разделения воздуха на азот и кислород в центробежном поле показал, что уменьшение диаметра аппарата до некоторого определенного значения (применение принципа микрофлюидики) обеспечит получение необходимого для разделения компонентов воздуха значения критерия Фруда  $Fr$  при сохранении ламинарного режима вращательно-поступательного движения газовой смеси, что позволит использовать центробежный аппарат с неподвижными камерами сепарации – батарейный микроциклон.

Батарейный микроциклон является более простым и надежным в работе аппаратом, чем роторная центрифуга, и имеет существенно меньшую стоимость.

Вследствие этого может быть рассмотрена возможность его использования в технологическом процессе разделения воздуха на кислород и азот.

В работе [5] были приведены результаты экспериментальных исследований процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле, создаваемом микроциклоном диаметром  $d_{\mu} = 2 \cdot 10^{-3}$  м и длиной  $l_{\mu} = 40 \cdot 10^{-3}$  м.

При величине давления воздуха на входе в микроциклон  $P_{\text{в}} = 0,7$  МПа и концентрации кислорода в нем  $C_{\text{кв}} = 266,9$  гр/м<sup>3</sup> концентрация кислорода на выходе из отводного отверстия обогащенной кислородом газовой смеси достигла значения  $C_{\text{к0}} = 349,7$  гр/м<sup>3</sup>, величина коэффициента разделения воздуха в микроциклоне при этом имела значение  $K_p = 1,31$ . Полученные в ходе проведения экспериментальных исследований данные подтвердили принципиальную возможность использования для разделения воздуха на кислород и азот центробежного аппарата с неподвижной камерой сепарации – микроциклона.

Для более детального анализа процесса работы микроциклона возникает необходимость разработки методики расчета его основных технологических характеристик.

Наряду с основной технологической характеристикой микроциклона – коэффициентом разделения  $K_p$  – при анализе процесса его работы необходимо также учитывать величину его производительности к кислороду  $q_m$ , кг/с.

Для экспериментального определения величины производительности микроциклона  $q_m$  необходимо контролировать объёмные расходы воздуха на выходе из отводного отверстия обогащенной кислородом газовой смеси (концентрированного потока)  $Q_{\text{вк}}$ , м<sup>3</sup>/с, и отводного отверстия обедненной газовой смеси  $Q_{\text{во}}$ , м<sup>3</sup>/с.

Величина объёмного расхода воздуха на входе в микроциклон при атмосферном давлении  $P_{\text{а}} = 0,1$  МПа будет иметь значение

$$Q_{\text{вв}} = Q_{\text{вк}} + Q_{\text{во}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (13)$$

Экспериментальные значения производительности микроциклона по кислороду могут быть определены по формуле

$$q_m = Q_{\text{вк}} (C_{\text{кк}} - C_{\text{кв}}) = Q_{\text{во}} (C_{\text{кв}} - C_{\text{ко}}), \text{ кг/с}, \quad (14)$$

где  $C_{\text{кк}}$ ,  $C_{\text{ко}}$ ,  $C_{\text{кв}}$  – соответственно концентрации кислорода на выходе из отводного отверстия обогащённой кислородом газовой смеси, на выходе из отводного отверстия обедненной газовой смеси, на входе в микроциклон,  $\text{кг/м}^3$ .

Удельная объёмная производительность микроциклона по кислороду  $q_w$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ , выраженная в единицах концентрации  $dC/dt$  с учетом величины объёма камеры сепарации микроциклона  $W_{\text{ц}}$ ,  $\text{м}^3$ , может быть определена как

$$q_w = q_m / W_{\text{с}} = Q_{\text{вк}} (C_{\text{кк}} - C_{\text{кв}}) / W_{\text{с}} = Q_{\text{во}} (C_{\text{кв}} - C_{\text{ко}}) / W_{\text{с}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^3 / \text{с}. \quad (15)$$

Величина коэффициента разделения в микроциклоне секундных объёмных расходов потоков газовой смеси в соответствии с формулой (14) может быть определена как

$$K_{PQ} = \frac{Q_{\text{во}}}{Q_{\text{вк}}} = \frac{(C_{\text{кк}} - C_{\text{кв}})}{(C_{\text{кв}} - C_{\text{ко}})} = \frac{\Delta C_{\text{кк}}}{\Delta C_{\text{ко}}}, \quad (16)$$

где  $\Delta C_{\text{кк}}$  и  $\Delta C_{\text{ко}}$  – соответственно величины увеличения концентрации кислорода в газовой смеси на выходе из отверстия обогащённого потока и понижения концентрации кислорода на выходе из отверстия обедненного потока.

Из (16) следует, что

$$\Delta C_{\text{кк}} = K_{PQ} \cdot \Delta C_{\text{ко}}, \text{ кг/м}^3. \quad (17)$$

Величина продолжительности обработки в камере сепарации разделяемого на компоненты воздуха может быть найдена по формуле

$$T_{\text{ц}} = \frac{Q_{\text{вк}}}{W_{\text{ц}}} = \frac{l_{\text{ц}}}{V_0}, \text{ с}, \quad (18)$$

где  $l_{\text{ц}}$  – длина камеры сепарации микроциклона, м;  $V_0$  – средняя величина осевой скорости потока газовой смеси в камере сепарации микроциклона, м/с.

$$V_0 = 4 \cdot \frac{Q_{\text{вк}}}{\pi \cdot d_{\text{ц}}^2}, \text{ м/с}. \quad (19)$$

Величина удельной объёмной производительности микроциклона по кислороду  $q_w$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ , также может быть определена по формуле

$$q_w = \frac{q_m}{t_{\text{ц}}}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (20)$$

Величина скорости движения воздушного потока на выходе из входного патрубка микроциклона при атмосферном давлении может быть определена по формуле

$$V_{\text{вк}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{вк}}}{\pi \cdot d_{\text{вк}}^2}, \text{ м/с}, \quad (21)$$

где  $d_{\text{вк}}$  – внутренний диаметр входного патрубка микроциклона, м.

Теоретическое значение величины удельной объёмной производительности микроциклона по кислороду можно вычислить по формуле, приведённой в работе [4]:

$$q_w = \frac{8 \cdot V_{\text{вк}}^2 \cdot \bar{r}_0}{R \cdot T \cdot d_{\text{ц}}^2} \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot C_{\text{кв}} \cdot (\mu_{\text{к}} \cdot \mu_{\text{в}}), \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}), \quad (22)$$

где  $\alpha_k$  – значение коэффициента молекулярной диффузии кислорода воздуха, обусловленной наличием градиента его концентрации ( $\alpha_k = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$ ).

Теоретическое значение величины коэффициента разделения микроциклона может быть определено по формуле

$$K_p = e^{\frac{(\mu_k - \mu_a) \cdot V_{\text{вв}}^2}{2RT}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_a) \cdot Fr \cdot g \cdot r_u}{2RT}}, \quad (23)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $Fr$  – число Фруда, определяемое по формуле

$$Fr = \frac{2 \cdot V_{\text{вв}}^2}{g \cdot d_{\text{ц}}}. \quad (24)$$

Экспериментальное значение величины коэффициента разделения микроциклона вычисляется по формуле

$$K_p = \frac{C_{\text{кк}}}{C_{\text{ко}}} = \frac{C_{\text{кв}} + \Delta C_{\text{кк}}}{C_{\text{кв}} - \Delta C_{\text{ко}}}. \quad (25)$$

Теоретический анализ и экспериментальные исследования процесса разделения воздуха на азот и кислород в высокоградиентном центробежном поле показали, что использование принципов микрофлюидики, предусматривающих уменьшение радиуса центробежного аппарата, позволяет не только существенно повысить величину его удельной объемной производительности по кислороду  $q_w$ , но и обеспечить ламинарный режим течения в камере сепарации, вследствие чего может быть использован более простой, надежный и дешевый аппарат с неподвижной камерой сепарации – батарейный микроциклон.

Оптимизировать параметры разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле можно, используя новую методику расчета, позволяющую определять теоретические и экспериментальные значения основных технологических характеристик микроциклона: коэффициент разделения  $K_p$  и удельную объемную производительность по кислороду  $q_w$ , кг/(м<sup>3</sup>·с).

### Список литературы

1. <https://www.rbc.ru/business/20/01/2022/61e6b52b9a79479ecf31a4e2>
2. <https://dinlon.en.made-in-china.com/product/SOeGviLrbTht/China-Automatic-95-Purity-Industrial-Psa-Oxygen-Generator-for-Hospital-Medical-Use.html>
3. Scott, Kemp R. Gas centrifuge theory and Development / Kemp R. Scott. // Science and Global security. – 2009. – Vol. 17. – P. 1–19.
4. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации процесса разделения газовых смесей в центробежном поле за счет уменьшения размера центробежных аппаратов / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №3 (48). – С. 167–175.
5. Андреев, С.Ю. Анализ процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4 (49). – С. 119–126.

### References

1. <https://www.rbc.ru/business/20/01/2022/61e6b52b9a79479ecf31a4e2>

- 
2. <https://dinlon.en.made-in-china.com/product/SOeGviLrbTht/China-Automatic-95-Purity-Industrial-Psa-Oxygen-Generator-for-Hospital-Medical-Use.html>
  3. Scott, Kemp R. Gas centrifuge theory and Development / Kemp R. Scott. // Science and Global security. – 2009. – Vol. 17. – P. 1–19.
  4. Andreev, S.Yu. New technology of intensification of the process of separation of gas mixtures in a centrifugal field by reducing the size of centrifugal apparatuses / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3 (48). – P. 167–175.
  5. Andreev, S. Yu. Analysis of the process of air separation into oxygen and nitrogen in a high-gradient centrifugal field of a microcyclone / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev // Regional architecture and engineering. – 2021. – №4 (49). – P. 119–126.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Домке Эдуард Райнгольдович,**  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Организация и безопасность  
движения»

**Жесткова Светлана Анатольевна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Организация и безопасность  
движения»

**Караванова Мария Андреевна,**  
магистрант кафедры «Организация  
и безопасность движения»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Domke Edward Raingoldovich,**  
Candidate of Sciences, Professor of the  
Department «Organization and Traffic Safety»

**Zhestkova Svetlana Anatolievna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Organization and Traffic  
Safety»

**Karavanova Maria Andreevna,**  
Master of the department «Organization and  
Traffic Safety»

## ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ ДОРОГАХ

Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, М.А. Караванова

Дано обоснование возможности и целесообразности использования метода, основанного на данных о ДТП, для установления аварийных участков федеральных дорог, степени опасности и стабильности таких участков.

*Ключевые слова: автомобильные дороги, безопасность, концентрация ДТП, прогнозирование, метод исследования, анализ*

### PRINCIPLES FOR IMPROVING ROAD SAFETY ON FEDERAL HIGHWAYS

E.R. Domke, S.A. Zhestkova, M.A. Karavanova

The substantiation of the possibility and expediency of using the method based on accident data to establish emergency sections on federal highways, the degree of danger and stability of such sections is given.

*Keywords: highways, safety, accident concentration, forecasting, research method, analysis*

В 2019 году в РФ началась реализация приоритетного проекта «Безопасные и качественные дороги», который предполагает, что к 2024 году до нормативов будет доведено 85 % всех типов дорог. Под нормативным состоянием имеется в виду соответствие дорог нормам техрегламента таможенного союза «Безопасные автомобильные дороги». Особое внимание уделяется дорогам общего пользования федерального значения.

Постановлением Правительства РФ [1] определен перечень автомобильных дорог общего пользования федерального значения и план развития сети таких дорог до 2029 года.

В 2018 году протяженность сети федеральных дорог превысила 56 тыс. км. К 2029 году протяженность такой сети дорог должна увеличиться еще на 19,5 тыс. км.

Экономическая, социальная и политическая значимость федеральных дорог, несомненно, велика, однако тяжесть последствий ДТП на этих дорогах остается пока очень высокой. Например, в 2019 году в РФ на федеральных дорогах произошло сравнительно небольшое количество ДТП (9,5 % от общего числа ДТП в стране), но в

них погибло 28 % и получили ранения 19,2 % от общего числа погибших и раненых в ДТП на всех дорогах РФ. Самыми аварийными в 2019 году стали ФАД М-5 «Урал», ФАД М-7 «Волга» и ФАД Р-217 «Кавказ».

Основной причиной высокой тяжести последствий ДТП на федеральных дорогах является несоответствие транспортно-эксплуатационных характеристик дорог и системы организации движения характеристикам движения транспортных потоков. Чаще всего ДТП происходят: на двухполосных участках дорог; на кривых в плане и продольном профиле; при ограниченной видимости и обзорности; при прохождении дорог через малые населенные пункты небольшой протяженности; на дорогах с очень хорошим состоянием дорожного полотна (провоцирующих водителя ТС на недопустимо высокие скорости движения) при сохранении других отрицательных характеристик дороги; на пересечениях и примыканиях дорог в одном уровне. Полное устранение этих негативных факторов, характерных для большинства федеральных дорог, не может быть выполнено в короткий срок, учитывая стоимость и трудоемкость работ. Планируемое увеличение протяженности сети федеральных дорог к 2029 году на 19,5 тыс. км будет происходить за счет передачи в собственность РФ двухполосных региональных и муниципальных дорог, приведение которых к уровню требований, предъявляемых к федеральным дорогам, еще больше осложнит выполнение задачи по снижению аварийности на федеральных дорогах.

Все работы, направленные на повышение БДД, должны выполняться по четко обоснованным и реально выполнимым планам. Для этого ежегодно управлениями ФАД должны проводиться мониторинги аварийности на дорогах с целью:

- выявления участков концентрации ДТП на дорогах;
- установления степени опасности участков концентрации ДТП;
- установления стабильности уровня аварийности на участках концентрации ДТП;
- планирования мероприятий по повышению безопасности движения на выявленных участках концентрации ДТП с учетом их опасности и стабильности.

Для выявления участков концентрации ДТП на существующих дорогах при наличии достоверной информации о ДТП за последние 3–5 лет целесообразно использовать достаточно простой метод, основанный на данных о ДТП. Участки концентрации ДТП на дорогах с интенсивностью движения до 3000 авт/сут. можно выявить следующим образом.

Последовательно рассматриваются километровые участки. Выявляются участки с двумя и более ДТП, при этом каждый из выявленных участков может состоять из нескольких смежных километровых участков, на которых были или нет ДТП. Если в состав какого-либо из выявленных участков попали участки, расположенные как в населенном пункте, так и вне его, то в дальнейших расчетах они рассматриваются отдельно друг от друга.

Для всех выявленных участков определяется плотность ДТП по формуле

$$\gamma = \frac{\Pi_i}{T_i \cdot l_i}, \text{ ДТП в год/на км,} \quad (1)$$

где  $\Pi_i$  – число ДТП, совершенных на  $i$ -ом рассматриваемом участке в течение расчетного периода, шт.;  $T$  – расчетный период, лет;  $l_i$  – протяженность  $i$ -го рассматриваемого участка дороги, км.

Если на каком-либо участке полученное значение  $\gamma$  превысит значение, указанное в табл. 1, то этот участок следует отнести к числу участков концентрации ДТП.

При среднегодовой суточной интенсивности движения свыше 3000 авт/сут. к участкам концентрации ДТП относят участки дорог, на которых абсолютное число ДТП за расчетный период не меньше значений, приведенных в табл. 2, а коэффициент относительной аварийности – не менее 0,3.

Интенсивность движения, авт./сут	Критическая плотность ДТП на участках их концентрации, шт. в год/км	
	вне населенных пунктов	в пределах населенных пунктов
менее 1000	0,28	0,38
1000-1200	0,29	0,42
1200-1400	0,30	0,53
1400-1600	0,32	0,60
1600-1800	0,34	0,64
1800-2000	0,36	0,72
2000-2200	0,39	0,85
2200-2400	0,43	0,90
2400-2600	0,46	0,94
2600-2800	0,50	1,00
2800-3000	0,54	1,20
3000-3200	0,60	1,25

При отсутствии достоверных сведений о среднегодовой суточной интенсивности движения к участкам концентрации ДТП можно отнести участки, на которых абсолютное число ДТП за расчетный период не меньше значений, указанных в табл. 3, при данной фактической плотности ДТП.

Т а б л и ц а 2

Интенсивность движения, авт./сут	Минимальное количество ДТП за 3 года на участках их концентрации при длине участка, м				
	до 200	200-400	400-600	600-800	800-1200
3000-7000	3	3	3	4	4
300-11000	3	3	4	4	5
11000-13000	3	3	4	5	5
13000-15000	3	4	4	5	6
1500-17000	3	4	5	5	6
17000-20000	4	4	5	6	7
свыше 20000	4	4	6	6	8

Т а б л и ц а 3

Плотность ДТП, шт. в год/км	Минимальное количество ДТП за 3 года на участках их концентрации при длине участка, м		
	менее 1000	1000-2000	2000-3000
менее 0,20	3	4	4
0,20-0,24	3	4	5
0,24-0,28	3	4	5
0,28-0,32	4	4	5
0,32-0,44	4	5	5
0,44-0,52	4	5	6

С целью прогнозирования характера изменения аварийности и оценки эффективности ранее принятых мероприятий по повышению безопасности движения выявленные участки концентрации ДТП рекомендуется подразделять на три типа (табл. 4):

- регрессирующие (затухающие), на которых уровень аварийности снижается;
- стабильные, на которых уровень аварийности за рассматриваемый период остается постоянным;



– прогрессирующий, на которых за последний год произошел существенный рост аварийности.

Т а б л и ц а 4

Тип участка концентрации ДТП	Число ДТП за последний год при среднем числе ДТП за предшествующий расчетный период (3-5 лет), шт.						
	1-1,2	1,2-1,5	1,5-2,2	2,2-2,85	2,85-3,2	3,2-3,5	>3,5
Регрессирующий	0	1	1	до 2	до 2	до 3	до 3
Стабильный	1-2	1-2	2-3	3-4	3-5	4-5	4-6
Прогрессирующий	>3	>3	>4	>5	>6	>6	>7

Другой характеристикой участков концентрации ДТП является степень их опасности (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Степень опасности участка концентрации ДТП	Предельные значения коэффициента относительной аварийности (число ДТП на 1 млн авт.-км) для дорог		
	многополосные с разделительной полосой	многополосные без разделительной полосы	двухполосные
Малоопасный	0,17-0,44	0,19-0,52	0,20-0,70
	0,18-0,90	0,20-1,90	0,40-2,00
Опасный	0,6-0,80	0,52-0,98	0,70-1,30
	0,70-3,00	1,90-4,30	2,00-4,40
Очень опасный	>0,65	>0,98	>1,30
	>3,00	>4,30	>4,40

Пр и м е ч а н и е. В знаменателе приведены значения для коротких участков (мосты, перекрестки и т.п.).

Коэффициент относительной аварийности определяется по формулам:

а) для однородных длинных участков

$$И = \frac{10^6 Z}{365LN}, \text{ ДТП/1 млн авт.-км;} \quad (2)$$

б) для коротких участков (мосты, перекрестки и т.п.)

$$И = \frac{10^6 Z}{365N}, \text{ ДТП/1 млн авт.}, \quad (3)$$

где  $Z$  – количество ДТП в год;  $L$  – длина рассматриваемого участка, км;  $N$  – среднегодовая суточная интенсивность движения в обоих направлениях, авт./сут.

По территории Пензенской области проходят три федеральные дороги (рис. 1):

- ФАД М-5 «Урал» (Москва – Челябинск), 467-778 км, среднегодовая суточная интенсивность движения – 18000 авт./сут;
- ФАД Р-158 (Нижний Новгород – Саратов), 324-510 км, среднегодовая суточная интенсивность движения – 3300 авт./сут;
- ФАД Р-208 (Тамбов – Пенза), 125-277 км, среднегодовая суточная интенсивность движения – 4900 авт./сут.

Производим обработку статистических данных об аварийности на этих дорогах и строим линейные графики аварийности, фрагменты которых приведены на рис. 2.

Дальнейшие расчеты и соответствующие выводы делаем на основе формул (1)–(3) и табл. 2–5. Учитывая большой объем указанных выше операций, для участков дорог большой протяженности используем адаптированный для этих целей программный материал, разработанный Росавтодором.

По результатам обследования дорог получены данные, приведенные в табл. 6.

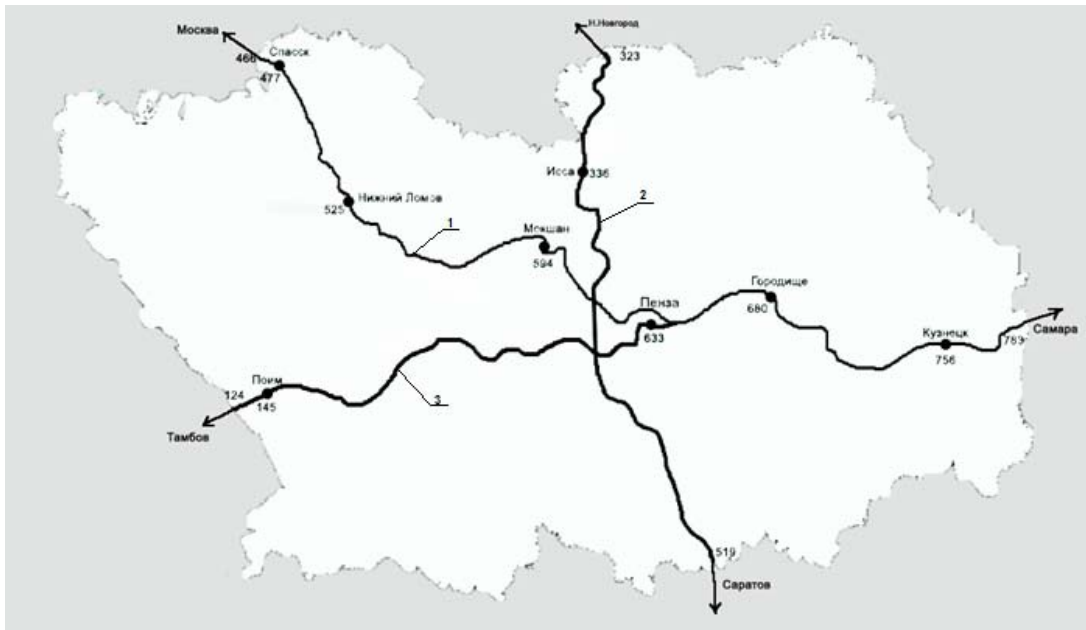


Рис. 1. Схема федеральных автомобильных дорог в пределах Пензенской области:  
 1 – ФАД М-5 «Урал» (Москва – Челябинск); 2 – ФАД Р-158 (Нижний Новгород – Саратов);  
 3 – ФАД Р-208 (Тамбов – Пенза)

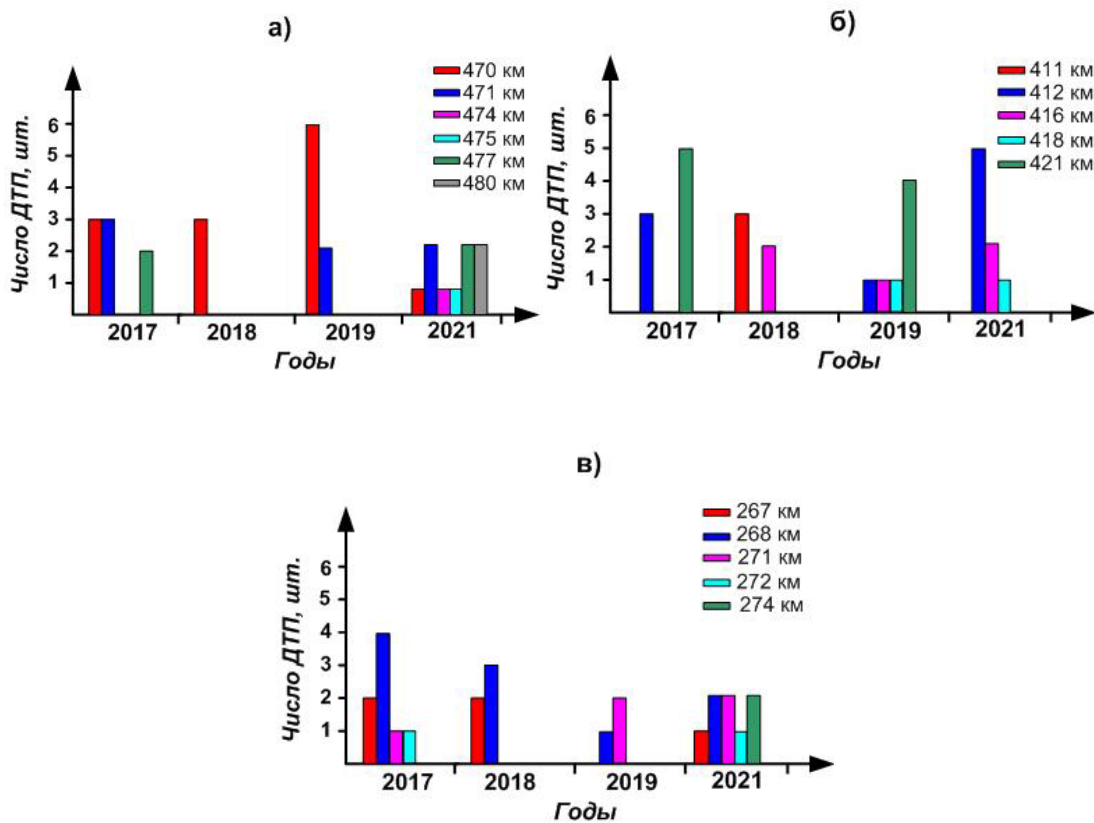


Рис. 2. Фрагменты линейных графиков показателей аварийности на дорогах:  
 а – ФАД М-5 «Урал»; б – ФАД Р-158 (Н-Новгород – Саратов); в – ФАД Р-208 (Тамбов – Пенза)

Характеристика участка концентрации ДТП	Федеральные автомобильные дороги (в пределах Пензенской области)		
	М-5 «Урал»	Р-158	Р-208
Количество участков концентрации ДТП,	26	4	7
в том числе:			
регрессирующих		2	2
стабильных		1	3
прогрессирующих	8	1	2
в том числе:			
малоопасных	6		2
опасных	12	3	4
очень опасных	8	1	1

Виды работ по устранению аварийности на выявленных участках концентрации ДТП и сроки их выполнения назначаются для каждого участка в плановом порядке.

#### Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 17.11.2010 № 228 «О перечне автомобильных дорог общего пользования федерального значения». – М., 2010. – С. 24.
2. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. – М.: Росавтодор, 2002. – С. 38–47.
3. Методические рекомендации по назначению мероприятий повышения безопасности движения на участках концентрации дорожно-транспортных происшествий. – М.: Информавтодор, 2000. – С. 53–71.
4. Газван, А.-Х. Международные модели оценки уровня безопасности дорожного движения / А.-Х. Газван, К. Асп // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2006. – №3. – С. 28–35.
5. ОДМ «Руководство по устранению и профилактике возникновения участков концентрации ДТП при эксплуатации автомобильных дорог». – М.: Информавтодор, 2009. – С. 52.
6. Чванов, В.В. Методы выявления участков концентрации дорожно-транспортных происшествий на дорогах общего пользования / В.В. Чванов, И.Ф. Живописцев // Новости в строительном деле: сб. ст. науч.-техн. конф. – М.: Информавтодор, 2004. – Вып.4.

#### References

1. Resolution of the RF Government dated 17.11.2010 № 228 «On the list of public roads of Federal significance». – М., 2010. – P.24.
2. Recommendations for ensuring safety on the roads. – М.: Federal road Agency, 2002. – P. 38–47.
3. Guidelines for assigning measures to increase traffic safety in areas of concentration of road accidents. – М.: INFORMAVTODOR, 2000. – P. 53–71.
4. Gazwan, A.-H. International model of assessment of the level of road safety / A.-H. Gazwan, K. Asp // Science and technology in the road sector. – 2006. – №3. – P. 28–35.
5. A guide to the elimination and prevention of occurrence of areas of concentration of road accident in the operation of road vehicles. – М.: Informavtodor, 2009. – P. 52.
6. Chvanov, V.V. Methods to identify areas of concentration of road accidents on the roads / V.V. Chvanov, I.F. Painters // News in the construction business: scientific and technical. conf. Collection of articles. – М.: Informavtodor, 2004. – Issue 4.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Баканова Светлана Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

**Белов Вячеслав Евгеньевич**,  
магистрант кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: vych.belch1@yandex.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Bakanova Svetlana Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

**Belov Vyacheslav Evgenievich**,  
Undergraduate of the department «Heat, Gas  
Supply and Ventilation»  
E-mail: vych.belch1@yandex.ru

## ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫЙ И ВОЗДУШНЫЙ БАЛАНСЫ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ

С.В. Баканова, В.Е. Белов

Представлены тепловой, влажностный и воздушный балансы в помещениях свинооткормочников в теплый и холодный периоды года. Уточняются факторы, влияющие на теплофизические расчеты, без которых фактические параметры воздуха, измеряемые в животноводческих помещениях, значительно отклоняются от расчетных результатов. Предложена методика, позволяющая учесть количество тепла, расходуемое на испарение воды из кормов и от фекалий животных при теплофизических расчетах. Уточняется методика по определению газовыделений.

*Ключевые слова: животноводческие помещения, тепловлажностный и газовый балансы, методика расчетов, теплопоступления, влаговыделения, газовыделения, параметры воздуха*

## THERMAL, HUMIDITY AND AIR BALANCES IN LIVESTOCK PREMISES

S.V. Bakanova, V.E. Belov

The thermal, humidity and air balances in the premises of pig feeders in the warm and cold periods of the year are presented. The factors influencing the thermophysical calculations are clarified, without which the actual air parameters measured in livestock premises deviate significantly from the calculated results. A technique is proposed that allows taking into account the amount of heat spent on evaporation of water from feed and from animal feces during thermophysical calculations. The methodology for determining gas emissions is clarified.

*Key words: livestock premises, heat and humidity and gas balances, calculation methods, heat gain, moisture release, gas release, air parameters*

В настоящее время крупные производители мяса перешли на круглогодичное безвыгульное содержание в помещениях нескольких тысяч свиней. Микроклимат в таких помещениях становится важнейшим фактором, влияющим на продуктивность животных [1]. Соответствие параметров микроклимата оптимальным требованиям в животноводческих помещениях должно контролироваться расчетом тепловлажностного и газового балансов. Уравнение теплового баланса выполняется для теплого и холодного периодов года [2]. Теплый период является более сложным, так как добавляются теплопоступления от солнечной радиации.

Ниже рассматриваются тепловой и влажностный балансы, а также газовой выделения в помещении содержания свиней в теплый период года, и уточняются факторы, влияющие на теплофизические расчеты.

Для теплого периода года уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_c + Q_p + Q_d + Q_k + Q_\phi + Q_{пр} - Q_{и1} - Q_{и2} - Q_{и3} = Q_v, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – суммарные явные выделения тепла от животных, Вт;  $Q_p$  – теплопоступления от солнечной радиации, Вт;  $Q_d$  – тепло, выделяемое при дыхании свиней, Вт;  $Q_k$  – тепловыделения от кормов, Вт;  $Q_\phi$  – тепловыделения от фекалий, Вт;  $Q_{пр}$  – тепло, вносимое приточным воздухом, Вт;  $Q_{и1}$  – тепло, расходуемое на испарение влаги со смоченной поверхности пола, Вт;  $Q_{и2}$  – тепло, идущее на испарение воды из кормов, Вт;  $Q_{и3}$  – тепло, расходуемое на испарение воды из фекалий, Вт;  $Q_v$  – тепло, которое должно отводиться общеобменной вентиляцией, Вт.

Уравнение влажностного баланса для теплого периода года, кг/ч, имеет вид:

$$W + W_1 + W_k + W_\phi + W_{пр} = W_v, \quad (2)$$

где  $W$  – влаговыделения с мокрых полов, кг/ч;  $W_1$  – влаговыделения при дыхании свиней, кг/ч;  $W_k$  – влаговыделения от кормов, кг/ч;  $W_\phi$  – влаговыделения от фекалий, кг/ч;  $W_{пр}$  – влагопоступления с приточным воздухом, кг/ч;  $W_v$  – количество водяных паров, которое необходимо удалить из помещения общеобменной вентиляцией, кг/ч.

Известны методики определения величин  $Q_c$ ,  $Q_d$ ,  $Q_{и1}$ ,  $Q_p$ ,  $Q_{пр}$ ,  $W$ ,  $W_1$ ,  $W_{пр}$ . Определение остальных величин, входящих в тепловлажностный баланс, требует уточнения. Ниже это рассматривается.

Тепловыделение от кормов, Вт:

$$Q_k = \alpha \cdot F \cdot \xi \cdot (t_k - t_n), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности кормов окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F$  – горизонтальная площадь кормушек, м<sup>2</sup>;  $\xi = 1,15$  – коэффициент извилистости кормов;  $t_k$  – средняя температура кормов, °C;  $t_n$  – средняя температура в помещении, °C.

Коэффициент  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C), определяется как:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_d, \quad (4)$$

где  $\alpha_k$ ,  $\alpha_d$  – общеизвестные коэффициенты теплообмена конвекцией и лучеиспусканием, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Тепловыделения от фекалий, Вт:

$$Q_\phi = c \cdot G_\phi \cdot (t_\phi - t_n) / 3,6, \quad (5)$$

где  $c$  – теплоемкость фекалий, кДж·(кг·°C);  $t_\phi$  – температура на поверхности фекалий, °C.

Величины  $t_k$  и  $t_\phi$  находим по формулам:

$$t_k = 0,5 \cdot (t'_n + t_n), \quad (6)$$

$$t_\phi = 0,5 \cdot (t''_n + t_n), \quad (7)$$

где  $t'_n$  и  $t''_n$  – начальные средние температуры соответственно кормов и фекалий, °C.

Тепло, идущее на испарение воды из кормов, Вт:

$$Q_{и2} = W_k \cdot r / 3,6 . \quad (8)$$

Тепло, расходуемое на испарение воды из фекалий, Вт:

$$Q_{и3} = W_\phi \cdot r / 3,6 , \quad (9)$$

где  $r$  – скрытая теплота испарения воды, кДж/кг.

Влаговыведения из кормов, кг/ч:

$$W_k = k \cdot \beta \cdot \psi , \quad (10)$$

где  $k$  – общий расход кормов, кг/ч;  $\beta=0,8$  – доля содержания влаги в кормах;  $\psi$  – коэффициент, учитывающий количество испаряющейся влаги из кормов, определен экспериментально и составляет: 0,1 – для теплого периода; 0,2 – для холодного периода.

Влаговыведения из фекалий, кг/ч:

$$W_\phi = G_\phi \cdot \beta_1 \cdot \psi_1 , \quad (11)$$

где  $G_\phi$  – количество фекалий, выделяемых животными, кг/ч;  $\beta_1$  – доля содержания влаги в фекалиях, равная 0,9 – на полу; 0,8 – в канализационном канале;  $\psi_1$  – коэффициент, учитывающий количество испаряющейся влаги из фекалий, определен экспериментально и составляет: 0,2 – для холодного и переходного периодов; 0,3 – для летнего периода.

При технологии откорма животных сухими кормами величины  $Q_k$ ,  $Q_{и2}$  и  $W_k$  должны исключаться из тепловлажностного баланса. Сухие корма, как правило, поступают в цех с температурой, равной средней температуре внутреннего воздуха. Для поддержания в холодный период года в свинооткормочнике теплового режима необходимо дополнительно учитывать теплотери через ограждающие конструкции здания.

Уравнение теплового баланса для холодного периода года:

$$Q_c + Q_d + Q_k + Q_\phi - Q_{инф} - Q_{и2} - Q_{и3} - Q_t = \pm Q_v , \quad (12)$$

где  $Q_{инф}$  – тепло, расходуемое для подогрева инфильтрационного воздуха, Вт;  $Q_t$  – теплотери через ограждающие конструкции здания, Вт;  $\pm Q_v$  – тепло, которое необходимо подавать или удалять из помещения, Вт.

Уравнение влажностного баланса в помещении для зимнего периода будет аналогично уравнению (2).

Предложенная методика позволяет уточнить теплофизические расчеты свинооткормочников, основанные на тепловлажностном балансе помещений. Отсутствие расчетов тепла, расходуемого на испарение воды из кормов, фекалий, приводит к тому, что расчетные результаты значительно отклоняются от фактических параметров воздуха, замеряемых в животноводческих помещениях.

Что касается газовыведений в свинооткормочниках: происходит выделение углекислого газа при дыхании животных. Интенсивность выделений зависит от массы животного. Данные о количестве выделяющегося углекислого газа в литературе представлены и пояснений не требуют. Обычно в воздухе животноводческих помещений выделений сероводорода нет или определяются его следы. Выделение сероводорода происходит в момент перемещения жидкого навоза по каналам (например, при их откачивании). Ввиду малого количества сероводорода в воздухе помещений можно его не определять.

Непрерывно в воздух животноводческих помещений выделяется аммиак. Эти выделения происходят от канализационных каналов, перекрытых решетками, и от

пола, смоченного фекалиями. О количестве выделяющегося аммиака точных данных в литературе не установлено.

Можно рекомендовать определять количество, кг/ч, аммиака ( $\text{NH}_3$ ) по выражению

$$G_{\text{NH}_3} = \sum_{i=1}^{i=S} G_{\text{фи}} \cdot m_i \cdot g_{\text{п}} + \delta \cdot B \cdot m \cdot g_{\text{р}} ; \quad (13)$$

здесь  $\sum_{i=1}^{i=S} G_{\text{фи}}$  – количество фекалий, выделяемое одним животным данной возрастной группы, кг (справочные данные);  $m_i$  – количество животных в помещении данной возрастной группы;  $S$  – число возрастных групп животных, находящихся в помещении;  $g_{\text{п}}$  – количество аммиака, выделяемого 1 кг фекалий, до попадания их в канализационный канал, кг/(кг·ч);  $\delta$  – ширина решетки канализационного канала, м;  $B$  – длина решетки, м;  $m$  – количество канализационных каналов;  $g_{\text{р}}$  – выделение аммиака с 1 м<sup>2</sup> решетки канала, кг/(м<sup>2</sup>·ч).

Входящие в формулу (13) величины  $g_{\text{п}}$  и  $g_{\text{р}}$  определены экспериментально, непосредственно в свинооткормочниках.

Полученные количественные показатели аммиака позволяют рассчитать воздушный баланс, производительность общеобменной приточной вентиляции, что необходимо для поддержания нормируемого газового состава воздуха в животноводческих помещениях. Следует помнить, что особенно острой становится проблема вентиляции в свинооткормочных помещениях рядом с навозными каналами, где вредные газы с неприятными запахами затрудняют работу обслуживающего персонала и влияют на состояние животных. Удалить газовые вредности из помещения свинооткормочника также можно при условии знания количества выделенных вредных газов за определенное время.

### Список литературы

1. Нечаев, В.И. Развитие инновационных процессов в животноводстве / В.И. Нечаев, Е.И. Артёмов, С.М. Резниченко [и др.]. – Краснодар: Просвещение-ЮГ, 2007. – 277 с.
2. Блинецов, А.В. Биологические и технологические аспекты интенсификации свиноводства / А.В. Блинецов. – Уфа: БГАУ, 2001. – 93 с.

### References

1. Nechaev, V.I. Development of innovative processes in animal husbandry / V.I. Nechaev, E.I. Artemov, S.M. Reznichenko [etc.]. – Krasnodar: Enlightenment-SOUTH, 2007. – 277 p.
2. Bliznetov, A.V. Biological and technological aspects of pig breeding intensification / A.V. Bliznetov. – Ufa: BGAU, 2001. – 93 p.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 725.1:63(470+571)

DOI 10.54734/20722958\_2022\_1\_120

Московский архитектурный институт  
Россия, 107031, Москва, ул. Рождественка,  
д. 11/4, корпус 1, стр.4

ООО «Институт Мосинжпроект»

Россия, 101000, Москва,  
Сверчков пер., 4/1

**Крылова Марьяна Кирилловна**,  
студентка, архитектор 1-й категории в  
проектной организации ООО «Институт  
Мосинжпроект»

Moscow Architectural Institute

Russia, 107031, Moscow, 11/4, korp.1,  
buid.4, Rozhdestvenka St.

Institute Mosinzhpoeekt

Russia, 101000, Moscow, 4/1,  
Sverchkov Pereulok

**Krylova Mariana Kirillovna**,  
Student, 1-st category architect in Institute  
Mosinzhpoeekt

## АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ КЛАСТЕРОВ И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ В РОССИИ\*

М.К. Крылова

Рассмотрены агропромышленные комплексы (АПК) с точки зрения их пространственно-организационной структуры, а также применяемых в них современных технологических и архитектурных решений. Приведены примеры как существующих кластеров на территории России, так и концепций, находящихся на стадии реализации или разработки. Описан технологический процесс выращивания и обработки сельскохозяйственных культур, состав промышленных объектов на территории АПК, их функциональное назначение и способы сокращения влияния производственных сооружений на окружающую среду. Для сравнения приведены примеры зарубежных АПК, расположенных в схожих с Россией климатических условиях. Рассмотрены схемы формирования объемно-пространственной композиций из теплиц, цехов и заводских зданий, а также используемые технологические решения. Особо выделяются интегрированные в проекты элементы устойчивой архитектуры, их количество и эффективность, а также объем производимого за год урожая и площадь, которая для этого потребовалась.

Приведены примеры АПК, расположенных в других климатических зонах, и комплексы, которые специализируются на производстве других культур. Особое внимание уделено современным технологиям выращивания, в том числе аквапонике. Показано, как новые технологии влияют на экономику, архитектуру, транспорт и здоровье людей.

Выявлены принципиальные различия между отечественной практикой и зарубежной, а также представлены возможные варианты развития данного направления сельскохозяйственных объединений в России. Популяризация агропромышленного урбанизма и кластерное строительство позволят проектировать эффективные экологически устойчивые здания и сооружения, что увеличит объемы производимого сырья и снизит влияние заводской застройки на окружающую среду. Все это создаст положительный имидж России в области сохранения экологии и развития сельского хозяйства.

*Ключевые слова:* агропромышленный комплекс, градостроительная модель, аквапоника, экологическая устойчивость, система замкнутого цикла

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50179 [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/n\\_812/o\\_2105921](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/n_812/o_2105921).



## ARCHITECTURAL SOLUTIONS FOR AGRO-INDUSTRIAL CLUSTERS AND WAYS OF THEIR DEVELOPMENT IN RUSSIA\*

M.K. Krylova

The article examines agro-industrial complexes (AIC) from the point of view of their spatial organizational structure, as well as the modern technological and architectural solutions used in them. Within the framework of the article, several existing projects on the territory of Russia are highlighted and the concepts that are at the stage of implementation or development also described. The technological process of growing and processing agricultural crops, the composition of objects on the territory and their functional purpose and methods of reducing the impact of production facilities on the environment, if any, are described.

Examples of foreign the agro-industrial complexes located in climatic conditions similar to Russia are given. The applied schemes for the formation of a volumetric-spatial composition from greenhouses, workshops and factory buildings, as well as the technological solutions used there, are considered. Particularly highlighted are the elements of sustainable architecture integrated into projects, their quantity and efficiency, as well as the volume of the harvest produced per year and the area that was required for this. It also provides examples of agro-industrial complexes located in other climatic zones, for example, in arid regions, and complexes that specialize in the production of other crops. Special attention is paid to modern cultivation technologies, including more efficient use of aquaponics. It is shown now new technologies greatly affect the economy of cities, people, architecture and transport,

The article reveals the fundamental differences between domestic and foreign practice, and also presents possible options for the development of this direction of agricultural associations in Russia. The popularization of agro-industrial urbanism and cluster construction will allow the design of efficient, environmentally sustainable buildings and structures that will increase the volume of raw materials produced and reduce the impact of factory development on the environment. All this will create a positive image of Russia in the field of environmental preservation and the development of domestic agriculture.

*Keywords: agricultural complex, urban planning model, aquaponics, sustainability, closed loop system*

АПК играют ведущую роль в обеспечении продовольствием постоянно растущего населения Земли, а также в развитии различных производств и производительных сил, связанных с сельским хозяйством и экологией. Изучение деятельности и эффективности сельскохозяйственных кластеров с точки зрения экологии, технологий и жизненного цикла позволит решить вопросы не только увеличения производительности, но и формирования процветающих населенных пунктов с сильным промышленным центром.

Значение агропромышленных комплексов в масштабах России с точки зрения экономики сложно переоценить, так как темпы производства постоянно растут, а вместе с ними – и показатели экспорта продукции. Современные тенденции к здоровому образу жизни приводят к тому, что производство пшеницы становится менее популярным. А в климатических условиях нашей страны гораздо проще производить быстрорастущие зеленые культуры [1, 2].

Рассмотрим успешную модель развития сельскохозяйственного кластера на примере агрохолдинга «Московский». Он находится в 4-м климатическом поясе России [3, 4]. В первую очередь важно отметить объемно-пространственную композицию комплекса. Общая территория данного хозяйства составляет 55 гектар, которые разделены на разные функциональные зоны. Наиболее значимую часть занимают теплицы для выращивания зеленых культур. Ассортимент представлен наиболее востребованными видами овощей, в том числе редкими для наших широт сортами салатов, зеленью в горшочках и ягодами. На территории холдинга построены ультрасовременные роботизированные теплицы, где в качестве основной технологии производства применяется аквапоника. Собственная электростанция обеспечивает бесперебойную работу оборудования в автономном режиме. За счет высокой технологичности контакт

\* The reported study was funded by RFBR, project number 20-15-50179 [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/n\\_812/o\\_2105921](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/n_812/o_2105921)

с продуктом снижен до минимума. В качестве защиты от вредителей специалисты «МосАгро» используют современный биологический метод: выращивают в производственной лаборатории насекомых-энтомофагов и шмелей, которые опыляют растения. В отдельную функциональную зону выделено пространство, на котором выращиваются цветы; этот процесс несколько отличается от производства овощей и фруктов и может существовать отдельно, как самостоятельное предприятие. Также отдельный сектор агрохолдинга занимает сервисно-распределительный центр с отлаженной логистикой обработки продукции: фасовка, упаковка и отгрузка. Технология процесса производства приспособлена для того, чтобы создать идеальные условия хранения продуктов при температуре от 0°C до +10°C в процессе всех видов работ, в том числе: погрузо-разгрузочных работ, сортировки, комплектации и паллетирования груза. В непосредственной близости находится большой паркинг на 150 машин. Такое число машин в первую очередь связано с объемами производства и расстоянием от места выращивания продукции до места ее реализации. Согласно официальным данным площадь застройки распределительного центра составляет около 10 процентов от всей территории холдинга, а сам паркинг занимает еще 10 процентов. Данные функциональные зоны можно рассматривать как единое целое, так как они неразрывно связаны между собой.

На территории комплекса можно выделить еще одну важную зону, которая отвечает за повышение интереса туристов и местных жителей к агропромышленности. Это большое выставочное пространство и магазин цветов и растений.

Подводя итог анализа объемно-пространственной структуры агрохолдинга «Московский», стоит отметить, что, несмотря на максимальную автоматизированность производства всех зеленых культур и растений, это не повлияло на архитектурный облик сооружений. В данном комплексе не используется технология вертикального озеленения, что значительно увеличивает площадь выращивания продукции. Однако в процентном соотношении теплицы занимают всего 36 процентов от общей площади комплекса, что является невысоким показателем.

В качестве альтернативной модели агрохолдинга можно рассмотреть проект сельскохозяйственного кластера «Белая дача» на территории Тамбовской области, который был начат в 2015 году.

Это уникальный проект комплексной реконструкции бывшего совхоза СХПК «Цна», который впечатляет своими размерами. За один год была организована система орошения полей площадью в 320 гектаров. Основным направлением производства выбраны выращивание и переработка картофеля. Проект предусматривал строительство картофелехранилища вместимостью более 7 500 тонн. А для производства используется новейшее микроклиматическое оборудование с автоматической системой увлажнения и охлаждения. На данный момент комплекс стремительно развивается, а объем выращиваемого картофеля планируется увеличить до 45000 тонн. Необходимо отметить объем экономических инвестиций, который требуется для реализации данного проекта. На сегодняшний момент стоимость проекта составляет 1,5 миллиарда рублей.

Чтобы увеличить экономическую выгодность проекта, было решено сократить количество удобрений и средств защиты растений при выращивании в открытом грунте; также необходимо уменьшить объем горюче-смазочных материалов. В таких условиях сложно повысить урожайность без использования компьютерных технологий. Производится точный химический анализ почвы, на основе которого рассчитывается норма удобрений и строится карта заданий для поливочной и другой специализированной техники. Инновационный подход технологов «Белой дачи» заключается в создании специальной геоинформационной системы, которая хранит информацию для каждого участка поля и на основе которой разрабатывается индивидуальная система ухода под каждый сезон года. В систему точного земледелия входят все варианты обработки грунта: дифференцированная глубокая обработка, посев, опрыскивание, подкормка, раскисление почвы. Для удобства используется 3D-интерфейс, который в точности отображает и мониторит все процессы на участках по аналогии с BIM-

моделированием зданий. Программа позволяет строить аналитические модели затрат по культурам и применяемым прицепным агрегатам.

Благодаря сотрудничеству с американской компанией DTN можно запланировать все виды работ с высокой долей вероятности на две недели вперед. Это сокращает затраты, увеличивает скорость и точность управления. Цифровизация и автоматизация процессов хранения позволяют хранить картофель одиннадцать месяцев: до середины июня следующего после уборки года.

Примерная площадь комплекса составляет 90 процентов от общей площади всего холдинга «Белая Дача Фарминг», при этом количество сотрудников составляет всего 75 человек [5, 6]. Это пример агрокластера с теми же функциональными зонами, что и у агрохолдинга «Московский», однако здесь не используются теплицы для выращивания. Это в значительной степени увеличивает площадь, необходимую для получения экономически эффективного проекта. Но при такой организации производства необходимость в вертикальном озеленении отпадает.

Объединение большого количества производственных предприятий в одно поселение позволяет значительно увеличить прибыль как частных производителей, так и на уровне государства. Сельское хозяйство не является исключением из этого правила, поэтому во всех странах мира проводятся кампании по инвестированию средств в строительство и разработку концепций агрокластеров, так как это влияет на экономическое развитие стран. Европа и Америка давно занимаются развитием таких проектов. Наиболее удачными примерами агрокластеров являются АПК, ориентированные на современные технологии выращивания и оптимизацию производства, например: пищевой метрокластер на юго-востоке Нидерландов (скотоводческий кластер площадью 100 км<sup>2</sup>), агропарк «Гринпорт», Шанхай, Китай (агропарк площадью 27 км<sup>2</sup>) [7–9], кластер «Агрипорт А7», Нидерланды (тепличный кластер площадью 10 км<sup>2</sup> – крупнейшее производство томатов в Европе) и агропарк «Тапачула» в Мексике (площадью 1,3 км<sup>2</sup>).

При создании кластера за рубежом часто используется концепция города-сада, которая была придумана и спроектирована Эбенизером Говардом [10]. Заключается она в том, чтобы в центре находилась железнодорожная станция, от которой расходились дороги, соединяющие центр с производством и жилыми зданиями по кругу. Все жилые ячейки расположены с южной стороны от основных административных сооружений. Производство находится с противоположной стороны. Однако такая структура не предполагала бесконечного развития и имела свой радиус распространения (эффективность использования) в один километр.

Сейчас часто используют моноцентричную структуру для строительства самостоятельных сельскохозяйственных поселений со своим производством, но особое внимание уделяют современным экологическим требованиям, а также экспертным системам регулирования устойчивого строительства, чтобы минимизировать воздействие на окружающую среду.

Например, в Мексике основной упор делался на то, чтобы объединить производство сырья, поселения и цеха, которые будут перерабатывать полученную продукцию. Это увеличивает стоимость конечного продукта и позволяет создать экономическую базу для развития территории и более экологической среды. Подобная интеграция была успешно проведена с точки зрения объединения растениеводства и животноводства на одной территории. Это привело к повышению внимания со стороны туристов и инвесторов. Производственный кластер, объединяющий несколько цепочек стоимости – от сельхозпроизводства до изготовления продуктов питания, а также логистики и сопутствующих сервисов, позволил внедрить последние достижения в ресурсосберегающих технологиях для создания систем замкнутого цикла с использованием гидропонии и аквапонии. В свою очередь, это привело к сокращению производственного периода и увеличению скорости выпуска итоговой продукции и финальной прибыли [11]. И всё это за счёт объединения большого количества функциональных зон в пространстве одной градостроительной единицы.

Стоит отметить, что в зарубежной практике часто используется совмещение производства в тепличных комплексах и в открытом грунте. Например, кластер «Агрипорт А7» в Нидерландах – это успешный проект, в котором 70 процентов площади комплекса занимают теплицы, оставшееся отведено под плодородные поля. Несмотря на свою гигантскую площадь, проект находится в 30 минутах езды от Амстердама. Однако надо отметить тот факт, что площадь логистического центра больше площади открытого грунта. Грядки для выращивания занимают всего 40 гектар, а комплекс по переработке – 70 гектар. Также частью кластера являются животноводческие фермы и фабрики по переработке их продукции.

В зарубежном исследовании «49 Cities», опубликованном в 2016 году, была обоснована необходимость использования вертикального озеленения для производства растений в агрокластерах, интегрированных в городскую среду. В качестве объекта исследования использовались разные современные градостроительные концепции для крупнейших городов мира, затем выстраивалась объемная 3D-модель комплекса, на основе которой рассчитывались основные показатели соотношения плотности озеленения к площади застройки. Далее приводились ориентировочные показатели объемов производства и перечислялись основные технологии, необходимые для успешной реализации того или иного проекта. Несмотря на то, что изучались экспериментальные концептуальные проекты, некоторые из них не могут быть реализованы, так как в расчете не учитывались экономические затраты на реализацию самого проекта. Данное исследование представляет особый интерес благодаря возможности проанализировать необычные варианты и стратегии развития существующих сельскохозяйственных предприятий.

Особое значение в исследовании уделяется жилому сектору, который неизменно входит в состав выбранных проектов. Например, проект Ле Корбюзье «Радиальный город» 1935 года был тщательно восстановлен и реконструирован в качестве аналитической модели. Основную площадь занимает промышленный комплекс (67 процентов от общей площади), при этом объемно-пространственная структура кластера такова, что 47 процентов градостроительного объема представляют собой вертикальные теплицы [12]. Помимо того, что это был революционный проект для своего времени, на его примере можно проследить экономическую выгоду такого проекта в условиях быстрорастущих городов. Отдельное внимание стоит уделить тому, что с развитием технологий человечество постепенно приближается к возможности реализации масштабных сооружений благодаря повсеместной интеграции технологии аквапоники в производственные процессы [13–15].

На опыте успешного американского проекта под названием «Vertical Farming» можно увидеть, что использование технологии гидропоники полностью оправдано и является необходимым шагом к развитию агрокластеров. Вертикальная ферма использует различные гидропонные системы, а также естественное и дополнительное искусственное освещение для производства различных культур, включая помидоры, салат, травы и зелень. Главная инновация этого проекта – вертикальная вращающаяся система выращивания, которая беспрепятственно поднимается с уровня земли до второго этажа по южному фасаду [18]. Гидропонные желоба связаны с вертикальной цепной системой, которая проходит сквозь всю ферму сверху донизу. Вертикальный механизм поворачивается на 90 градусов и создает горизонтальную плоскость посева для сбора урожая на втором этаже. Кроме того, здесь находятся цех для проращивания семян и столы для выращивания рассады, в том числе и особенное место для ростков зелени. Аналогичная зона планируется на первом этаже для других культур, а на третьем этаже под застекленной крышей теплицы расположена подвесная канатная установка для выращивания помидоров и винограда, которые наиболее чувствительны к дневному освещению. Центр трехэтажной теплицы занимает «атриум с живой стеной», главная особенность которой заключается в том, что через него проходит вращающаяся система выращивания, состоящая из трех вертикально расположенных ярусов и смотровых площадок с видом на все уровни, что позволяет посетителям осматривать зоны с разными сельскохозяйственными культурами. В дальнейшем пла-

нируется развитие этого небольшого комплекса с помощью искусственной замкнутой экосистемы, в которой ключевыми являются три типа живых организмов: водные животные (обычно рыбы), растения и бактерии. Такая технология экологически безопасна. Работает по принципу экосистемы рыб и растений: рыбы обеспечивают растениям питание, а растения очищают воду. Суть метода — в использовании отходов жизнедеятельности водных животных (рыб, креветок) в качестве питательной среды для растений. Водные животные выделяют токсичные для них самих продукты жизнедеятельности: азотистые, калийные, фосфорные соединения, углекислый газ. Накопление этих веществ в воде представляет главную проблему как в замкнутой промышленной аквакультуре, так и в простом аквариуме. Эти же вещества абсолютно необходимы в гидропонике, и их добавляют в воду для получения питательных растворов для растений. В аквапонике эта проблема решается сама собой: продукты жизнедеятельности рыб утилизируются бактериями и растениями.

Недостатки данной технологии можно видеть на примере Бангладеша, одной из самых густонаселенных стран мира, где большинство фермеров используют агрохимикаты для увеличения производства продовольствия и его срока хранения, ведь в стране отсутствует надзор за уровнем безопасности химических веществ в пищевых продуктах, предназначенных для потребления человеком. В борьбе с этой проблемой на кафедре аквакультуры в Бангладешском аграрном университете в Маймансингхе команда под руководством профессора доктора М.А. Салама создала план недорогой аквапонной системы, обеспечивающей не содержащей химикатов продукцией людей, живущих в неблагоприятных климатических условиях, таких, как склонные к засоленности южные районы и подверженные наводнениям районы в восточном регионе [19]. Работа доктора Самала сформировала новый вид натурального сельского хозяйства для микропроизводственных задач, тогда как проектные работы Чоудхари (Chowdhury) и Граффа (Graff) направлены исключительно на прибыль. Последний из этих двух подходов используется преимущественно в экономике масштабов (экономия, обусловленная ростом масштаба производства). В связи с этим нужно отметить необходимость использования современного компьютерного обеспечения для контроля и эффективного применения аквапонии в промышленных масштабах.

При разработке градостроительной модели агрокластера необходимо в первую очередь учитывать современные технологии. Аквапоника в России пока не распространена, но уже существуют компании, которые занимаются продвижением данной технологии на территории нашей страны. Например, компания Ifarm с системой автоматизированного управления распределенной системы ферм и набором выверенных бизнес-инструментов [20] в основу развития заложила использование современных технологий: IT-датчики и контроллеры, роботизированные системы полива, технологии посадки и сбора урожая. Производство съедобных растений в промышленных объемах – это технически сложно и финансово затратно: помимо дорогостоящей инфраструктуры нужно привлекать квалифицированных высокооплачиваемых специалистов, на которых приходится от 40 до 60 % финансовых затрат фирм. Ifarm предлагает инновационные решения, благодаря которым можно выращивать свежую зелень, ягоды и цветы по всему миру, независимо от климата и качества почвы, рядом с потребителем [21]. Среди них:

- 1) программное обеспечение Growtune для управления вертикальными фермами с помощью искусственного интеллекта;
- 2) автоматизированные вертикальные фермы для выращивания салатов и микрозелени и земляничные вертикальные фермы;
- 3) светодиодные лампы фитоактивного освещения полного спектра собственной разработки;
- 4) растворные узлы для вертикальных ферм.

Типология агрокластеров разнообразна, но необходимо обозначить ее основной принцип. Агрокластер – это объединение по экономическому признаку на одной территории нескольких производственных структур с независимым жилым фондом и административным центром. Независимая экономическая база, а также увеличенный

спектр производимой продукции позволяют агрокластеру развиваться и оставаться самостоятельной единицей, увеличивая свои размеры и влияние. Только такое объединение обеспечивает экономическую безопасность при интеграции экологических технологий, а также делает безопасным окружающую среду и минимизируют вредные выбросы от промышленных сооружений. Что касается функционального зонирования, принципиальные отличия современных кластеров от экспериментальных поселений предыдущих поколений – это объединение производства и научно-исследовательской базы в виде научного центра.

Наиболее успешным вариантом развития агрокластеров в России станет создание больших производственных комплексов в интеграции с поселением, ориентированных на привлечение большого количества людей непосредственно на предприятие [22, 23]. На основе проведенного анализа можно выделить следующие этапы создания успешной градостроительной модели агрокластера в России:

1. Объединение разных типов производств – от выращивания зеленых культур, овощей и фруктов в теплицах до животноводческих ферм с перерабатывающими предприятиями.

2. Создание обширного жилого сектора для рабочих и местных жителей.

3. Создание на территории кластера благоустроенных туристических центров для привлечения большого количества людей и повышения интереса к вопросам сельского хозяйства [24–26].

4. Создание научных лабораторий и помещений для проведения мастер-классов для обучения новых специалистов, повышения общей квалификации местного населения, проведения культурных мероприятий с целью привлечения внимания к проблемам экологической обстановки в мире [27, 28].

На формирование объемно-планировочной структуры агрокластеров также влияет ряд факторов: социальные (уровень вовлечения общества в проблемы агрокластеров), градостроительные (органичное взаимодействие с окружающей средой и ландшафтом), экономические (частные инвестиции и государственная поддержка), природно-климатические (особенности климата и рельефа, а также возможность организации процесса выращивания в открытом грунте), транспортные (особенности расположения в непосредственной близости к точкам сбыта продукции).

В функциональном зонировании агрокластеров (модели агропоселения) можно выделить основные категории. Самая большая категория любого кластера – это жилой сектор, в котором предполагается размещать специалистов, непосредственно работающих на заводах, туристов и местных жителей. В производственном секторе предполагается размещение всех промышленных предприятий. В зависимости от структуры он должен быть расположен в северной части любого поселка или в зоне с наименьшим освещением и на максимальном расстоянии от первого сектора. Несмотря на то, что данная зона должна быть отделена от всех остальных, она является сердцем любого сельскохозяйственного поселения, поэтому требуется ряд мероприятий по благоустройству её территории и обустройству рекреационных зон. Доступ в данную часть посёлка должен быть обеспечен как для местных жителей, так и для туристов [29–32].

Связующим элементом для двух основных секторов является административный центр [33]. В него также входят здания офисов местных компаний, культурные центры, информационные киоски и шоурумы. Эта зона может быть объединена с туристической зоной или быть самостоятельной. Места, предназначенные исключительно для привлечения туристов, должны включать в себя гостиницы и развлекательные заведения, кафе или бары.

Последняя функциональная зона – это исследовательская база, которая может состоять из единого научно-исследовательского центра или из нескольких лабораторий и экспериментальных сооружений для проведения опытов и апробации новых технологических решений [34, 35].

С учётом всех функциональных зон архитектурно-планировочная структура АПК должна быть интегрирована с рельефом и адаптирована к любой климатической зоне.

Использование строительных материалов также должно быть строго регламентировано. Архитектура должна быть современной, экологически устойчивой. Последние достижения в проектировании зеленых зданий должны быть объединены с использованием местных строительных материалов и древесины [36–39].

Вне зависимости от структуры агрокластера в первую очередь важно сформировать его центр. Без промышленного центра и жилого блока невозможно организовать строительство всех остальных функциональных зон кластера. Обеспечение транспортной доступности между всеми элементами поселения также является неотъемлемой частью любого градостроительного объекта. Отделение промышленных зон от остальных зелеными поясами является успешной практикой и применяется во многих проектах, что также необходимо использовать и в дальнейшем.

Многофункциональность сельскохозяйственного поселения является основой его самодостаточности и экономической безопасности. Необходимо обустраивать общественные территории для проведения культурных мероприятий разного профиля, в том числе ярмарок. Это, в свою очередь, привлечет большое количество туристов, а продажа производимых на данной территории продуктов обеспечит популярность данного направления. Взаимодействие всех секторов агропромышленного комплекса через благоустроенные площадки, рекреационные зоны и общественные центры увеличит привлекательность данных территорий [40, 41].

Экологическая устойчивость поселений обуславливается несколькими факторами. Недостаточно просто использовать ресурсосберегающие технологии при производстве, чтобы добиться действительно благополучной среды. Применение ветрогенераторов, солнечных батарей, компостных станций, вырабатывающих энергию за счет тепла, излучаемого при переработке удобрений, – все это позволит сэкономить электропитание. Однако наиболее эффективное решение для данного типа градостроительного поселения – создание и применение систем замкнутого цикла. Взаимосвязь между несколькими элементами может обеспечиваться путем использования технологии аквапоники, которая непосредственно влияет на цикл производства, а также при больших габаритах зданий влияет на структуру комплекса [42–45].

Необходимо также помнить про использование экологически чистых материалов при строительстве всех типов сооружений. Транспортная доступность позволит получать все необходимые элементы для строительства в непосредственной близости от разрабатываемого проекта [46–50].

На сегодняшний момент наиболее успешная экономическая модель при проектировании кластера – создание независимого социально активного центра со своей безопасной промышленной зоной. Развитие региональных центров позволит обеспечить независимость всех поселений на территории нашей страны. Каждое поселение может быть адаптировано под культурные ценности и традиции места, в котором оно находится, за счет использования местных материалов.

Любой новый кластер должен соответствовать большому количеству требований. Создание и развитие большого жилого фонда, обучение персонала – всё это должно развивать социальную структуру нового поселения. Взаимодействие между местными жителями и промышленными предприятиями позволит обеспечить большое количество рабочих мест на удаленных от больших городов территориях. Ресурсосберегающие технологии, использованные в проектах АПК, обеспечат успешное взаимодействие сельских поселений и современных технологических решений.

#### Список литературы

1. Barosa, R. Smart Aquaponics with Disease Detection / R. Barosa, Roysing Hassen Sayed, Nagowah Leckraj // Conference on Next Generation Computing (NextComp), Mauritius. – 2019. – P. 1–6.
2. Sanjaykumar, V. Aquaponics is the integration of aquaculture and hydroponics in one production system / V. Sanjaykumar // AQUAPONICS. – 2020.

3. Парошина, И.Г. Городской агропром / И.Г. Парошина // Бизнес-журнал. – М.: Бизнес-журнал, 2013. – С. 72–76.
4. Тарасенко, В.В. Территориальные кластеры: семь инструментов управления / В.В. Тарасенко. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 201 с.
5. Ахметов, В.Я. Продовольственная безопасность регионов России: проблемы и перспективы организации производства отечественной экологически чистой этнопродукции (на примере Зауралья Республики Башкортостан) / В.Я. Ахметов, И.Р. Тулькубаев; Евразийский Союз Ученых. – СПб.: ООО «Логика+», 2014. – 604 с.
6. Кострова, Ю.Б. Региональная экономическая безопасность и антикоррупционная политика: оценка, управление, совершенствование: монография / Ю.Б. Кострова, В.Н. Минат. – Рязань: Концепция, 2014. – 312 с.
7. Щетинина, И.В. Агропромышленные кластеры и их роль в инновационном развитии агропромышленного комплекса России / И.В. Щетинина // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции / под общ. ред. Н.В. Фадейкиной. – 2014. – С. 74–81.
8. Коршаков, Ф.Н. Оценка экологической устойчивости сельских населенных мест: состояние вопроса / Ф.Н. Коршаков, П.М. Жук. – М.: Architecture and Modern Information Technologies, 2021. – С. 247–262.
9. Kurokawa, Kisho. Philosophy of Urban Design and Its Planning Method Tokyo: Shokokusha / Kisho Kurokawa. – 1995. – С. 250.
10. Фюкс, Ральф. Зеленая революция: экономический рост без ущерба для экологии / Ральф Фюкс. – М.: Альпина нон-фикшн, 2015. – 330 с.
11. Ежевский, А.А. Тенденции машинно-технологической модернизации сельского хозяйства / А.А. Ежевский, В.И. Черноиванов, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 244 с.
12. Wood, D. 49 Cities / D. Wood, A. Andraos. – Amsterdam: Linco, 2016. – С.127.
13. Семенова, В.А. Производственный доклад руководителя группы компаний «Белая Дача» / В.А. Семенова // Вестник Российской Академии Наук. – 2019. – Т. 89. – С.545.
14. Goddek, S. Aquaponics and Global Food Challenges / S. Goddek // Aquaponics Food Production Systems. Springer International Publishing. – 2018. – P. 17.
15. Smeets, Peter. Metropolitan Food Clusters / Peter Smeets, Alterra Wageningen // 17th TCI Global Conference. – Monterrey, 2014.
16. Доржиева, Е.В. Формирование и развитие конкурентоспособных агропромышленных кластеров на мезоуровне экономики / Е.В. Доржиева. – СПб.: Изд-во университета управления и экономики, 2012. – 168 с.
17. Proksch, Gundula. Creating Urban Agricultural Systems / Proksch Gundula. – New York: Routledge, 2017. – 367 p.
18. Якушев, В.В. Точное земледелие: теория и практика / В.В. Якушев. – СПб.: ФГБНУ ФГБ Санкт Петербург, 2016. – 364 с.
19. Гилман, Р. Эко-деревни и устойчивые поселения / Р. Гилман. – СПб.: Центр гражданских инициатив, 1991. – 266 с.
20. Сердобинцев, Д.В. Мировой, европейский и российский опыт развития кластерной политики в агропромышленном комплексе / Д.В. Сердобинцев, О.В. Матвеева, Л.В. Сорокина // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–8. – С. 1825–1830.
21. Gandy, M. The Paris Sewers and the Rationalization of Urban Space / M. Gandy // Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, Great Britain. – 1999. – No. 24,1. – P. 23–44.
22. Watson, Julia. Lo-TEK Design by Radical Indegenism / Julia Watson. – New York: TASCHEN, 2017. – 367 p.
23. Fesses, M. Helix Plan and Agricultural City / M. Fesses // Urbanos Protopus Space Design. – London, 1978. – N.163.
24. Kurokawa, Kisho. Philosophy of Urban Design and Its Planning Method Tokyo: Shokokusha / Kisho Kurokawa. – 1995. – P. 250.



25. Kurokawa, Kisho. *Retrospective Kurokawa Kisho / Kisho Kurokawa*. – Paris: Maison de la Culture du Japon a Paris, 1998. – P. 58.
26. Kurokawa, Kisho. *Kisho Kurokawa: from the age of the machine to the age of life / Kisho Kurokawa*; Ed. Dennis Sharp. – London: BookART, 1998.
27. Юнусова, П.С. Формирование агропромышленных кластеров как инструмент импортозамещения в регионах СКФО. Региональные проблемы преобразования экономики / П.С. Юнусова. – М., 2021. – P.5–12.
28. Носов, В.В. Дифференциация государственной поддержки при страховании зерновых культур / В.В. Носов, В.В. Королев // Никоновские чтения. – 2002. – № 7.
29. Логинов, В.Г. Сельское хозяйство и регулирование продовольственных рынков. Власть, бизнес и крестьянство: механизмы эффективного воздействия / В.Г. Логинов. – М.: Энциклопедия российских деревень, 2002.
30. Леметти, Ю.А. Кластерная политика устойчивого развития сельских территорий Тверского региона / Ю.А. Леметти // Устойчивое развитие АПК регионов: ситуация и перспективы: международная научно-практическая конференция. – 2015. – С.42–49.
31. Крысанова, Л.В. Состояние организации системы внутреннего контроля на предприятиях АПК различных организационно-правовых форм в условиях модернизации экономики» / Л.В. Крысанова, И.В. Лучкова // Аграрная наука как основа продовольственной безопасности региона: материалы 66-й Междунар. науч.-практ. конф. – 2015. – Ч. 3. – С. 116–120.
32. Краснощеков, Н.В. Инновационное развитие сельскохозяйственного производства России / Н.В. Краснощеков. – ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 388 с.
33. Крылатых, Э.Н. Развитие информационных систем для реализации многофункциональности сельского хозяйства и агропродовольственной системы / Э.Н. Крылатых // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2014. – № 2. – С. 8–9.
34. Настин, А.А. Формирование системы аграрных кластеров России / А.А. Настин, А.С. Хухрин [и др.] // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2010. – № 9.
35. Воитлева, З.А. Государственное регулирование сельского хозяйства как инструмент повышения его эффективности / З.А. Воитлева // Новые технологии. – Майкоп, 2011. – 260 с.
36. Ахметов, В.Я. Этноэкономика и сельское развитие: опыт локального исследования в этнически однородном территориальном сообществе / В.Я. Ахметов, Г.И. Бердникова, Г.И. Шагибалова // Региональная экономика: теория и практика. – 2010. – № 29 (164). – С. 36–42.
37. Ушачева, И.Г. Инновационное развитие АПК субъектов Российской Федерации: опыт, проблемы / И.Г. Ушачева, И.С. Санду, В.Г. Савенко. – М.: ООО «Столичная типография», 2008. – 152 с.
38. Ковалёва, А.Е. Анализ состояния и пути совершенствования инновационной деятельности сельскохозяйственных производителей Смоленской области / А.Е. Ковалёва, А.В. Белокопытов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 3. – С. 368–372.
39. Крысанова, Л.В. Состояние организации системы внутреннего контроля на предприятиях АПК различных организационно-правовых форм в условиях модернизации экономики» / Л.В. Крысанова, И.В. Лучкова // Аграрная наука как основа продовольственной безопасности региона: материалы 66-й Междунар. науч.-практ. конф. – 2015. – Ч.3. – С. 116–120.
40. Елисева, И.И. Общая теория статистики / И.И. Елисева, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 656 с.
41. Ежевский, А.А. Тенденции машинно-технологической модернизации сельского хозяйства: науч. аналит. обзор / А.А. Ежевский, В.И. Черноиванов, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 244 с.

42. Дацюк, П.В. Повышение эффективности инновационных процессов в АПК / П.В. Дацюк, В.К. Сидоров, Ю.И. Клименко. – М.: Российская академия кадрового обеспечения АПК, 2007. – 102 с.
43. Гомелько, Т.В. Регулирование продовольственного рынка в условиях инновационного развития (теория, методология, практика) / Т.В. Гомелько. – Брянск, 2012. – 323с.
44. Гимади, И.Э. Основные направления повышения конкурентоспособности сельского хозяйства региона / И.Э. Гимади, А.С. Журавлев, Ю.Ф. Чистяков // Препринт. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2005. – С. 41.
45. Волобуева, Т.А. Кооперация и интеграция малых форм хозяйствования в аграрном секторе экономики / Т.А. Волобуева // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – №35 (434). – С.14–21.
46. Богданова, О.В. Методические аспекты кластерообразования в аграрном секторе экономики региона / О.В. Богданова // Экономические исследования. – Краснодар, 2011. – №5. – С.1–3.
47. Ахметзянова, Э.Р. Стратегия развития социально-экономического потенциала региона: кластерная модель / Э.Р. Ахметзянова, Э.Н. Валеева // Национальный интерес: приоритеты и безопасность. – 2013. – № 11. – С. 41–44.
48. Щербинин, Ю.В. Аквапоника – технология сельского хозяйства будущего / Ю.В. Щербинин // Сборник информационных материалов (для оказания консультационной помощи сельхозтоваропроизводителям). – Белгород: Департамент агропромышленного комплекса Белгородской области ОГАУ «Инновационно-консультационный центр АПК», 2015.
49. Моисеев, А.В. Меры по совершенствованию эффективности производства в отрасли АПК / А.В. Моисеев // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам XII Всероссийской конференции молодых ученых. – Краснодар, 2019.
50. Тритяк, Ю.А. Конкурентоспособность готовой продукции сельского хозяйства как условие эффективности ее производства / Ю.А. Тритяк // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам XII Всероссийской конференции молодых ученых. – Краснодар, 2019.

## References

1. Barosa, R. Smart Aquaponics with Disease Detection / R. Barosa, Roysing Hassen Sayed, Nagowah Leckraj // Conference on Next Generation Computing (NextComp), Mauritius. – 2019. – P. 1–6.
2. Sanjaykumar, V. Aquaponics is the integration of aquaculture and hydroponics in one production system / V. Sanjaykumar // AQUAPONICS. – 2020.
3. Paroshina, I.G. Urban Agroprom / I.G. Paroshina // Business-Magazine. – М.: Business-Magazine, 2013. – P. 72–76.
4. Tarasenko, V.V. Territorial clusters: Seven Management Tools / V.V. Tarasenko. – М.: Alpina Publisher, 2015. – 201 p.
5. Ahmetov, V.Y. Russian Regions Food Security: problems and prospects for organizing the production of domestic ecologically clean ethnoproducts (on the example of the Trans-Urals of the Republic of Bashkortostan) / V.Y. Ahmetov, I.R. Tulkubaev // Eurasian Union of Scientists. LLC. – Saint Petersburg: «Logic +», 2014. – P. 604.
6. Kostrova, U.B. Regional economic security and anti-corruption policy: assessment, management, improvement: monograph / U.B. Kostrova, V.N. Minat. – Ryazan: Concept, 2014. – 312 p.
7. Shchetinina, I.V. Agro-industrial clusters and their role in the innovative development of the agro-industrial complex of Russia / I.V. Shchetinina // Collection of scientific papers based on the materials of the International scientific-practical conference. Under the general editorship of N.V. Fadeikina. – 2014. – P. 74–81.

8. Korshakov, F.N. Assessing the Environmental Sustainability of Rural Areas: State of the Art / F.N. Korshakov, P.M. Zhuk. – M.: Architecture and Modern Information Technologies, 2021. – P. 247–262.
9. Kurokawa, Kisho. Philosophy of Urban Design and Its Planning Method Tokyo: Shokokusha / Kisho Kurokawa. – 1995. – C. 250.
10. Ralph, F. Green Revolution: Eco-Friendly Growth / F. Ralph // Intelligent Wachsen. Die grüne Revolution. – M.: Alpina non-fiction, 2015. – P. 330.
11. Ezhevsky, A.A. Trends in machine-technological modernization of agriculture / A.A. Ezhevsky, V.I. Chernoiyanov, V.F. Fedorenko. – M.: FGNU «Rosinformagrotech», 2005. – 244 p.
12. Wood, D. 49 Cities / D. Wood, A. Andraos. – Amsterdam: Linco, 2016. – C.127.
13. Semenova, V.A. Production report of the head of the group of companies «Belaya Dacha» / V.A. Semenova // Publishing house Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 89. – P.545.
14. Goddek, S. Aquaponics and Global Food Challenges / S. Goddek // Aquaponics Food Production Systems. Springer International Publishing. – 2018 – P. 17.
15. Smeets, Peter. Metropolitan Food Clusters / Peter Smeets, Alterra Wageningen // 17th TCI Global Conference. – Monterrey, 2014.
16. Dorzhieva, E.V. Formation and development of competitive agro-industrial clusters at the meso-level of the economy / E.V. Dorzhieva. – St. Petersburg, Publishing House of the University of Management and Economics, 2012. – 168 p.
17. Proksch, Gundula. Creating Urban Agricultural Systems / Proksch Gundula. – New York: Routledge, 2017. – 367 p.
18. Yakushev, V.V. Precision agriculture: theory and practice / V.V. Yakushev. – St. Petersburg: FGBNU FGB, 2016. – 364 p.
19. Gilman, R. Eco-villages and sustainable settlements / R. Gilman. – St. Petersburg: Center for Civil Initiatives, 1991. – 266 p.
20. Serdobintsev, D.V. World, European and Russian experience in the development of cluster policy in the agro-industrial complex / D.V. Serdobintsev, O.V. Matveeva, L.V. Sorokina // Fundamental research. – 2014. – No. 9-8. – P. 1825–1830.
21. Gandy, M. The Paris Sewers and the Rationalization of Urban Space / M. Gandy // Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, Great Britain. – 1999. – No. 24,1. – P. 23–44.
22. Watson, Julia. Lo-TEK Design by Radical Indegenism / Julia Watson. – New York: TASCHEN, 2017. – 367 p.
23. Fesses, M. Helix Plan and Agricultural City / M. Fesses // Urbanos Protopus Space Design. – London, 1978. – N.163.
24. Kurokawa, Kisho. Philosophy of Urban Design and Its Planning Method Tokyo: Shokokusha / Kisho Kurokawa. – 1995. – P. 250.
25. Kurokawa, Kisho. Retrospective Kurokawa Kisho / Kisho Kurokawa. – Paris: Maison de la Culture du Japon a Paris, 1998. – P. 58.
26. Kurokawa, Kisho. Kisho Kurokawa: from the age of the machine to the age of life / Kisho Kurokawa; Ed. Dennis Sharp. – London: BookART, 1998.
27. Yunusov, P.S. Formation of agro-industrial clusters as an instrument of import substitution in the regions of the North Caucasus Federal District / P.S. Yunusov // Regional problems of economic transformation. – M., 2021. – P.5–12.
28. Nosov, V.V. Differentiation of state support for grain insurance / V.V. Nosov, V.V. Korolev // Nikon readings. – 2002. – No. 7.
29. Loginov, V.G. Agriculture and food market regulation. Power, business and peasantry: mechanisms of effective influence / V.G. Loginov. – M.: Encyclopedia of Russian villages, 2002.
30. Lemetti, Yu.A. Cluster policy for sustainable development of rural areas in the Tver region / Yu.A. Lemetti // Sustainable development of the agro-industrial complex of the regions: situation and prospects: international scientific and practical conference. – 2015. – P.42–49.

31. Krysanova, L.V. The state of the organization of the internal control system at agro-industrial complex enterprises of various organizational and legal forms in the context of economic modernization / L.V. Krysanova, I.V. Luchkova // *Agrarian science as the basis of food security in the region: Proceedings of the 66th international scientific and practical conference.* – 2015. – P. 3. – P. 116–120.
32. Krasnoshchekov, N.V. Innovative development of agricultural production in Russia / N.V. Krasnoshchekov. – FGNU «Rosinformagroteh», 2009. – 388 p.
33. Krylatykh, E.N. Development of information systems for the implementation of multifunctionality of agriculture and the agri-food system / E.N. Krylatykh // *Economy of agricultural and processing enterprises.* – 2014. – No. 2. – P. 8–9.
34. Nastin, A.A. Formation of the system of agricultural clusters in Russia / A.A. Nastin, A.C. Khukhrin [etc.] // *Economy of agricultural and processing enterprises.* – 2010. – No. 9.
35. Voitleva, Z.A. State regulation of agriculture as a tool to improve its efficiency / Z.A. Voitleva // *New technologies.* – Maykop, 2011. – 260 p.
36. Akhmetov, V.Ya. Ethnoeconomics and rural development: the experience of local research in an ethnically homogeneous territorial community / V.Ya. Akhmetov, G.I. Berdnikova, G.I. Shagibalova // *Regional economy: theory and practice.* – 2010. – No. 29 (164). – P. 36–42.
37. Ushacheva, I.G. Innovative development of the agro-industrial complex of the constituent entities of the Russian Federation: experience, problems / I.G. Ushacheva, I.S. Sandu, V.G. Savenko. – M.: OOO «Capital Printing House», 2008. – 152 p.
38. Kovaleva, A.E. Analysis of the state and ways of improving the innovative activity of agricultural producers in the Smolensk region / A.E. Kovaleva, A.V. Belokopytov // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal).* – 2013. – № 3. – P. 368–372.
39. Krysanova, L.V. The state of the organization of the internal control system at agro-industrial complex enterprises of various organizational and legal forms in the context of economic modernization / L.V. Krysanova, I.V. Luchkova // *Agrarian science as the basis of food security in the region: Proceedings of the 66th international scientific and practical conference.* – 2015. – P. 3. – P. 116–120.
40. Eliseeva, I.I. General theory of statistics / I.I. Eliseeva, I.I. Yuzbashev. – M.: Finance and statistics, 2004. – 656 p.
41. Ezhevsky, A.A. Trends in machine-technological modernization of agriculture: scientific. analyte. review / A.A. Ezhevsky, V.I. Chernoiivanov, V.F. Fedorenko. – M.: FGNU «Rosinformagrotech», 2005. – 244 p.
42. Datsyuk, P.V. Improving the efficiency of innovation processes in the agro-industrial complex. / P.V. Datsyuk, V.K. Sidorov, Yu.I. Klimenko. – M.: Ros. acad. staffing of the agro-industrial complex, 2007. – 102 p.
43. Gomelko, T.V. Regulation of the food market in the context of innovative development (theory, methodology, practice): dis .... doc. eq. Sciences: 08.00.05 / Gomelko Tatyana Vladimirovna. – Bryansk, 2012. – 323 p.
44. Gimadi, I.E. The main directions of increasing the competitiveness of agriculture in the region. / I.E. Gimadi, V.V. Drokin, A.S. Zhuravlev, Yu.F. Chistyakov. – Preprint. – Yekaterinburg: Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. – P. 41.
45. Volobueva, T.A. Cooperation and integration of small forms of management in the agricultural sector of the economy / T.A. Volobueva // *Economic analysis: theory and practice.* – No. 35 (434). – 2015. – P.14–21.
46. Bogdanova, O.V. Methodological aspects of cluster formation in the agrarian sector of the regional economy / O.V. Bogdanova // *Economic research.* – Krasnodar, 2011. – No. 5. – P.1–3.
47. Akhmetzyanova, E.R. Strategy for the development of the socio-economic potential of the region: cluster model / E.R. Akhmetzyanova, E.N. Valeeva // *National interest: priorities and security.* – 2013. – No. 11. – P. 41–44.

---

48. Shcherbinin, Yu.V. Aquaponics – the technology of agriculture of the future / Yu.V. Shcherbinin, // Collection of information materials on the topic (to provide consulting assistance to agricultural producers). – Belgorod: Department of the agro-industrial complex of the Belgorod region OGAU «Innovation and consulting center of the agro-industrial complex», 2015.

49. Moiseev, A.V. Measures to improve production efficiency in the agro-industrial complex / A.V. Moiseev // Scientific support of the agro-industrial complex: Collection of articles based on the materials of the XII All-Russian conference of young scientists. – Krasnodar, 2019.

50. Trityak, Yu.A. Competitiveness of finished agricultural products as a condition for the efficiency of their production / Yu.A. Trityak // Scientific support of the agro-industrial complex: Collection of articles based on the materials of the XII All-Russian conference of young scientists. – Krasnodar, 2019.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Дерина Мария Александровна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Петрянина Любовь Николаевна**,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Чупряков Максим Алексеевич**,  
студент  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Derina Maria Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Urban Construction and  
Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Petryanina Lyubov Nikolaevna**,  
Associate Professor of the department «Urban  
Construction and Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Chupryakov Maksim Alekseevich**,  
Student  
E-mail: gsia@pguas.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Чупряков

Проведен сравнительный анализ объемно-планировочных и конструктивных решений проектируемых зданий по технико-экономическим показателям методом приведения к сопоставимым условиям. Установлено, что выбранная форма плана и геометрические размеры соответствуют условиям проекта-аналога. Приведены варианты схем зданий с различными параметрами толщины перекрытия, высоты этажа и помещений. Исследована зависимость показателя площади покрытия от количества этажей здания. Предложен метод преобразования проектных решений на основе показателей удельной площади наружных стен здания, приходящейся на единицу застраиваемой площади, усредненной высоты помещений при разных высотах этажей здания и площади покрытия для проведения сравнения. Показано, что при увеличении высоты помещений на 18 % стоимость 1 м<sup>2</sup> общей площади возрастает на 8–12 %.

*Ключевые слова: здание, проектное решение, технико-экономическая эффективность, проект-аналог, наружные стены, покрытие, высота этажа, стоимость*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF DESIGN SOLUTIONS FOR RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS

M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Chupryakov

Comparative analysis of the space-planning and structural solutions of the projected buildings according to technical and economic indicators by the method of reduction to comparable conditions is carried out. It is established that the selected shape of the plan and geometric dimensions correspond to the conditions of the analog project. Variants of schemes of buildings with different parameters of the thickness of overlap, the height of the floor and premises are given. The dependence of the coverage area indicator on the number of floors of the building is investigated. The method of transformation of design solutions based on the indicators of the specific area of the exterior walls of the building per unit of built-up area, the average height of the premises at different heights of the floors of the building and the coverage area for comparison is proposed. It is shown that with an

increase in the height of the premises by 18 %, the cost of 1 square meter of the total area increases by 8-12 %.

*Keywords: building, design solution, technical and economic efficiency, analog project, exterior walls, coating, floor height, cost*

Совершенствование методик для определения экономической эффективности проектов различных видов зданий является одним из основных этапов инвестиционного процесса. Роль различных геометрических параметров зданий в процессе технико-экономического сравнения предполагаемого проекта с проектом-аналогом рассматривалась в [1–3]. Однако при выполнении сравнительного анализа проектных решений зданий, имеющих разные размеры и форму плана, не были изучены причины таких различий. Поэтому целью настоящих исследований было приведение к сопоставимым условиям сравниваемых проектных решений. Оказалось, что если выбранная форма плана и геометрические размеры проектируемого здания являются, как правило, единственным правильным решением, соответствующим гидрогеологическим и технологическим условиям, форме рельефа и существующей или формирующейся застройке, то форму плана и размеры проекта-аналога следует привести к условиям, сопоставимым с реальными [4]. Только при необходимости выбора наиболее экономичного варианта может быть сделано исключение.

В случаях, когда форма здания в плане и его геометрические параметры не являлись свойствами, характеризующими технико-экономическую эффективность, был использован нижеследующий метод преобразования проектных решений для проведения сравнения [5].

Удельная площадь наружных стен здания конкретного проекта, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> застраиваемой площади, определялась по формуле

$$y_{cn} = \frac{\Pi_{cn}}{S_{sn}},$$

где  $\Pi_{cn}$  – длина наружных стен здания рассматриваемого проекта в осях, м;  $S_{sn}$  – застраиваемая площадь, м<sup>2</sup>.

Этот же показатель для проекта-аналога определялся как:

$$y_{ca} = \frac{\Pi_{ca}}{S_{sa}},$$

где  $\Pi_{ca}$  – длина наружных стен здания проекта-аналога, м;  $S_{sa}$  – застраиваемая площадь по проекту-аналогу, м<sup>2</sup>.

Целью преобразования разных планировочных решений для их сравнения было получение значения удельной площади наружных стен здания, приходящейся на единицу застраиваемой площади [6]. При этом условие  $y_{cn} = y_{ca}$  обоснованно, если

$$y_{ca} = \frac{\Pi_{cn}}{S_{sn}} \cdot N_{cpn}^{н.с.},$$

где  $N_{cpn}^{н.с.}$  – показатель наружных стен, зависящий от формы здания в плане и определяемый как:

$$\frac{\Pi_{ca}}{S_{sa}} = \frac{\Pi_{cn}}{S_{sn}} \cdot N_{cpn}^{н.с.},$$

откуда  $N_{cpn}^{н.с.} = \frac{\Pi_{ca} S_{sn}}{S_{sa} \Pi_{cn}} = \frac{N_a^c}{N_n^c}$ ;  $N_{cpn}^{н.с.} = \frac{N_a^c}{N_n^c}$ .

Поэтому для технико-экономического сравнения всех показателей наружных стен рассматриваемых зданий в заданных условиях показатели следует умножать на при-

веденный коэффициент  $N_{ср n}^{н.с.}$ . Показатели стоимости раздела 11 «Сметы» умножались на  $N_{ср n}^{н.с.}$  для того, чтобы получить сравниваемую стоимость наружных стен здания рассматриваемого проекта:

$$СМ_{ср n}^{н.с.} = СМ_n^{н.с.} \cdot N_{ср n}^{н.с.},$$

где  $СМ_{ср n}^{н.с.}$  – сравниваемая стоимость наружных стен здания рассматриваемого проекта;  $СМ_n^{н.с.}$  – стоимость наружных стен здания рассматриваемого проекта;  $N_{ср n}^{н.с.}$  – приведенный коэффициент наружных стен, зависящий от формы здания в плане.

Стоимостные показатели строительных материалов и трудозатрат проекта-аналога, заложенные в смете, умножаются на приведенный коэффициент наружных стен  $N_{ср n}^{н.с.}$ .

Другой рассматриваемый в сравниваемых вариантах проектов зданий показатель, не относящийся к объемно-планировочным и конструктивным решениям, но изменяющий технико-экономические показатели, это высота помещений.

Так как стоимость основных вертикальных конструктивных элементов здания – колонн, стен, перегородок – составляет 38–50 % от общей сметной стоимости наземных конструкций, то при увеличении высоты помещений на 18 % стоимость 1 м<sup>2</sup> общей площади повышается на 8–12 %. При этом было учтено, что высоту помещений в зданиях различного назначения определяют требования актуальных строительных норм и правил, поэтому данный показатель не должен влиять на стоимость общей площади [7]. Однако при прочих равных показателях при увеличении высоты помещения стоимость 1 м<sup>2</sup> общей площади возрастает. Разная высота помещений в сравниваемых вариантах проектов стала причиной неверных выводов из-за неточностей в расчете технико-экономических показателей (ТЭП). Поэтому при расчетах ТЭП сравниваемые проекты, имеющие разную высоту помещений, были приведены к сопоставимым данным [8].

При первоначальной оценке сравниваемых вариантов проектов учитывалась не высота помещений, а высота этажа; и было определено, что такое сравнение целесообразно при одинаковых значениях высоты этажа и толщины перекрытия. Далее при сравнении проектных решений однотипных зданий с разными значениями толщины перекрытия, высоты этажа и помещений полученные показатели были сопоставимы (вар.2,3 на рис.1).

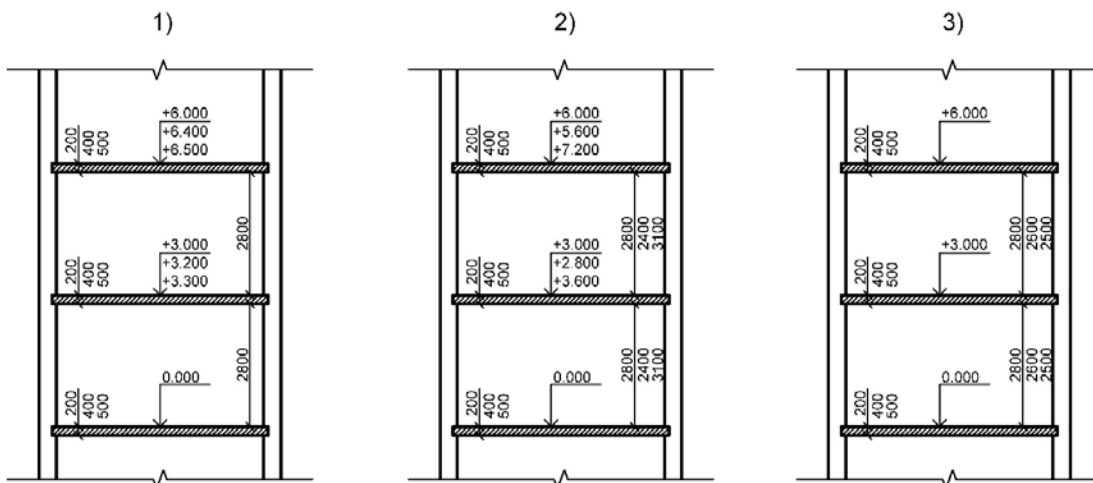


Рис. 1. Варианты схем зданий с различными параметрами толщины перекрытия, высоты этажа и помещений:

- 1) разная высота этажа при равной высоте помещений; 2) разная высота этажа при разной высоте помещений; 3) равная высота этажа при разной высоте помещений



Было определено, что основной качественной характеристикой является не высота этажа, а высота помещения. Поэтому при сравнении проектов зданий, имеющих разную толщину перекрытия и равную высоту этажа, при прочих равных показателях, получали несопоставимые данные из-за различных качественных характеристик помещений [9]. Для наиболее точных технико-экономических расчетов сравниваемых проектов и повышения их сопоставимости требовалось выполнить корректировку высот помещений. С этой целью был использован метод, при котором сравниваемые проекты зданий с разной высотой помещений были приведены к базовому виду [10].

Усредненная высота помещений при разных высотах этажей здания проекта-аналога определялась по формуле

$$H_{п.п-а} = \frac{\sum_{i=1}^{\mathcal{E}_{п-а}} H_{п.i.п-а}}{\mathcal{E}_{п-а}},$$

где  $H_{п.i.п-а}$  – высота помещения  $i$ -го этажа проекта-аналога, м;  $\mathcal{E}_{п-а}$  – количество этажей в здании проекта-аналога.

Усредненную высоту помещений при разных высотах этажей  $n$ -го здания находим по подобной формуле

$$H_{п.n} = \frac{\sum_{n=1}^{\mathcal{E}_n} H_{п.i.n}}{\mathcal{E}_n},$$

где  $H_{п.i.n}$  – высота помещения  $i$ -го этажа  $n$ -го здания, м;  $\mathcal{E}_n$  – количество этажей  $n$ -го здания.

Чтобы привести здания с разной высотой помещений к сравниваемому виду, использовался коэффициент  $N_n^{в.п}$ :

$$N_n^{в.п} = \frac{\mathcal{E}_n \cdot \sum_{i=1}^{\mathcal{E}_{п-а}} H_{п.i.п-а}}{\mathcal{E}_{п-а} \cdot \sum_{n=1}^{\mathcal{E}_n} H_{п.i.n}}.$$

Затем определялась стоимость основных вертикальных конструктивных элементов здания, которые были приведены к сравниваемому виду:

$$CT_{ср n}^{в.к.} = CT_{ср n}^{в.к.} \cdot N_{ср n}^{в.к.},$$

где  $CT_{ср n}^{в.к.}$  – стоимость основных вертикальных конструктивных элементов  $n$ -го здания;  $N_{ср n}^{в.к.}$  – приведенный коэффициент  $n$ -го здания.

Таким образом, получив сравниваемые варианты проектных решений зданий предложенным методом, получили и сравниваемую высоту помещений – качественную характеристику (вар.1 на рис.1).

Разница в высотах этажей получена с применением  $N_n^{в.к.}$  – функции толщины междуэтажных перекрытий, которая является показателем рассматриваемых проектных решений.

Показатели трудозатрат и расхода стройматериалов для сравниваемых проектных решений определялись, как и при разной форме плана здания, с применением  $N_{ср n}^{в.к.}$ .

В случае когда в проектных решениях зданий разные форма плана, высота помещений на этажах, тогда технико-экономические показатели (ТЭП), в т.ч. стоимость наружных конструкций, приводились к сравниваемому виду с применением двух коэффициентов:

$$CT_{ср}^{в.к.} = CT_{ср n}^{в.к.} \cdot N_{ср n}^{н.с.} \cdot N_{ср n}^{в.к.}.$$

Следующий показатель, изменение которого влияет на стоимость 1 м<sup>2</sup> общей площади здания, – этажность. При разной этажности рассмотренных проектных решений зданий на 1 м<sup>2</sup> общей площади приходилась разная площадь конструкции покрытия (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость площади покрытия от количества этажей здания

Для зданий, имеющих различную форму плана, площадь покрытия, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> общей площади, определялась как:

$$S_n = S_{п.н} / S_{о.н},$$

где S<sub>п.н</sub> – площадь покрытия n-го здания, м<sup>2</sup>; S<sub>о.н</sub> – общая площадь n-го здания, м<sup>2</sup>.

Для проектных решений жилых зданий, имеющих одинаковую планировку по этажам:

$$S_n = S_{п.н} / S_{о.э.н} \cdot Э_n,$$

где S<sub>о.э.н</sub> – общая площадь одного этажа n-го здания, м<sup>2</sup>; Э<sub>n</sub> – этажность n-го здания.

При сравнении n-го здания с проектом-аналогом для последнего площадь покрытия находили по формуле

$$S_{п-а} = S_{п.п-а} / S_{о.э.п-а} \cdot Э_{п-а}.$$

**В ы в о д .** Предлагаемый метод позволяет приводить сравниваемые проекты зданий, имеющих разные объемно-планировочные и конструктивные решения, к единому образу; точнее выполнять расчеты технико-экономических показателей; делать более объективные выводы при сравнении проектных решений зданий.

### Список литературы

1. Дерина, М.А. Оценка и расчет проектных решений зданий с использованием системы технико-экономических показателей / М.А. Дерина, Г.А. Семина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – №1(32). – С.75–79.
2. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1(42). – С.212–217.
3. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.203–208.
4. Дерина, М.А. Параметры выбора кровельного покрытия при капитальном ремонте здания / М.А. Дерина // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2019. – №1(40). – С.83–86.
5. Петрянина, Л.Н. К вопросу о комплексном градостроительном проектировании / Л.Н. Петрянина // Вестник Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – №7. – С.57–64.

6. Дарюхин, А.Д. Сравнительный анализ технико-экономических параметров конструктивных систем жилых зданий / А.Д. Дарюхин, Н.И. Фокин // Молодой ученый. – 2018. – №18(203). – С. 57–61.
7. Петрянина, Л.Н. Система экологического менеджмента в проектной организации / Л.Н. Петрянина, А.А. Булдыгина, О.В. Карпова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С.164.
8. Петрянина, Л.Н. Проблемы теплозащиты зданий / Л.Н. Петрянина, Э.В. Санян, М.А. Дерина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №6(13). – С. 179–187.
9. Бекренева, Т.А. Технико-экономическое сравнение вариантов возведения ограждающих конструкций стен многоквартирных жилых зданий / Т.А. Бекренева // StudArctic Forum. – 2016. – №4(4). – С.8–13.
10. Девятникова, Л.А. Исследование технико-экономических параметров при выборе возведения ограждающих конструкций индивидуальных жилых домов / Л.А. Девятникова, Е.Г. Емельянова, А.А. Кузьменков, А.А. Симонова // Ученые записи Петрозаводского государственного университета. – 2016. – №4. – С.82–88.

## References

1. Derina M.A. Evaluation and calculation of design solutions of buildings using a system of technical and economic indicators / M.A. Derina, G.A. Semina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2021. – No. 1(32). – P.75–79.
2. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Y.S. Sergunina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1(42). – P.212–217.
3. Petryanina, L.N. Concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1(38). – P.203–208.
4. Derina, M.A. Parameters of the choice of roofing during the overhaul of the building / M.A. Derina // Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. – 2019. – No. 1(40). – P.83–86.
5. Petryanina, L.N. On the issue of integrated urban planning / L.N. Petryanina // Bulletin of the Belgorod Technological University named after V.G. Shukhov. – 2018. – No.7. – P.57–64.
6. Daryukhin, A.D. Comparative analysis of technical and economic parameters of structural systems of residential buildings / A.D. Daryukhin, N.I. Fokin // A young scientist. – 2018. – No.18(203). – P. 57–61.
7. Petryanina, L.N. Environmental management system in a project organization / L.N. Petryanina, A.A. Buldygina, O.V. Karpova // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4. – P.164.
8. Petryanina, L.N. Problems of thermal protection of buildings / L.N. Petryanina, E.V. Sanyan, M.A. Derina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2017. – No.6(13). – P. 179–187.
9. Bekrenea, T.A. Technical and economic comparison of options for the construction of enclosing structures of walls of multi-apartment residential buildings / T.A. Bekrenea // StudArctic Forum. – 2016. – No.4(4). – P.8–13.
10. Devyatnikova, L.A. Study of technical and economic parameters when choosing the construction of enclosing structures of individual residential buildings / L.A. Devyatnikova, E.G. Emelyanova, A.A. Kuzmenkov, A.A. Simonova // Scientific records of Petrozavodsk State University. – 2016. – No. 4. – P.82–88.