

Редакционный совет:
Пилипенко О.В. д-р техн. наук., проф.,
 председатель
Голенков В.А. д-р техн. наук, проф.,
 зам. председателя
Пузанкова Е.Н. д-р пед. наук, проф.,
 зам. председателя
Радченко С.Ю. д.т.н., проф.,
 зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,
 секретарь
Авдеев Ф.С. д-р пед. наук, проф.
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Желтикова И.В. канд. филос. наук, доц.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук., проф.
Зомитова Г.М. канд. экон. наук, доц.
Колчунов В.И. д-р техн. наук., проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Косыкин А.В. д-р техн. наук., проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук., проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук., проф.
Уварова В.И. канд. филос. наук., доц.

Главный редактор:
Колчунов В.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.

Заместители главного редактора:
Данилевич Д.В. канд. техн. наук, доц.
Колесникова Т.Н. д-р арх., проф.
Коробко В.И. д-р техн. наук, проф.

Редакция:
Бок Т. д-р техн. наук., проф. (Германия)
Бондаренко В.М. акад. РААСН,
 д-р техн. наук, проф. (Россия)
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Емельянов С.Г. чл.-корр. РААСН,
 д-р техн. наук, проф. (Россия)
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д-р техн. наук,
 проф. (Россия)
Коробко А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
 проф. (Россия)
Рышнин В.И. чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
 проф. (Россия)
Сергейчук О.В. д-р техн. наук, проф. (Украина)
Серпик И.Н. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Тамразян А.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Тур В.В. д-р техн. наук., проф. (Белоруссия)
Турков А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Федоров В.С. акад. РААСН, д-р техн. наук,
 проф. (Россия)
Федорова Н.В. советник РААСН,
 д-р техн. наук, проф. (Россия)
Чернышов Е.М. акад. РААСН, д-р техн. наук,
 проф. (Россия)
Шах Р. д-р техн. наук, проф. (Германия)

Ответственный за выпуск:
Савин С.Ю. к.т.н.

Адрес редакции:
 302006, Россия, г. Орел, ул. Московская, 77
 Тел.: +7 (4862) 73-43-49
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
 E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
 по надзору в сфере связи, информационных
 технологий и массовых коммуникаций.
 Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169
 от 16 сентября 2016 г.

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

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И.** Расчет трещиностойкости
 и жесткости железобетонных составных конструкций при кручении
 с изгибом 3
Лапинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на
 прочность и деформативность сжатых бетонных элементов,
 армированных композитной полимерной арматурой 20
Серпик И.Н., Школяренко Р.О. Расчет систем тонкостенных стержней
 корытообразного профиля с учетом стесненного кручения 31

Безопасность зданий и сооружений

- Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Нзюк Туен** Методика
 экспериментальных исследований деформирования монолитных
 железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях 42

Архитектура и градостроительство

- Горбаренко Е.В., Шиловецова О.А.** Естественная освещенность
 горизонтальной и вертикальных поверхностей по данным наблюдений
 МО МГУ 53
Енин А.Е., Шевелёв В.П., Стулак Е.Ю. Ретроспективный системный
 эксперимент при архитектурно-градостроительных исследованиях
 экологических систем «население↔среда» (на примере г. Воронеж) 64

Строительные материалы и технологии

- Антонов А.И., Леденев В.И., Гусев В.П.** Сравнительный анализ
 расчетных и измеренных значений дополнительной звукоизоляции
 воздуховодов из пористого материала Flex-ST 76
Киселёв И.Я. Радиационный теплоперенос через стекловолоконистые
 изделия плотностью от 10 до 125 кг/м³ в диапазоне температуры от – 20
 до +25 °С 84
Сидорова А.В., Жоголева О.А., Матвеева И.В. Расчет шума в
 газоздушных каналах энергетических объектов методом функции
 источника 89
Соломенцев А. Б. Оценка уплотняемости горячих асфальтобетонных
 смесей с низкотемпературными добавками 97
Щепочкина Ю.А., Быков И.А. Мелкозернистый бетон с включением
 измельченного поливинилхлорида 108

Editorial council:

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof.,
President

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Vice-president

Puzankova E.N. Doc. Sc. Ped., Prof.,
Vice-president

Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Vice-president

Borzenkov M.I. Candidat Sc. Tech.,
Docent, Secretary

Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.
Avdeyev F.S. Doc. Sc. Ped., Prof.

Ivanova T.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

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

Koskin A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Popova L.V. Doc. Ec. Tech., Prof.

Uvarova V.I. Candidat Sc. Philos.,
Docent

Zheltikova I.V. Candidat Sc. Philos.,
Docent

Zomiteva G.M. Candidate Sc. Ec., Docent

Editor-in-chief

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

Editor-in-chief assistants:

Danilevich D.V. Candidat Sc. Tech., Docent.

Kolesnikova T.N. Doc. Arc., Prof.

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

Editorial committee

Bock T. Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

Bondarenko V.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
(Russia)

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Karpenko N.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Korobko A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Korol E.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Rimshin V.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Sergeychuk O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)

Serpik I.N. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Tamrazyan A.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
(Russia)

Tur V.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)

Turkov A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Fedorov V.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Fedorova N.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Chernyshov E.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
(Russia)

Schach R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

Responsible for edition:

Savin S.Yu. Candidat Sc. Tech.

The edition address:

302006, Orel, Moskovskaya Street, 77

+7 (4862) 73-43-49

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for
monitoring communications, information tech-
nology and mass communications

The certificate of registration:

ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»
86294

© Orel State University, 2018

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I.** The calculating method of crack resistance and rigidity of reinforced concrete composite constructions under the action torsion with bending 3
- Lapshinov A. E., Tamrazyan A. G.** To the influence of transverse reinforcement to strength and deformability of concrete compressive members reinforced with FRP reinforcement 20
- Serpik I.N., Shkolyarenko R.O.** Calculation of thin-walled systems of channel bars taking into account the restrained torsion 31

Building and structure safety

- Fedorova N.V., Koren'kov P.A., Vu N.T.** Experimental method of research of deformation of monolithic reinforced concrete building under accidental actions 42

Architecture and town-planning

- Gorbarenko E.V., Shilovtseva O.A.** The natural illuminance of horizontal and vertical surfaces according to Moscow State University observations 53
- Enin A.Ye., Shevelov V.P., Stupak E. Yu.** Retrospective system experiment with architectural and urban studies of ecological systems "population ↔ environment" (for example, Voronezh) 64

Construction materials and technologies

- Antonov A.I., Ledenev V.I., Gusev V.P.** Comparative analysis of calculated and measured values of additional sound insulation of dangers from porous material Flex-ST 76
- Kiselyov I.Y.** Radiation heat transfer through the fiberglass products of density from 10 to 125 kg/m³ in the range of temperature from -20 to +25°C 84
- Sidorina A.V., Zhogoleva O.A., Matveeva I.V.** Calculation of noise in gas-air channels of power objects by the source function method 89
- Solomentsev A.B.** Evaluating compactibility of asphalt mixtures and mastic layer with low-temperature additives 97
- Shchepochkina J.A., Bykov I.A.** Fine concrete with the inclusion of crushed polyvinylchloride 108

УДК 624.012.45

ДЕМЬЯНОВ А.И., НАУМОВ Н.В., КОЛЧУНОВ Вл.И.

РАСЧЕТ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

Приведена методика и алгоритм расчета трещиностойкости и жесткости железобетонных составных конструкций при кручении с изгибом, основанной на предлагаемой классификации дискретных трещин. В основу этой классификации положена геометрическая, силовая (деформационная) и межсредовая концентрация напряженно-деформированного состояния, с соответствующими источниками-концентраторами. Построены двухэлементные консольные модели для анализа силового сопротивления железобетона вдоль траектории трещины и вдоль шва между бетонами, а также модели уровня появления трещин, позволяющие определять расстояния между трещинами и ширину их раскрытия. Предложена блочная расчетная модель первого уровня, с полной картиной трещин и их проекций на плоскость в виде функции многих переменных, с расчетными сечениями для определения напряженно – деформированного состояния которых привлекаются возможности ПК «Лира – САПР». Расчетная модель позволяет учитывать эффект нарушения сплошности бетона, несовместность деформаций бетона и арматуры, межсредовое возмущение в шве контакта между бетонами. Ширина раскрытия трещин определяется вдоль всего профиля трещины при учете изменения расстояния между трещинами l_{cr} , длины трещин по мере увеличения нагрузки при различных статических схемах, классах бетона, характеристиках армирования, наличии предварительного напряжения.

Ключевые слова: железобетон, составные конструкции, пространственные трещины, жесткость, трещиностойкость, классификация трещин, эффект нарушения сплошности, двухэлементные консольные модели, ширина раскрытия трещины, расстояние между трещинами, длина трещины, алгоритм расчета, проекция трещин, блочная модель.

Введение. Современный строительный комплекс опирается на широкое применение железобетонных составных конструкций, – сборно-монолитных перекрытий, сложнопященных балок-стенок и диафрагм жесткости зданий, опорных и пролетных конструкций мостов, пространственных конструкций атомных и гидроэлектростанций, специальных подземных сооружений и др. [1, 2].

В связи с этим совершенствование проектирования таких конструкций и в частности, развитие методов расчета жесткости железобетонных составных конструкций, работающих с трещинами для их оценки не только предельным состоянием второй группы, но и для определения внутренних усилий в случаях, когда эти усилия напрямую зависят от жесткости [3–6].

Сборно-монолитные железобетонные конструкции и конструкций, которые восстанавливаются или усиливаются при реконструкции зданий и сооружений характеризуются общим сопротивлением двух или нескольких бетонов с разными свойствами прочности и деформативности [1, 5, 6]. Это определяет ряд специфических параметров расчета и проектирования таких конструкций, приводящие к перераспределению внутренних усилий между старым и новым бетонами.

Проведенный анализ научных публикаций показывает, что в настоящее время разработано несколько моделей трещинообразования в железобетоне, которые пригодны для использования в программных комплексах: модель З. П. Бажанта (эндокринная теория),

модель В. М. Остаховича с использованием эквивалентного шарнира между конечными элементами, модель Е. Н. Морозова с привлечением изопараметрических конечных элементов, модель С. Л. Цыфанского (кусочно-линейная модель), модель С.М. Ермаковой с привлечением дополнительных конечных элементов) и др.

Вопросы жесткости железобетонных составных конструкций при наличии в них различных типов пространственных трещин остаются недостаточно изученными [3, 7, 8]. До настоящего времени в действующих нормативных документах по проектированию отсутствуют конкретные рекомендации по рациональному армированию несущих железобетонных конструкций, эксплуатируемых в сложных инженерно – геологических условиях, отсутствуют фактические данные о взаимных сдвигах старого и нового бетонов в зонах, прилегающих к шву; не учтены эффекты, связанные с нарушением сплошности бетона, и важными закономерностями развития и раскрытия трещин. Как следствие этого многие здания и сооружения имеют многочисленные не допустимые эксплуатационные трещины или, – наоборот, – запроектированы с излишним запасом [9, 10].

Отсюда следует, что проведение экспериментально-теоретических исследований по разработке методики расчета жесткости пространственных железобетонных составных конструкций с трещинами является одной из **актуальных задач** современной механики железобетона.

Цель исследования. Разработать расчетную модель жесткости пространственных железобетонных составных конструкций, отражающую формирование в них различных типов спиралеобразных трещин.

Расчетная модель. Анализ моделей трещин в железобетоне, которые могут быть использованы в программных комплексах, показывает, что в большинстве известных вычислительных комплексах [11], учет образования и развития трещин в железобетонных конструкциях выполняется с использованием критериев достижения главными напряжениями или главными деформациями удлинения бетона своих предельных значений [12]. Однако такие критерии отображают появление в железобетонных конструкциях лишь дисперсных, регулярных трещин. Совершенно иные критерии необходимо использовать при моделировании появления и развития дискретных трещин в железобетоне [13]. Здесь главную роль играет концентрация деформаций в местах резкого изменения геометрических размеров, зон концентрации силового и деформационного нагружения, межсредовая концентрация [14, 15] и т.п. Тем не менее, до сегодняшнего дня методика моделирования дискретных трещин, в том числе с использованием известных в мире вычислительных комплексов еще не разработана.

Ниже изложена суть предлагаемой методики моделирования дискретных трещин в условиях сложного сопротивления-кручения с изгибом [14, 16-18] с учетом эффекта нарушения сплошности и несовместности деформаций бетона и арматуры.

В основу этой методики положена схема дискретных трещин (рисунок 1), полученная в результате анализа целого ряда экспериментов [3, 8, 19].

Основные положения расчетной методики для определения жесткости железобетонных составных конструкций при сложном сопротивлении и наличии в них пространственных трещин, включают на следующие этапы.

1. Развитие пространственных трещин осуществляется по специальным билинейным поверхностям. Для этого, зная уравнение билинейной поверхности в параметрической форме [20], вписывается в значение угловых точек поперечного сечения железобетонной конструкции – точки A, B, C, D , т.е. **уравнение билинейной поверхности** конкретизируется применительно к заданному поперечному сечению:

$$\begin{aligned} [x_k; y_k; z_k] = & [x_A; y_A; z_A] \cdot (1 - u_k) \cdot (1 - w_k) + [x_B; y_B; z_B] \cdot (1 - u_k) \cdot w_k + \\ & + [x_C; y_C; z_C] \cdot u_k \cdot (1 - w_k) + [x_D; y_D; z_D] \cdot u_k \cdot w_k. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Вводится **классификация дискретных базовых пространственных трещин** (рис. 1). Наряду с нормальными трещины будем принимать во внимание следующие три типа пространственных трещин:

- пересекающие продольную и поперечную арматуру; образующиеся на нижней и боковой грани, где $M > M_{crc}$, $M_t > M_{t,crc}$ и $Q \geq Q_{crc}$, – первый тип;
- пересекающие только поперечную арматуру, образуются в произвольной точке внутри объема конструкции, где $M < M_{crc}$, $M_t > M_{t,crc}$ и $Q > Q_{crc}$ и прилегающие своей вершиной к сосредоточенной силе, – второй тип;
- пересекающие только поперечную арматуру, образуются в произвольной точке внутри объема конструкции, где $M < M_{crc}$, $M_t < M_{t,crc}$, $Q > Q_{crc}$, и не прилегающие своей вершиной к сосредоточенной силе, которые могут выходить в любую точку верхней или боковой сжатой грани железобетонной стержневой конструкции, – третий тип.

В железобетонных составных конструкциях [15, 21] могут иметь место такие **базовые** пространственные трещины: 1) трещины, которые развиваются к зонам или из зон геометрической концентрации напряженно-деформированного состояния (в местах изменения размеров поперечных сечений, во входящих углах, в зонах некруглых отверстий и т.п.); 2) трещины, которые развиваются к зонам или из зон концентрации силового и деформационного нагружения (места расположения опорных реакций и сосредоточенных сил (моментов), – места изменения интенсивности нагрузки по контуру конструкции, места деформационного нагружения от просадок; особое значение имеет вид нагружения – изгиб, кручение, сдвиг, сжатие – растяжение); 3) трещины, которые развиваются в зонах межсредовой концентрации деформаций (в швах между бетонами в железобетонных составных конструкциях; в зонах заанкеривания вдоль продольной арматуры и т. п.).

В практике строительства (например, в сложных инженерно-геологических условиях) наиболее часто встречаются схемы силового и деформационного нагружения, которые, как правило, вызывают наложение разных типов трещин.

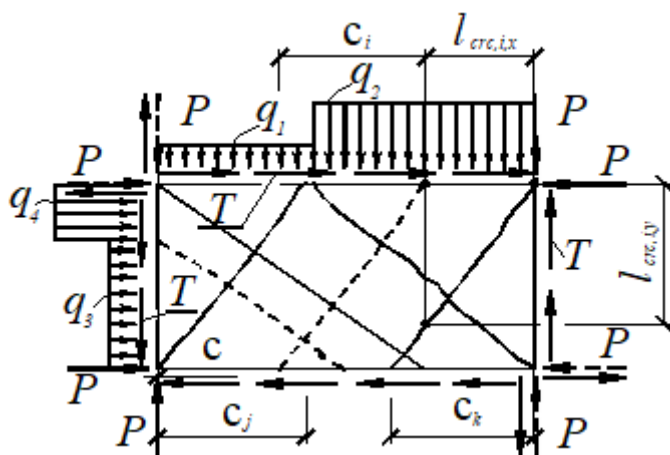


Рисунок 1 – Схема базовых и смежных спиралеобразных трещин в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом, полученные в результате наложения геометрической и силовой концентрации (вид сбоку): 1 – базовые трещины; 2 – смежные трещины

3. Опираясь на базовые трещины, схема дискретных трещин может быть уточнена путем нанесения смежных трещин (см. рисунок 1), которые определяются с привлечением деформационного критерия их образования. Образование последующего уровня пространственных трещин осуществляется после достижения растянутыми волокнами бетона вдоль осей рабочей арматуры (продольной или поперечной) своих **предельных деформаций** $\varepsilon_{bt,u}$. Уровней трещинообразования может быть несколько.

4. Развитие (длина проекции C на горизонталь (вертикаль) смежных пространственных трещин определяется нахождением экстремума функции многих переменных с использованием множителей Лагранжа на основе блочной модели. В качестве расчетных принимаются поперечные сечения, проходящие через начало и конец трещины (уточняются в процессе итераций). Одно из этих сечений, как правило, привязывается к обобщенной силе – опорной реакции R_{sup} или выходит на одну из граней конструкции.

Построение аналитических зависимостей для определения пространственных трещин первого, второго и третьего типа базируется на построении функций многих переменных с использованием множителей Лагранжа $F_{1,2} = f(q_{sw}, x_B, \sigma_s, x, \sigma_b, \sigma_{s,l}, \sigma_{b,1}, C_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7)$ и $F_3 = f(q_{sw}, x_{B,2}, \sigma_{s,3}, c_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, соответственно, и вытекающих из условия экстремума этих функций – равенств нулю их частных производных [1, 6, 15]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_1} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_2} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_2} &= 0 \\ \dots &\dots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_n} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} &= 0 \end{aligned} \right\} . \quad (2)$$

В результате получена общая формула вида:

$$(k'_1 k'_2 k'_{21} + k'_1 k'_{21} + k'_1 k'_{23}) C_2^2 + C_2 + k'_1 k'_{22} - k'_1 k'_2 k'_{21} = 0. \quad (3)$$

Параметры k'_1 , k'_2 , $k'_{21} - k'_{23}$ зависят от геометрических характеристик железобетонных составных конструкций, механических характеристик бетона и арматуры, параметров сцепления, параметров напряжено-деформированного состояния расчетных сечений, которые проходят через начало и конец наклонной (пространственной) трещины, соответственно. Кроме того длину трещины h_{crc} в общем случае рекомендуется уточнять, используя условие механики разрушения:

$$\frac{d\zeta_{bu}}{dh_{crc}} = 0, \quad (4)$$

где ζ_{bu} – удельная поверхностная энергия образования трещины.

После дифференцирования (4) применительно к железобетону, в работах В.И.Колчунова и И.А. Яковенко [15, 22] получена аналитическая зависимость длины трещины h_{crc} . В ряде случаев, поиск этого параметра упрощается, например, когда в сжатой зоне развитие трещины останавливается и h_{crc} является постоянной величиной или величиной, связанной с высотой сжатого бетона, равной $h_0 - x$.

5. Учитывая, что на сегодняшний день разработки конечно-элементной модели железобетона при расчете железобетонных конструкций с учетом их нелинейного деформирования достигли довольно высокого уровня, построение методики расчета их жесткости и моделирования дискретных трещин целесообразно ориентировать на использование наиболее совершенных программных комплексов. При этом необходимо наиболее полно учитывать в них характер развития и раскрытия трещин (Рисунок 2а) [23]. В расчетных моделях зданий, сооружения или железобетонной конструкции использование плосконапряженных или пространственных конечных элементов (рисунок 2 б, в) [24–26]. При моделировании сложно напряженных железобетонных конструкций с помощью объемных конечных элементов пространственные трещины – поверхности *аппроксимируются вписываемыми в них параллелепипедами* (см. рисунок 2, в).

6. Суть предлагаемой модели трещин [2, 4] состоит в том, что после замены действительной трещины (описываемой формулой (1)) моделью в виде вписанных в нее ступенчатых пространственных конечных элементов, которые «расшиваются», моделируя трещину, а раскрытие трещины задается в виде **деформационного воздействия** $\Delta = a_{crc,j}$. Учет эффекта нарушения сплошности [1, 9] выполняется с помощью введения в модель переменной ширины раскрытия трещины в зависимости от ее удаления от оси продольной или поперечной рабочей арматуры (см. численные значения раскрытия трещин к рисунку 2 а, б).

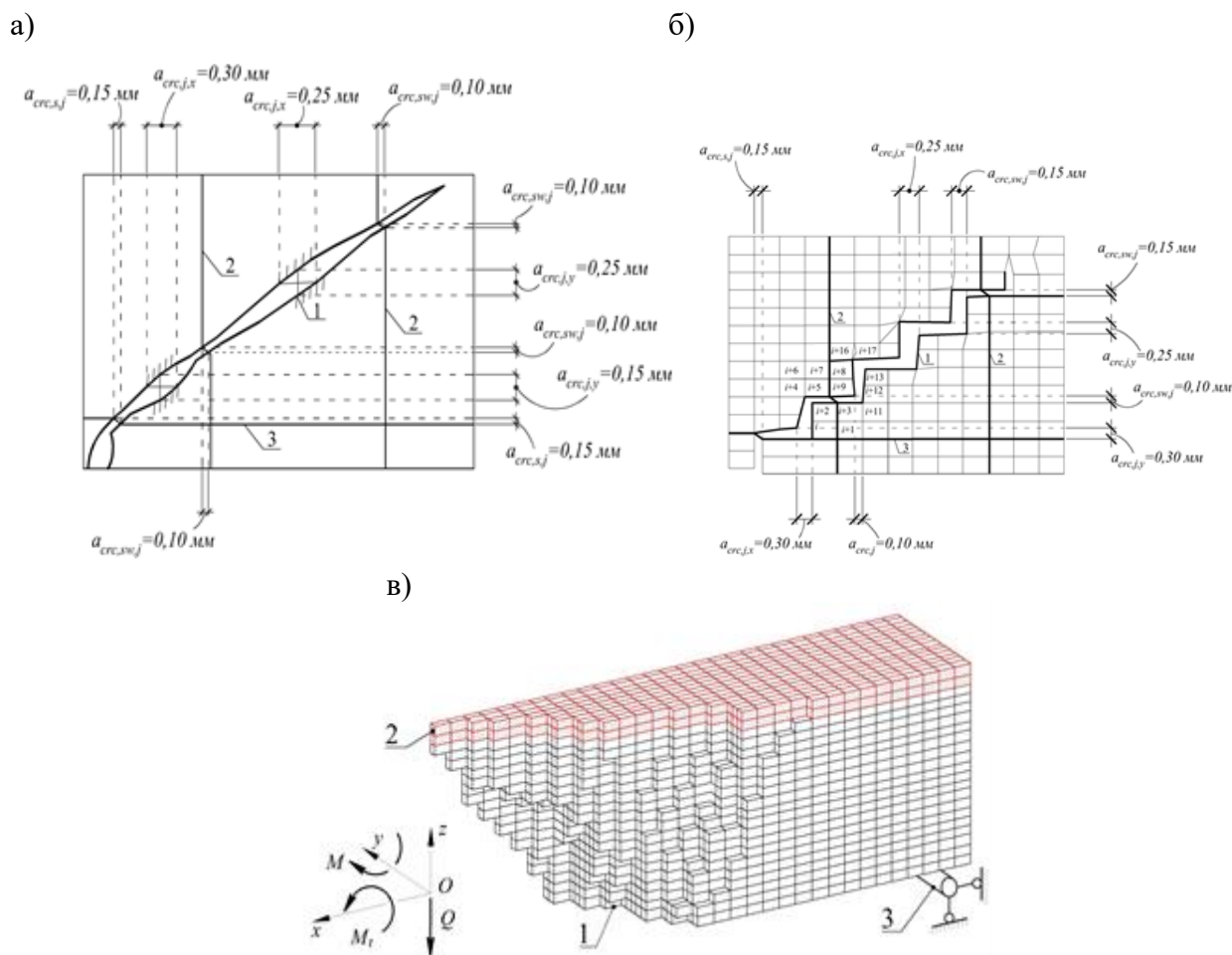


Рисунок 2 - Предлагаемая модель трещин в плосконапряженном и сложно напряженном элементе: а – действительная трещина; б – моделируемая с помощью «расшивки» плосконапряженных конечных элементов (КЭ) и деформационного воздействия $\Delta = a_{crc,j}$; в – моделируемая с помощью «расшивки», пространственных конечных элементов (КЭ) и деформационных воздействий

$$\Delta_1 = a_{crc}^l; \quad \Delta_2 = a_{crc}^m; \quad \Delta_3 = a_{crc}^n;$$

1 – трещина; 2 – поперечная арматура и ее моделирование с помощью 201 КЭ; 3 – продольная арматура и ее моделирование с помощью 201 КЭ; 4 – возможное закрытие трещины и его моделирование с помощью 255 КЭ

При решении обратной задачи [4, 5], – определения ширины раскрытия трещин, деформационное воздействие не задается, а с помощью расшивки моделируется лишь наличие **щели** минимально возможной ширины, а ее раскрытие при соответствующем нагружении определяется как расхождение берегов этой щели.

7. Возможен и другой вариант моделирования дискретных трещин [4, 5, 19]. Он используется в том случае, когда перенумерация узлов расчетной схемы железобетонной кон-

струкции (здания или сооружения), связанная с необходимостью «расшивки», рассмотренной в первом варианте, нежелательна. В этом случае конечные элементы не «расшиваются» вдоль всей трещины, а на первом этапе моделирования дискретных трещин используются лишь мнимые дискретные трещины, развитие которых прогнозировано по введенной классификации трещин применительно к конкретному расчету. На втором этапе моделирования трещин вдоль траектории мнимой трещины выделяются пары конечных элементов, прилегающих к такой трещине с противоположных сторон. Эти пары рассматриваются в двух состояниях: до их «расшивки» и после их «расшивки» [6].

Таким образом, к расчету привлекается специальная **двухэлементная консольная модель** железобетонного элемента (плоская – [19] или пространственная, – рисунок 3, а–б), с помощью которой выполняется итерационный анализ напряженно-деформированного состояния конструкции. При этом важным является не только «расшивка», но и деформационное воздействие, в котором учитывается эффект нарушения сплошности бетона. Распределенное армирование в таком элементе заменяется двумя (для плоской модели) и четырьмя (для пространственной модели) стержневыми конечными элементами в каждом взаимно перпендикулярном направлении, соответственно.

Перемещения узлов определяются из расчета двухэлементной расчетной модели с заданными в ее узлах нагрузками (узловыми усилиями). При этом опорные закрепления двух узлов в плоской модели и четырех узлов в пространственной модели (чередующимися шарнирно неподвижными и шарнирно подвижными опорами), в целях усреднения необходимо задавать с учетом вариаций: слева – справа, спереди – сзади, снизу – сверху. Важным является и то, что наряду с узловыми нагрузками в двухэлементной модели задаются еще и деформационные воздействия, связанные с шириной раскрытия трещины.

Задание деформационного воздействия выполняется в каждом узле (кроме опорных) по трем направлениям в соответствии с рисунком 3, в, где l , m и n – направляющие косинусы главного вектора раскрытия трещины в той или иной ее точке к осям x , y и z , соответственно.

Располагая картиной приложенных усилий и перемещений в узлах консолей, можно определить значения работ в двух состояниях: «до расшивки» и «после расшивки» двухэлементной модели. Из условия равенства этих работ уменьшается толщина конечных элементов в состоянии «до расшивки». Эта процедура выполняется для всех пар конечных элементов, прилегающих с разных сторон к трещине вдоль горизонтальных, вертикальных или их боковых поверхностей. В результате вдоль виртуальной трещины толщина конечных элементов уменьшается. Это и провоцирует образование и развитие трещин по критерию регулярных дисперсных трещин, не прибегая к расшивке и перенумерации конечных элементов по всей длине или поверхности дискретной трещины.

Усредненные усилия в узлах в различных направлениях для двухэлементной консольной модели определяются из физически нелинейного расчета всей конструкции. Для этого используются узловые усилия в соответствующих конечных элементах бетона и арматуры.

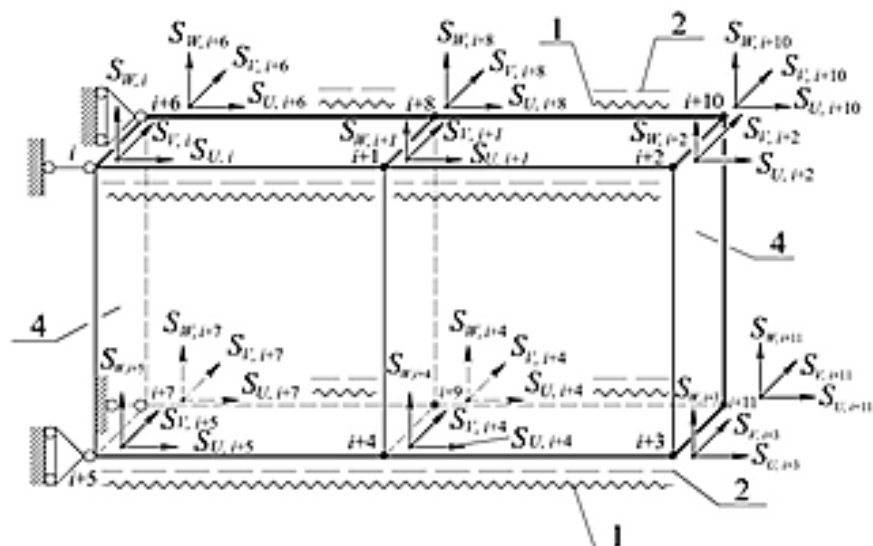
В местах переходов горизонтальных участков моделируемых трещин к вертикальным и боковым, работа в угловых конечных элементах определяется путем их усреднения.

В результате новая толщина конечных элементов, прилегающих к трещине находится по формуле:

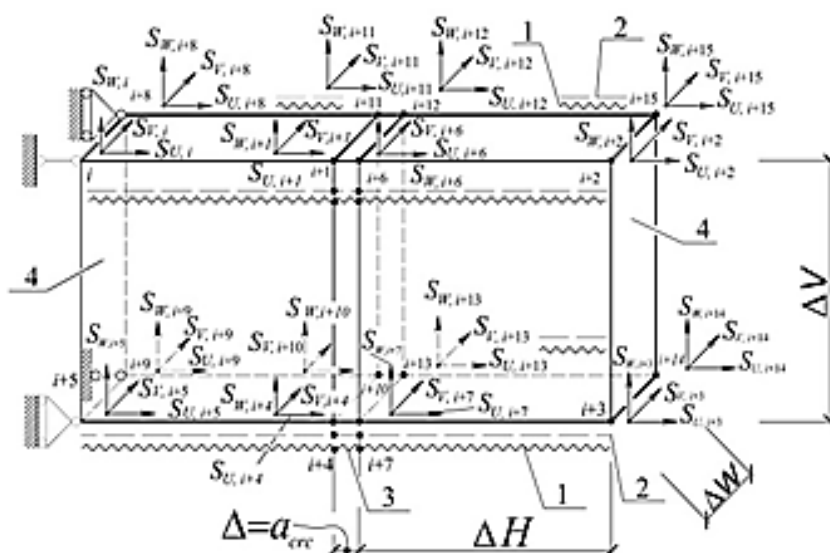
$$b = \frac{W_1}{W_2} \cdot b_1. \quad (5)$$

где W_1 и W_2 – работа двухэлементной модели «до расшивки» и «после расшивки», соответственно.

а)



б)



в)

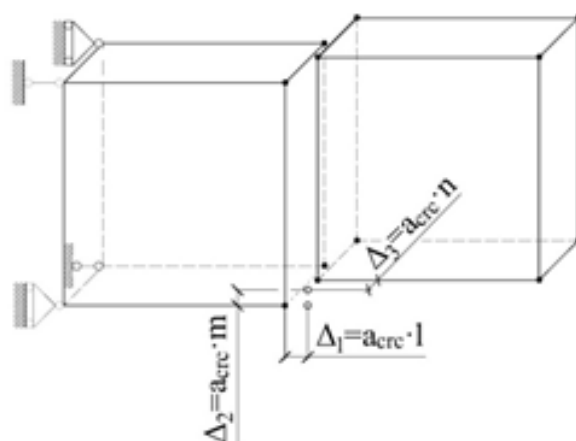


Рисунок 3 - Схема двухэлементной плоской и пространственной моделей:

a – плоская, без «расшивки»; $б$ – то же, после «расшивки»; $в$ – пространственная, до «расшивки»;
 $г$ – то же, после «расшивки»; $д$ – деформационные воздействия: 1 – 255 КЭ до «расшивки»;
 2 – 201 КЭ; 3 – 255 КЭ после «расшивки»; 4 – 233 КЭ

Предлагаемый алгоритм предусматривает наличие итерационного процесса, регулируемого достигнутой точностью толщины конечных элементов, которые прилегают к виртуальным (мнимым) трещинам. При расчете на сейсмические и динамические воздействия в итерационный процесс следует включать также изменение динамических характеристик железобетонной конструкции, здания или сооружения, обусловленное изменениями их жесткости.

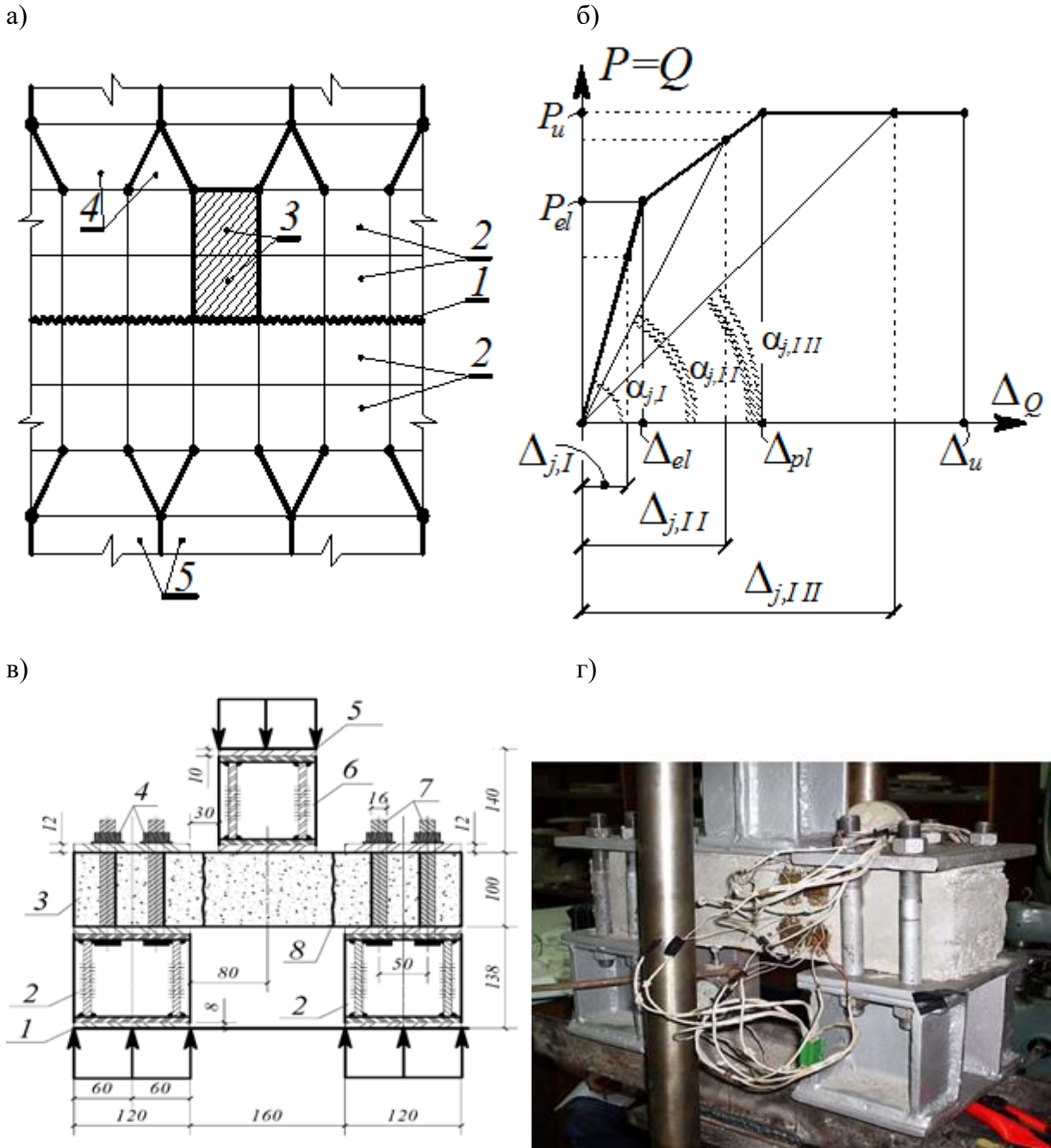


Рисунок 4 - Схема моделирования и экспериментального исследования шва между бетонами:
 а – схема двух рядов мелкогабаритных конечных элементов, прилегающих к шву; б – диаграмма нагружения-сдвиг ($Q - \Delta_Q$), полученная экспериментально составных призм ($\mu(\lambda)_I = 0,2$; $\mu(\lambda)_{II} = 0,35$; $\mu(\lambda)_{III} = 0,5$); в – схема нагружения составных призм; г – общий вид испытаний составных призм:
 1- шов контакта; 2,3,4- мелкогабаритные конечные элементы в зоне шва контакта;
 5- удаленные от шва конечные элементы

8. Применительно к составным железобетонным конструкциям при моделировании шва между бетонами вводится специальная двухэлементная расчетной модель. Для определения физически нелинейного напряженно-деформированного состояния этой двухэлементной расчетной модели привлекаются возможности вычислительного комплекса «Лира-САПР» с уменьшением размеров конечных элементов, прилегающих к шву (не менее двух рядов с каждой стороны шва). При этом для построения зависимости «нагрузка - сдвиг» ($Q - \Delta_Q$), необходимой для задания в этих рядах мелкогабаритных конечных элементов параметров $G(\lambda)$, $E(\lambda)$, $\mu(\lambda)$, моделирующих околошовную зону, используются опытные данные составных призм, испытанных при сдвиге в швах между разными бетонами, в том числе, при наличии в нем арматурных стержней (рис. 4).

9. В плосконапряженных и пространственно деформированных железобетонных, в том числе составных, конструкциях имеет место многоуровневый процесс развития разных типов пространственных трещин [10, 15], который моделируется представительными объемами бетона с арматурным стержнем длиной Δx , соизмеримыми с расстоянием между поперечными арматурными стержнями (рисунок 5), которые позволяют определять расстояния между трещинами и ширину их раскрытия. Особенности таких расчетных уровней моделей применительно к составным железобетонным конструкциям изображены на рис. 6.

При этом связь между деформациями растянутого бетона вдоль оси поперечной арматуры $\varepsilon_{br}(y)$ и деформациями поперечной арматуры $\varepsilon_{sw}(y)$ в общем виде определяется выражением.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{br}(y) &= \sigma_{sw} A_{sw} \cdot \frac{1}{D'_{13}} - \sigma_{sw}(y) A_{sw} \cdot \frac{1}{D'_{13}} + \frac{D'_{14}}{D'_{13}} \cdot y + \frac{D'_{15}}{D'_{13}} = \\ &= \varepsilon_{sw} \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D'_{13}} - \varepsilon_{sw}(y) \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D'_{13}} + \frac{D'_{14}}{D'_{13}} \cdot y + \frac{D'_{15}}{D'_{13}},\end{aligned}\quad (6)$$

где параметры $D'_1 \dots D'_{12}$ выражаются в виде функций от усилий в сечениях, которые ограничивают представительный объем бетона $a-a_1-b-b_1-c-c_1-f-f_1$ (рисунок 5) с физико-механическими характеристиками бетона, армирования и сцепления.

Уровневая модель используется для определения деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{br}(y)$ вдоль оси поперечной арматуры i -го уровня образования разных пространственных трещин, расстояния между ними и ширины их раскрытия в железобетонной составной конструкции.

Характер эпюры деформации поперечной арматуры, полученной с привлечением опытов различных авторов, показывает, что при определенной величине нагрузки деформации на участках, примыкающих к трещинам, начинают уменьшаться и даже меняют знак, деформации же в середине участка между трещинами продолжают увеличиваться до тех пор, пока в этом месте не появляется новая трещина. Анализ характера эпюры деформаций растянутого бетона (рисунок 7) показывает необходимость учета деформационного воздействия в трещине [9].

10. После определения разных типов трещин и вычисления деформаций в бетоне вдоль оси поперечной и продольной арматуры, можно соответственно принятому критерию образования трещин переходить к расчету расстояния между трещинами.

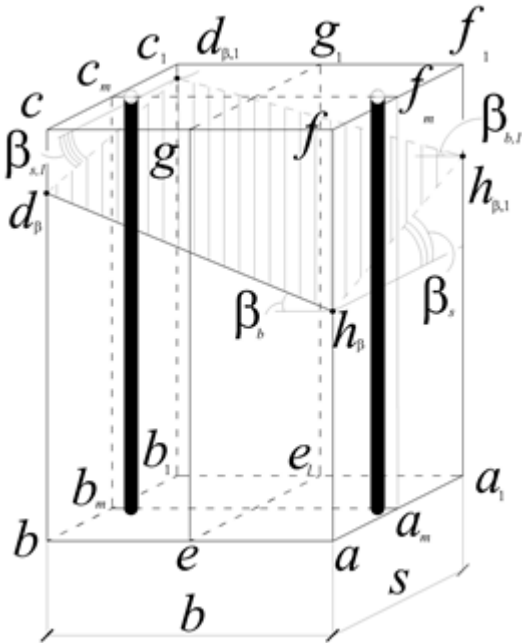
При этом, зная деформации в поперечной арматуре или деформации в продольной арматуре в сечении с координатой y и деформации в бетоне (определяемые с использованием расчетной модели i -го уровня (см. рисунок 4) можно определить относительные взаимные смещения арматуры и бетона:

$$\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw}(y) - \varepsilon_{br}(y), \quad (7)$$

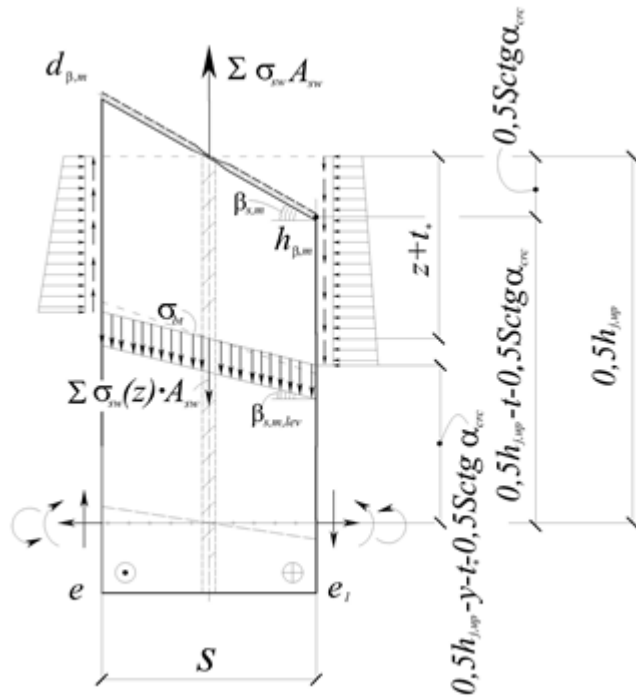
где, деформации арматуры на основании работы [9], определяются выражением:

$$\varepsilon_{sw}(y) = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw}} - \frac{S}{A_{sw} E_{sw}} \int_0^y \tau(y) dy \quad (8)$$

а)



б)



в)

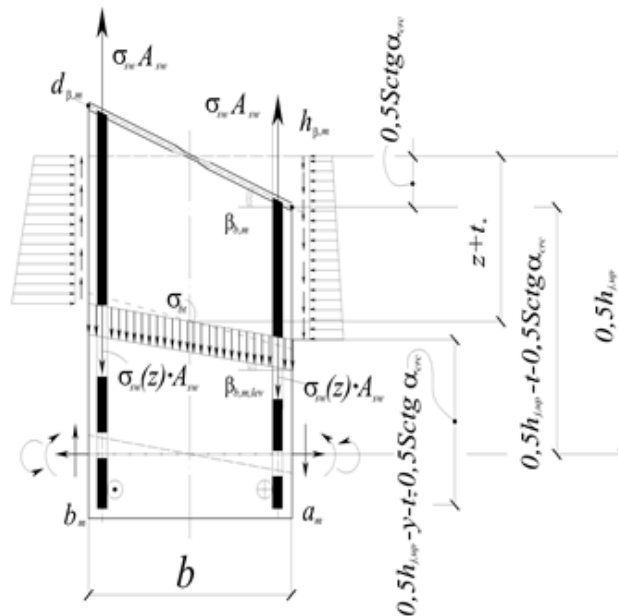


Рисунок 5 - Вырезание представительного объема из железобетонной конструкции, подверженной кручению с изгибом: а – представительный объем бетона, включающий арматурные стержни и часть пространственной трещины; б и в – расчетные модели второго и последующих уровней для определения деформаций растянутого бетона между пространственными трещинами с их продольным и поперечным сечением, соответственно

Здесь S_s – периметр поперечного сечения арматуры; ε_s – деформации арматуры в трещине; ΔT – результирующая условных касательных напряжений в местной зоне, прилегающей к трещине; $\tau(x)$ – условные касательные напряжения

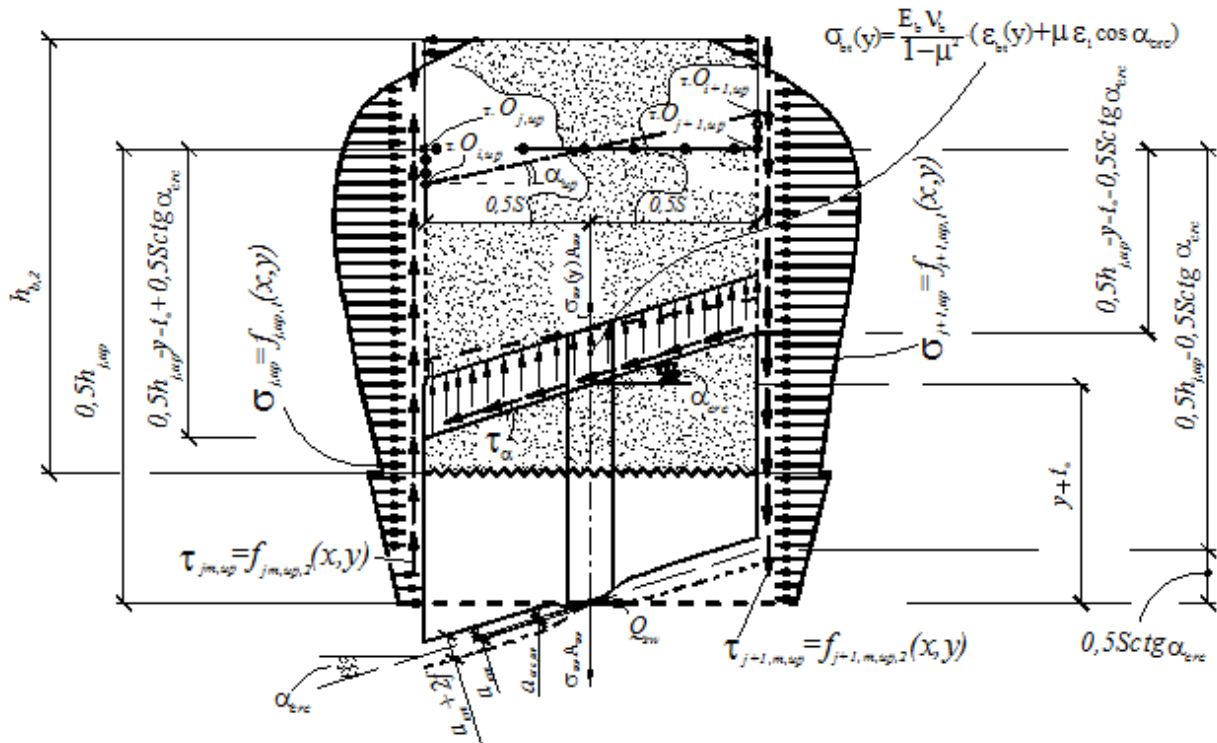


Рисунок 6 - Уровневая модель для определения деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ вдоль оси поперечной арматуры i -го уровня образования различных пространственных трещин, расстояния между ними и ширины их раскрытия в железобетонной составной конструкции

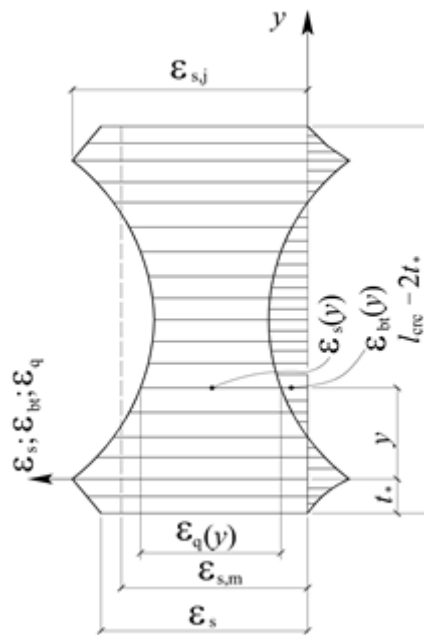


Рисунок 7 - Эпюры деформаций бетона $\varepsilon_{bt}(y)$, арматуры $\varepsilon_{sw}(y)$ и их относительных взаимных смещений $\varepsilon_g(y)$ на участке между наклонными (для плоской модели) или пространственными (для пространственной модели) трещинами в железобетонных конструкциях

После подстановки (7) в (8), с учетом принятого критерия образования трещин, решением неоднородного дифференциального уравнения первого порядка получено:

$$\varepsilon_g(y) = C \cdot e^{-By} + \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (9)$$

где B – параметр сцепления арматуры с бетоном, определяемый формуле $B = \frac{S_S \cdot G}{K \cdot A_S \cdot E_S}$; D_{14} и D_{13} – функции от усилия в сечениях вырезающих представительный объем зависящие от параметров бетона армирования и сцепления.

Постоянная интегрирования C находится из граничного условия, в соответствии с которым, при $y = 0$, $\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{A_{sw} E_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{\nu_b E_b}$.

Тогда

$$C = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{A_{sw} E_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{\nu_b E_b} - \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (10)$$

Здесь $\frac{\sigma_{bt,c}}{\nu_b E_b}$ соответствует деформациям бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ в сечении, расположенном на расстоянии t_* от сечения с трещиной (см. рисунок 5). При этом значения $\sigma_{bt,c}$ принимаются со знаком минус здесь и во всех ниже приведенных формулах.

Окончательно, выражение (9) принимает вид:

$$\varepsilon_g(y) = \left(\varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{\nu_b E_b} - \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B} \right) e^{-By} - \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (11)$$

11. Принимая во внимание критерий образования смежных пространственных трещин, связанный с достижением растянутыми волокнами бетона вдоль осей рабочей арматуры (продольной или поперечной) своих **предельных деформаций** $\varepsilon_{bt,u}$, определяется расстояния между трещинами последующего уровня вдоль осей поперечной (продольной) арматуры:

$$l_{crc} = \frac{2(\ln B'_4 - B'_{t*})}{-B'}, \quad (12)$$

В формулах (10) - (12) где параметры B' , B'_2 , B'_3 , B'_4 являются функциями от граничных деформаций удлинения бетона, параметров, учитывающих эффект нарушения сплошности бетона геометрических характеристик и характеристик сцепления арматуры и бетона; $\sigma_{bt,c}$ и ΔT , – напряжения сжатия и результирующее усилие условного касательного напряжения в местной зоне, прилегающей к трещине (определяются в соответствии с предложениями В. М. Бондаренко и Вл.И. Колчунова [9]).

Таким образом, трещинообразование продолжается до момента разрушения. При этом выделяется не один (как это принято в ряде известных методик), а несколько уровней трещинообразования [22]:

$$\left. \begin{aligned} l_{crc} &> l_{crc,1} - \text{трещин нет;} \\ l_{crc,1} &\geq l_{crc} > l_{crc,2} - \text{первый уровень;} \\ l_{crc,2} &\geq l_{crc} > l_{crc,3} - \text{второй уровень;} \\ \\ l_{crc} &\geq 6t_* - \text{последний уровень.} \end{aligned} \right\} . \quad (13)$$

Сравнивая функциональное и уровневое значение l_{crc} , выполняется анализ возможной реализации появления последующих уровней трещинообразования.

Располагая уровнями трещинообразования вдоль продольной и поперечной арматуры железобетонной конструкции, строится полная картина различных типов трещин, прилегающих к сосредоточенной силе и к опоре.

Наиболее полная степень детализации моделирования трещин (пересекут ли эти трещины поперечную арматуру, либо ее будет пересекать только опасная пространственная трещина) определяются из рассмотрения напряженно-деформированного состояния характерных элементов вдоль хомутов на основании расчетной схемы, последующего уровня приведенной (см рисунок. 5).

12. Раскрытие трещин в железобетоне, рассматривается как накопление относительных взаимных смещений арматуры и бетона на участках, расположенных по обе стороны от трещины; при этом учитывается эффект, связанный с нарушением сплошности бетона (модернизированная гипотеза Томаса).

В соответствии с этой гипотезой задача по определению a_{crc} сводится к нахождению относительных взаимных смещений $\varepsilon_g(y)$ арматуры и бетона на участках между трещинами:

$$a_{crc} = 2 \int_0^{t_*} \varepsilon_g(y_1) dy_1 + \int_0^{\eta \cdot l_{crc}} \varepsilon_g(y) dy + \int_{\eta \cdot l_{crc}}^{l_{crc}} \varepsilon_g(y) dy. \quad (14)$$

После интегрирования и некоторых упрощений, получим:

$$a_{crc} = -\frac{2\Delta T}{G} - \frac{2B_{a,2}}{B} - \frac{2B_2}{B} \ln \left(1 + \frac{B_{a,2} \cdot A_{sw} E_{sw}}{q_{sw} S + B_{a,1} A_{sw} E_{sw}} \right), \quad (15)$$

где G – условный модуль деформаций сцепления арматуры и бетона; S – периметр поперечного сечения арматуры; ε_s – деформации арматуры в трещине; A_{sw} – площадь поперечного сечения хомутов.

Выводы

1. Обоснована актуальность разработки методики моделирования пространственных дискретных трещин при сложном сопротивлении железобетонных конструкций зданий и сооружений, – кручении с изгибом, оказывающих существенное влияние на их напряженно-деформированное состояние, и в первую очередь, на изменение их жесткости.

2. Предложенная расчетная модель и алгоритм расчета трещиностойкости и жесткости сложноподвижных железобетонных конструкций при совместном действии поперечной силы, изгибающего и крутящего моментов и продольной силы с использованием возможностей вычислительного комплекса «Лира-САПР», позволяют наиболее полно оценивать их напряженно-деформированное состояние при наличии различных типов пространственных трещин, с определением расстояния между трещинами, ширины их раскрытия, с учетом возмущений в шве, несовместности деформаций бетона и арматуры, эффекта нару-

шения сплошности бетона, многоуровневого процесса развития трещин и других особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баширов Х.З., Колчунов В.И., Федоров В.С., Яковенко И.А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. М.: Изд. АСВ, 2017. 248 с.
2. Голышев А.Б., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях. Киев: Талком, 2015. 371 с.
3. Yongzhen Li. Final Report Predicting of the Stiffness of Cracked Reinforced Concrete Structures. 2010. 147 p.
4. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Лымарь Я. В. Жесткость железобетонных составных конструкций при наличии различных трещин // Строительство и реконструкция. 2015. №5 (61). С. 17–24.
5. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Тугай Т.В. Методика расчета жесткости плосконапряженных железобетонных конструкций с привлечением программного комплекса «Лири-Про» // 36. наук. праць (галузеve машинобудування, будівництво). Полтава: ПолтНТУ, 2014. Вип. 3(42). Т. 2. С. 55–66.
6. Колчунов В. И., Марьенков Н. Г., Омельченко Е. В. Методика определения жесткости плосконапряженных и стержневых железобетонных составных конструкций при сейсмических воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №2. С. 12–15.
7. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.
8. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Киев, 2008. 480 с.
9. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд. АСВ, 2004. 472 с.
10. Колчунов В. И. Яковенко И. А., Марьенков Н. Г. Анализ схем трещин в железобетонных конструкциях сейсмостойких зданий и их учет по нормам Украины и еврокода // Будівельні конструкції. 2015. Вип. 82. С. 540–549.
11. Pettersen J. S. Non-Linear Finite Element Analyses of Reinforced Concrete with Large Scale Elements: Including a Case Study of a Structural Wall. *Norwegian University of Science and Technology*, 2014. 85 p.
12. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp.1477–1497.
13. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Яковенко И.А., Гарба М.О. Приведение в соответствие опытных данных трещиностойкости железобетонных конструкций их теоретическим значениям // Наука та будівництво. 2018. №1 (15). С. 42–49.
14. Salnikov A., Kolchunov V.I., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 784–789.
15. Iakovenko I., Kolchunov V., Lymar I. (2017). Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. *MATEC Web of Conferences*. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
16. Adheena Thomas, Afia S Hameed. An Experimental Study On Combined Flexural And Torsional Behaviour Of RC Beams. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 04. Issue 05. Pp. 1367–1370.
17. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. No. 4. Pp. 402–411.
18. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2007. No. 7. Pp. 1–7.
19. Emelyanov S., Nemchinov Y., Kolchunov V., Yakovenko I. Details of large-panel buildings seismic analysis. *Enfoque UTE*. 2016. No. 7(2). Pp. 120–134.
20. Демьянов А.И., Колчунов В.И., Яковенко И.А. К задаче динамического догружения арматуры при мгновенном образовании пространственной трещины в железобетонной конструкции при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №9. С. 18–24.
21. Vishnu H. Jariwalaa, Pares V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
22. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15(2017)3, article 455. Pp. 366–375. Doi:10.5937/jaes15-14662.

23. Степанов В.Б. Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2012. №5. С. 6–11.
24. Кирсанов М.Н. Изгиб, кручение и асимптотический анализ пространственной стержневой консоли // Инженерно-строительный журнал. 2014. №5. С. 37–43.
25. Павленко А.Д., Рыбаков В.А., Пихт А.В., Михайлов Е.С. Стесненное кручение многопролетных тонкостенных балок открытого профиля // Инженерно-строительный журнал. 2016. №7(67). С. 55–69.
26. Ватин Н.И., Иванов А.Ю., Рутман Ю.Л., Черногорский С.А., Швецов К.В. Оптимизация конструкций сейсмостойких сооружений по экономическому критерию // Инженерно-строительный журнал. 2017. №8(76). С. 67–83.

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
канд. техн. наук, доц.
E-mail: speccompany@gmail.com

Наумов Николай Валерьевич, аспирант.

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
Аспирант,
E-mail: lich1992@hotmail.ru

Колчунов Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
доктор технических наук, профессор,
E-mail: vlik52@mail.ru

DEMYANOVA.I., NAUMOV N.V., KOLCHUNOV VL.I.

THE CALCULATING METHOD OF CRACK RESISTANCE AND RIGIDITY OF REINFORCED CONCRETE COMPOSITE CONSTRUCTIONS UNDER THE ACTION TORSION WITH BENDING

The article is devoted to the development of calculating methods of the crack resistance and rigidity of reinforced concrete composite constructions under the action torsion with bending. It is based on proposed classification of discrete cracks and working assumptions, which allow to adjust the rigidity parameters noticeably.

It is proposed a new classification of spatial base cracks in reinforced concrete composite constructions which based on an in-depth study of nature of the crack formation. This classification is based on the geometric, force (deformational) and interspersed concentration of the stress-strain state with the corresponding sources-concentrators.

The double console models have been constructed to analyze the resistance along the path of crack and along the seam between different classes of concrete; models of level crack appearance, which allows to search for the distances between the cracks and the width of their opening and to display the multilevel crack development process. The block calculation model of the first level with a complete picture of the cracks and their projections to the horizontal axis in the form of a function of many variables is proposed; the stress-strain state of the calculated cross-sections was determined with the help of the software complex "Lira-CAD". This model takes into account the effect of disturbing the continuity of concrete, the incompatibility of the deformations of concrete and reinforcement and intermediate perturbation in the joint between the concrete.

The width of the crack opening is analyzed along the entire profile of the crack; the change in the distance between the cracks l_{cr} and the change in crack length h_{cr} is taken into account as the load increases (with verification of the multilevel formation process) under various static schemes, reinforcement characteristics, prestressing, various classes of concrete.

The algorithm of calculation provides the construction of a complete picture of crack development and their opening, according to the proposed classification; the determination of the distance be-

tween the cracks and the width of their opening, as well as the projection of contiguous cracks on the horizontal axis.

Keywords: reinforced concrete composite constructions, spatial cracks, rigidity, crack resistance, classification and models of cracks, effect of disturbing the continuity of concrete, disturbance in the seam between the concrete and between the main reinforcement and concrete, two-element cantilever models, models of level crack appearance, width of the crack-opening, distance between cracks, calculation algorithm, projection of cracks on the horizontal axis, function of many variables, block model, the surface of a spatial crack, calculated cross-sections, software complexes.

REFERENCES

1. Bashirov H.Z., Kolchunov V.I., Fedorov V.S., Iakovenko I.A. *Zhelezobetonnye sostavnye konstrukcii zdanij i sooruzhenij* [Reinforced concrete composite constructions of buildings and structures]. Moscow: ASV Publ., 2017. 248 p. (rus).
2. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Iakovenko I.A. *Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstrukcij, zdanij i sooruzhenij, vozvodimyh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in complex engineering-geological conditions]. Kiev: Talcom, 2015. 371 p. (rus).
3. Yongzhen Li. Final Report Predicting of the Stiffness of Cracked Reinforced Concrete Structures. 2010. 147 p.
4. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A., Lymar Ya.V. *Zhestkost' zhelezobetonnykh sostavnykh konstrukcij pri nalichii razlichnykh treshchin* [Rigidity of reinforced concrete composite structures in the presence of various cracks]. *Building and Reconstruction*. 2015. No. 5 (61). Pp. 17–24. (rus).
5. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A., Tugai T.V., Maryenkov N.G., Tugai T.V., Metodika rascheta zhestkosti ploskonapryazhennykh zhelezobetonnykh konstrukcij s privlecheniem programnogo kompleksa «Lira-Pro» [Resistance of plane-stressed walls to a skew in the presence of a diagonal crack with the use of the Lira-Pro software complex]. *Academic journal. Industrial Machine Building*. Poltava: Civil Engineering Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. 2014. No. 3 (42). Vol. 2. Pp. 55–66. (rus).
6. Kolchunov V.I., Maryenkov N.G., Omelchenko E.V. Metodika opredeleniya zhestkosti ploskonapryazhennykh i sterzhnevyykh zhelezobetonnykh sostavnykh konstruktivnykh pri seismicheskikh vozdeystviyakh [The method of rigidity determination of plane-stressed and composite reinforced concrete constructions under seismic influences]. *Industrial and civil engineering*. 2014. Vol. 2. Pp. 12–15. (rus).
7. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.
8. Nemchinov Yu. I. *Seismostojkost' zdanij i sooruzhenij* [Seismic stability of buildings and structures]. Kiev, 2008. 480 p. (rus).
9. Bondarenko, V. M. and Kolchunov, V. I. (2004), *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [The computational model of a power resistance of reinforced concrete], 2004. ASV Publ., Moscow, 472 p. (rus).
10. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A., Maryenkov N.G. Analiz skhem treshchin v zhelezobetonnykh konstrukciyakh seismostojkikh zdanij i ih uchet po normam Ukrainy i evrokoda 8 [Analysis of cracks in reinforced concrete construction of seismic resistant buildings and their accounting according to the norms of Ukraine and Eurocode 8]. *Building Structures*. 2015. Vol. 82. Pp. 540–549. (rus).
11. Pettersen J. S. Non-Linear Finite Element Analyses of Reinforced Concrete with Large Scale Elements: Including a Case Study of a Structural Wall. *Norwegian University of Science and Technology*, 2014. 85 p.
12. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp. 1477–1497.
13. Kolchunov V.I., Demyanov A., Iakovenko I., Garba M. Privedenie v sootvetstvie opytnykh dannykh treshchinostojkosti zhelezobetonnykh konstruktivnykh ikh teoreticheskimi znacheniyami [Bringing the experimental data of reinforced concrete structures crack resistance in correspondence with their theoretical values]. *Science & Construction*. 2018. No 1 (15). Pp 42–49. (rus).
14. Salnikov A., Kolchunov V.I., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 784–789.
15. Iakovenko I., Kolchunov V., Lymar I. (2017). Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. *MATEC Web of Conferences*. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
16. Adheena Thomas, Afia S Hameed. An Experimental Study On Combined Flexural And Torsional Behaviour Of RC Beams. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 04. Issue 05. Pp. 1367–1370.

17. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. No. 4. Pp. 402–411.
18. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2007. No. 7. Pp. 1–7.
19. Emelyanov S., Nemchinov Y., Kolchunov V., Yakovenko I. Details of large-panel buildings seismic analysis. *Enfoque UTE*. 2016. No. 7(2). Pp. 120–134.
20. Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Iakovenko I.A. K zadache dinamicheskogo dogruzheniya armatury pri mgnovennom obrazovanii prostranstvennoj treshchiny v zhelezobetonnoj konstrukcii pri kruchenii s izgibom [To the dynamic loading problem of reinforcement with the instantaneous formation of spatial crack in reinforced concrete construction under the action of torsion with bending]. *Industrial and civil engineering*. 2017. Vol. 9. Pp. 18–24. (rus).
21. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
22. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15(2017)3, article 455. Pp. 366–375. Doi:10.5937/jaes15-14662.
23. Stepanov V.B. Metodika opredeleniya shiriny raskrytiya korrozionnykh treshchin dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruksiy [The method of corrosion crack opening evaluation for the reinforced concrete structures technical state assessment]. *Magazine of Civil Engineering*, 2012, No 5. Pp. 6–11. doi: 10.5862/MCE.31.1. (rus).
24. Kirsanov M.N. Izgib, kruchenie i asimptoticheskiy analiz prostranstvennoy sterzhnevoy konsoli [Bending, torsion and asymptotic analysis of the cantilever bar]. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, No 5. Pp. 37–43. doi: 10.5862/MCE.49.4. (rus).
25. Pavelko A.D., Rybakov V.A., Pikht A.V., Mikhailov E.S. Non-uniform of thin-walled open-section multi-span beams. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, No 7(67). Pp. 55–69. doi: 10.5862/MCE.67.6.
26. Vatin N.I., Ivanov A. Yu., Rutman Y.I., Chernogorskiy S.A., Shvetsov K.V. Earthquake engineering optimization of structures by economic criterion. *Magazine of Civil Engineering*, 2017, No 8(76). Pp. 67–83. doi: 10.18720/MCE.76.7.

Demyanov Aleksey I.

South-West State University, Kursk, Russia,
Candidate in Tech. Sc., Docent, Ass. Professor
E-mail: speccompany@gmail.com

Naumov Nikolay V.

South-West State University, Kursk, Russia,
Postgraduate,
E-mail: lich1992@hotmail.ru

Kolchunov Vladimir I.

South-West State University, Kursk, Russia,
Candidate in Tech. Sc., Docent, Ass. Professor
Doctor of technical Sciences, Professor,
E-mail: vlik52@mail.ru

УДК 69.07

ЛАПШИНОВ А.Е., ТАМРАЗЯН А.Г.

К ВЛИЯНИЮ ПОПЕРЕЧНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ АРМАТУРОЙ

В статье приведены результаты исследования сжатых элементов, армированных как стальной, так и стеклокомпозитной арматурой. Установлен характер напряженно-деформированного состояния и разрушения сжатых образцов. При этом варьировался как шаг поперечной арматуры (хомутов), так и процент продольной армирования. Получены зависимости напряжения-деформации, напряжения-коэффициент Пуассона, напряжения-коэффициент объемной деформации для испытываемых образцов. В результате исследований установлено, что несущая способность сжатых элементов с уменьшением шага хомутов увеличивается. Появление трещин в образцах наблюдалось при нагрузке около 90% от разрушающей. При этом уменьшаются поперечные деформации, снижается коэффициент Пуассона, повышается модуль упругости. Применение стеклокомпозитной арматуры с уменьшенным шагом продольной и поперечной арматуры позволяет добиться значительного увеличения продольных деформаций при уменьшении поперечных деформаций по сравнению с контрольным образцом без армирования.

Ключевые слова: арматура стеклокомпозитная, колонна, прочность, сжатие, пластичность, потеря устойчивости.

Несмотря на выход в России ГОСТа на композитную полимерную арматуру с методикой испытания на сжатие [8] и официальных норм проектирования конструкций с композитной полимерной арматурой (Приложение Л к СП 63.13330.2012 и СП 295.1325800.2017) [9,10] вопрос проектирования сжатых элементов так и остается открытым. Согласно Приложения Л расчетное сопротивление сжатию композитной полимерной арматуры при расчетах должно приниматься равным нулю. Однако, как было показано в исследованиях [2,3] композитная арматура может эффективно применяться в центрально сжатых элементах. Как было представлено в статьях [2,3,6] и нормативных документах [11,13] на сегодняшний день существует необходимость дальнейших исследований композитной арматуры в сжатых элементах. В действительности, ведутся исследования поведения композитной полимерной арматуры в армированных бетонных конструкциях [1,3,4,]. Некоторые исследования показали перспективу использования композитной арматуры в сжатых бетонных армированных элементах с частой постановкой поперечной арматуры [3,12]. Кроме того, происходит внедрение композитной арматуры в сжатые армированные бетонные конструкции массового применения [5]. Однако, отдельные исследования показывают, что с традиционной постановкой поперечной арматуры колонны, армированные композитной арматурой, могут иметь более низкую несущую способность и большую деформативность, нежели чем аналогичные колонны с армированием стальной арматурой [1,4].

Для оценки степени влияния продольного и поперечного армирования неметаллической композитной арматурой на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, необходимо было исследовать влияние следующих параметров:

- шага поперечной арматуры (хомутов);
- вида рабочей арматуры (стеклокомпозит, углекомпозит, сталь);
- процента продольного армирования.

В соответствие с программой исследований в качестве опытных образцов были запроектированы бетонные призмы квадратного сечения размером 200×200×600 мм, изготовленные из тяжелого бетона кубиковой прочностью 26,3 Н/мм².

Все образцы армировались стержнями рабочей продольной арматуры Ø12 или 6 мм из стеклокомпозитной марки «Армастек» с навивкой, Ø12 мм углекомпозитной арматурой с песчаной посыпкой или стальной арматуры класса А500. Для установки в проектное положение стержни продольной арматуры были соединены со стальными хомутами вязальной проволокой. Поперечная арматура была принята в виде гнутых хомутов из арматуры класса А240 диаметром 6 мм, огибающих продольную арматуру. В образцах с армированием было применено 2 вида замкнутых хомутов – стальные и композитные (стеклокомпозитные) марки «Гален» с навивкой (рис. 1). Шаг хомутов варьировался – от 50 до 167 мм. При уменьшенном шаге хомутов создавался эффект косвенного армирования, что положительно сказывается на увеличении несущей способности сжатого бетона [7]. Характеристики опытных образцов представлены в табл. 2. Армирование опытных образцов представлено на рис. 2.

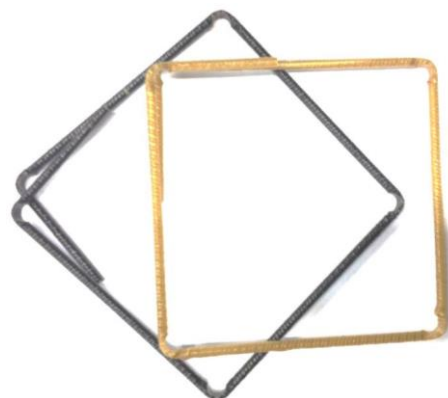


Рисунок 1 – Хомуты из стеклокомпозитной и базальтокомпозитной арматуры

Перед проведением исследований для получения физико-механических характеристик арматуры были проведены испытания по ГОСТ 31938-2012 [8] для композитной арматуры и по ГОСТ 12004 для стальной арматуры. Результаты испытаний приведены в таблице 1. Из анализа результатов испытаний можно заметить, что композитная арматура обладает более высоким значением временного сопротивления, не имеет площадки текучести, диаграмма ее деформирования линейная вплоть до разрушения. В то же время модуль у стеклокомпозитной арматуры упругости ниже, чем у стальной арматуры в 3 раза на растяжение и в почти в 7 раз на сжатие.

Таблица 1 – Сравнительные усредненные физико-механические характеристики арматуры, использованной для армирования опытных образцов: стальной арматуры классов А240 и А500 и стеклокомпозитной арматуры марок «Армастек» и «Гален»

№ п/п	Наименование характеристики	Тип арматуры				
		Ø6 А240	Ø12 А500	Ø6 АСК	Ø12 АСК	Ø12 АУК
1.	Номинальный диаметр, мм	6	12	5,6	11,6	12,0
2.	Фактическая площадь поперечного сечения, мм ²	28,3	113	24,7	106	113
3.	Временное сопротивление, МПа	501	679	1110	1106	1297
4.	Предел текучести, МПа	376	598	-	-	-
5.	Относительное удлинение, %	16	9,7	2,41	2,36	2,1
6.	Модуль упругости при растяжении, ГПа	199	200	58123	54191	134848
7.	Предел прочности при сжатии, МПа	240	679	350	600	906
8.	Модуль упругости при сжатии, ГПа	200	200	30	30	38

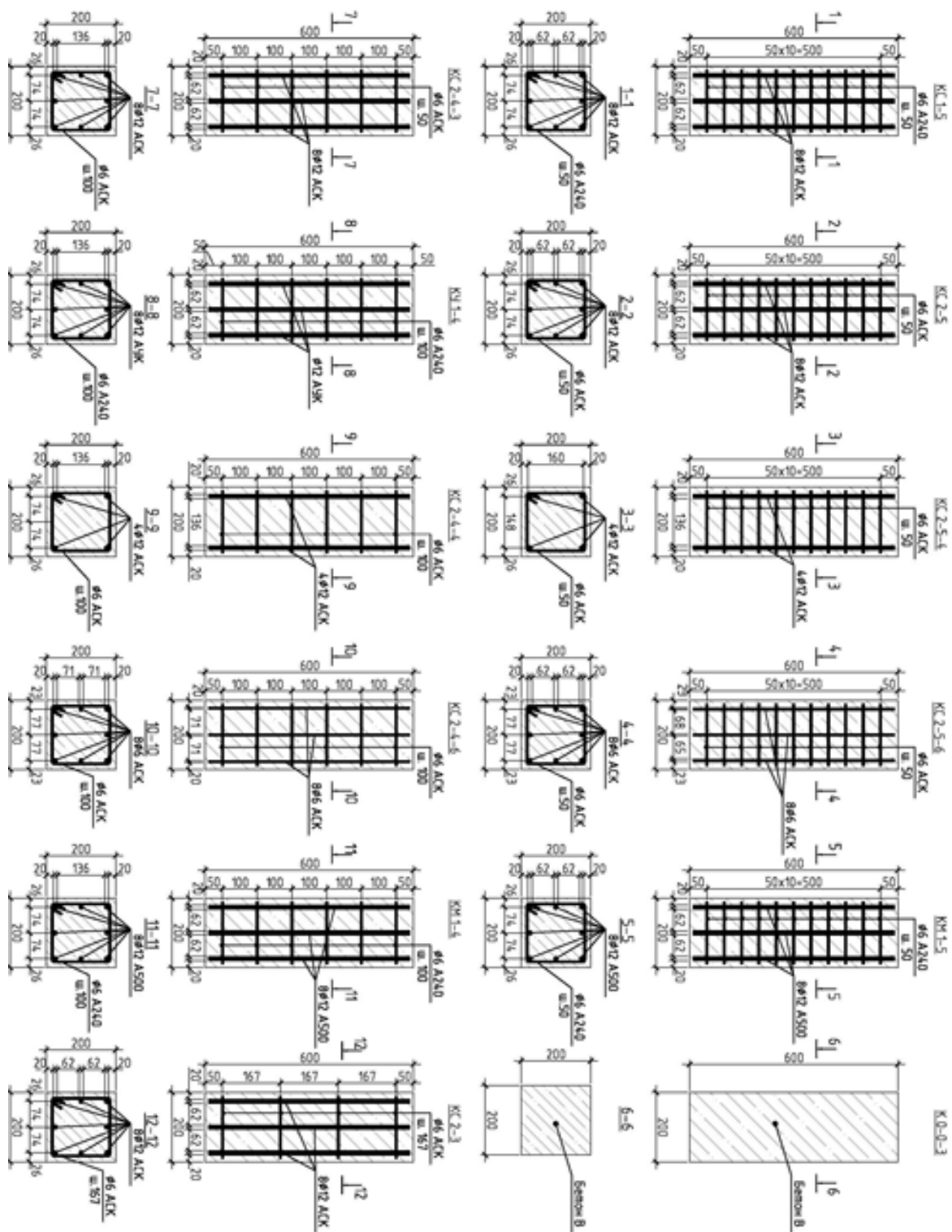


Рисунок 2 – Армирование опытных образцов

Результаты испытаний

Для проведения всестороннего анализа поведения испытываемых образцов под нагрузкой строились графики напряжения-деформации (σ - ε), модуля упругости образцов (E), коэффициента Пуассона (ν) и коэффициента объёмной деформации (ΔQ).

Изменение модуля упругости образцов на каждом этапе загрузки определялось, используя закон Гука:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

где σ – напряжения в образце на определенном этапе загрузки;

ε – соответствующее значение продольной деформации.

Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации) характеризует упругие свойства материала, т.е. насколько расширяется образец при одноосном сжатии и вычисляется как отношение значения поперечной деформации к продольной:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{пр}}} \quad (2)$$

Коэффициент объёмной деформации вычислялся по формуле:

$$\Delta Q = \varepsilon_{\text{пр}} - 2\varepsilon_{\text{поп}} \quad (3)$$

Таблица 2 – Характеристики опытных образцов-колонн

№ п/п	Маркировка колонн	Возраст бетона к моменту испытания, сут.	Продольное армирование		Поперечное армирование		Разрушающая нагрузка, кН
			Диаметр, класс	Процент армирования	Диаметр, класс	Шаг, мм	
1	К 0-0-3	489	-	-	-	-	849,6
2	КС 2-3	537	8Ø12 АСК	2,26	Ø6 АСК	167	849,6
3	КС 2-4-6	480	8Ø6 АСК	0,566	Ø6 АСК	100	901,3
4	КС 2-4-3	465	8Ø12 АСК	2,26	Ø6 АСК	100	901,3
5	КС 2-4-4	386	4Ø12 АСК	1,13	Ø6 АСК	100	849,6
6	КУ 1-4	446	8Ø12 АУК	2,26	Ø6 А240	100	1042,3
7	КМ 1-4	507	8Ø12А500	2,26	Ø6 А240	100	1091
8	КМ 1-5	386	8Ø12А500	2,26	Ø6 А240	50	1140
9	КС 1-5	441	8Ø12 АСК	2,26	Ø6 А240	50	1042,2
10	КС 2-5	514	8Ø12 АСК	2,26	Ø6 АСК	50	993,6
11	КС 2-5-4	391	4Ø12 АСК	1,13	Ø6 АСК	50	901,3
12	КС 2-5-6	458	8Ø6 АСК	0,566	Ø6 АСК	50	936,5

Примечание: Первая буква шифра колонны обозначает вид конструкции («К» - колонна); вторая буква – тип композитной арматуры («М» - металлическая арматура; «С» - стеклокомпозитная арматура; «У» - углекомпозитная арматура). Первая цифра шифра обозначает тип хомутов («1» - стальные хомуты Ø6 мм из арматуры класса А240; «2» - композитные хомуты Ø6 мм из стеклокомпозита); вторая цифра – шаг хомутов; («3» - 166,7 мм; «4» - 100 мм; «5» - 50 мм). Цифра после шифра обозначает диаметр или количество продольной арматуры: «4» - 4 рабочих стержня вместо 8-ми. «6» - диаметр рабочей арматуры 6 мм вместо 12 мм, «3» - замкнутые хомуты АСК.

Различный характер разрушения был зафиксирован для образца из чистого бетона (без армирования) и образцов армированных стеклокомпозитной и стальной арматурой.

Разрушение контрольного образца из чистого бетона характеризовалось образованием наклонной диагональной трещины через всю высоту образца. Продолжение приложения нагрузки вызвало разделение образца на 2 части вдоль трещины. Это было предопределено отсутствием продольной и поперечной арматуры, которая может давать нагельный эффект для предотвращения смещения бетона вдоль плоскости разрушения.

На начальных этапах нагружения поведение образцов схожее и отличия незначительны.

Однако с повышением уровня нагрузки и, соответственно, напряжений в армированных образцах хомуты сдерживают поперечные деформации, тем самым повышая продольные. Логично, что чем чаще шаг хомутов, тем больше ограничение поперечных деформаций и тем больше увеличение продольных деформаций.

У контрольного образца перед разрушением при одинаковых напряжениях поперечные деформации более чем в 3 раза выше, чем у образца со стальной арматурой и в 1,5...2,5 раза выше, чем у образцов с армированием композитной арматурой.

Верхняя граница трещинообразования определялась по изменению графика объемной деформации ΔQ (рис 3,4). Очевидно, что у образцов со стальной арматурой верхняя граница трещинообразования смещена вверх относительно контрольного образца из чистого бетона. У образцов со стеклокомпозитной арматурой из-за низкого модуля упругости стержней верхняя граница трещинообразования расположена ниже, чем у образца со стальной арматурой и немного выше, чем у контрольного образца без армирования.

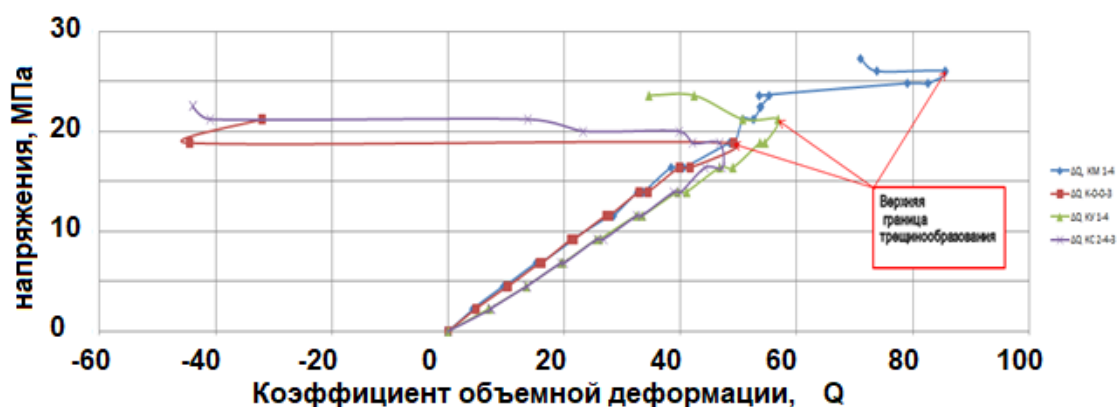


Рисунок 3 - График напряжения-коэффициент объемной деформации образцов КМ 1-4, К 0-0-3, КУ 1-4, КС 2-4-3

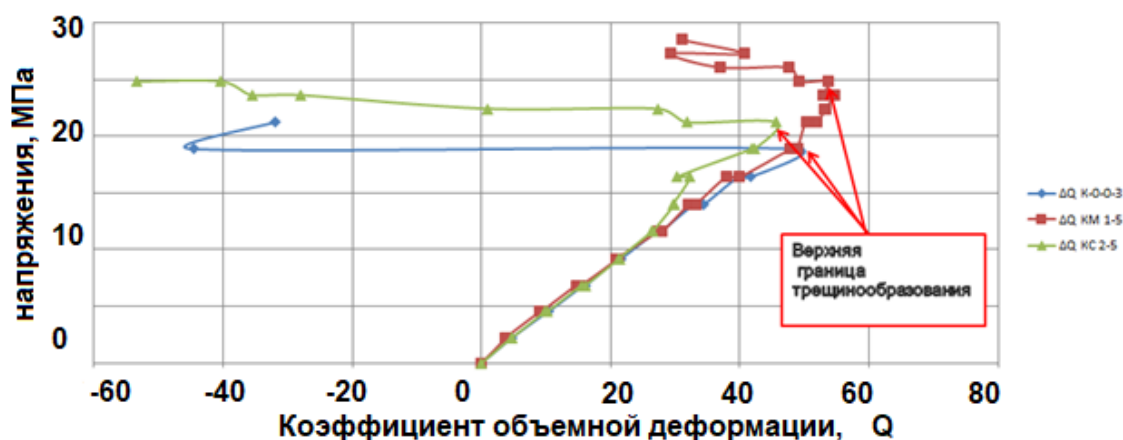


Рисунок 4 - График напряжения-коэффициент объемной деформации образцов КМ 1-5, К 0-0-3, КС 2-5

Одной из особенностей поведения образцов под нагрузкой можно отметить более позднее образование больших значений быстронатекающих (неупругих) продольных деформаций при выдержке у образцов, армированных стальной арматурой по сравнению с образцами из чистого бетона (без армирования) и армированных стеклокомпозитной арматурой.

Данный факт можно объяснить значительно более низким модулем упругости композитной арматуры (в 4 раза ниже на растяжение и в 7 раз ниже на сжатие) по сравнению с металлической арматурой. Предельная деформация сжатого бетона связана с процессом перераспределения усилий с бетона на упруго работающую арматуру (в результате проявления неупругих деформаций в бетоне), что приводит к уменьшению напряжений в бетоне. Степень перераспределения усилий главным образом зависит от количества продольной стеклокомпозитной арматуры (процента армирования) и напряженного состояния бетона в сечении элемента, а также модуля упругости продольной арматуры.

После образования трещин рост неупругих (пластических) деформаций становится более интенсивным, что связано с разрыхлением (разуплотнением) структуры бетона.

Образцы с армированием стальной и стеклокомпозитной арматурой показали схожее начальное поведение. Поведение армированных образцов можно отнести к относительно пластичному и более сложному, нежели чем у образца без армирования. Во время испытаний вертикальные волосяные трещины начинали появляться на уровне загрузки 85-95% от разрушающей нагрузки. До этого на поверхности образцов трещины не наблюдались. Вертикальные трещины постепенно увеличивались по длине и ширине с увеличением нагрузки до разрушающей. На стадии, предшествующей разрушению бетона (0,8-0,9R) происходит объединение микротрещин в макротрещины, что сопровождается появлением заметных глазу трещин в образце. Интересно отметить, что образцы с более частым шагом поперечной арматуры (хомутов) имели меньшие внешние разрушения по сравнению с образцами с редкой постановкой поперечной арматуры (рис. 5).



Рисунок 5 – Общий вид испытанных образцов

Влияние параметров армирования на прочность и деформативность образцов. Тип арматуры

Влияние типа продольной арматуры (сталь, композит) оценивалось на образцах с идентичным армированием с разным шагом поперечного армирования – 50 (КМ 1-5, КС 1-5) и 100 (КМ 1-4, КС 2-4, КУ 1-4) мм (рис. 6,7). Образцы, армированные композитной арматурой с шагом поперечной арматуры 50 и 100 мм демонстрировали поведение, аналогичное образцам со стальной арматурой с тем же шагом хомутов.

Использование стеклокомпозитной и стальной арматуры увеличило разрушающую нагрузку в 1,22 и 1,33 раза соответственно.

Влияние использования композитной арматуры вместо стальной можно считать незначительным. Несущая способность образца, армированного стеклокомпозитной арматурой (при $\mu=2,26\%$, $s=50$ мм) всего на 9,6% ниже, чем у аналогичного по армированию образца со стальной арматурой. А несущая способность образца, армированного углекомпозитной арматурой (при $\mu=2,26\%$, $s=100$ мм), всего на 4,4% ниже, чем у аналогичного по армированию образца со стальной арматурой.

Также можно отметить, что образцы с армированием стальной арматурой демонстрировали большую пластичность перед разрушением.

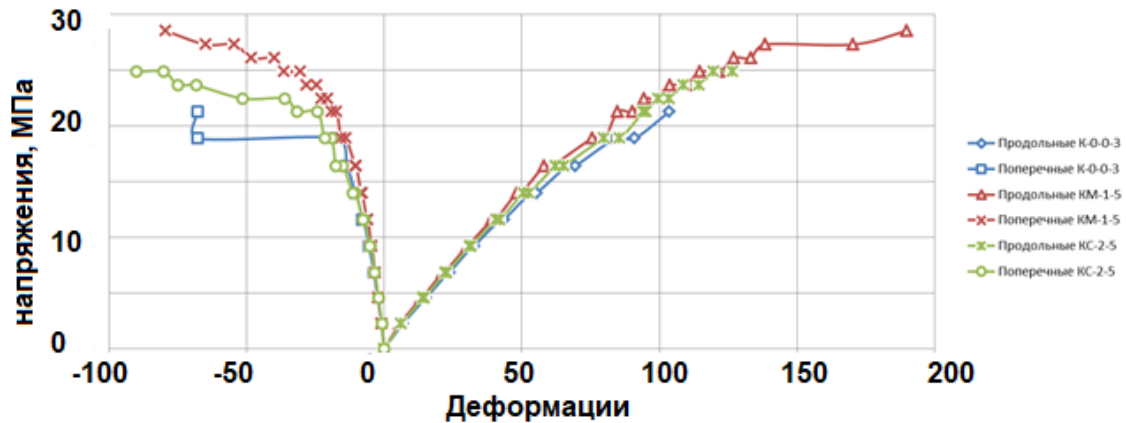


Рисунок 6 – Диаграмма σ - ε образцов КМ 1-5, КС 2-5, К 0-0-3

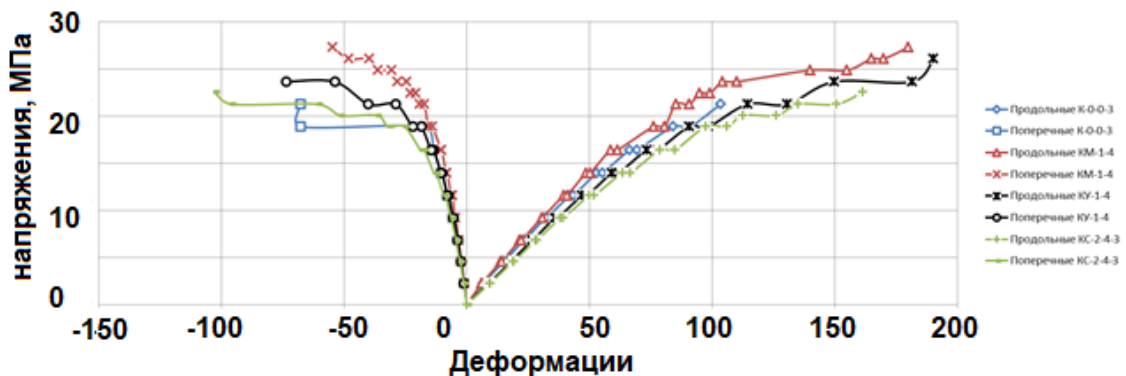


Рисунок 7 – Диаграмма σ - ε образцов КМ 1-4, КУ 1-4, КС 2-4-3, К 0-0-3

Шаг поперечной арматуры

Влияние шага поперечной арматуры оценивалось на образцах с одинаковым процентом армирования и разным шагом хомутов. На рис. 8,9 представлены диаграммы зависимости прочности опытных образцов от шага поперечной арматуры. Их анализ показывает, что с уменьшением шага хомутов до минимального (50 мм) прочность образцов возрастает в 1,22 и 1,33 раза при армировании стеклокомпозитной и стальной арматурой соответственно. С уменьшением шага хомутов и, соответственно, с увеличением эффекта обжатия внутреннего бетонного ядра предельные деформации бетона также возрастают. По сравнению с контрольным образцом из чистого бетона без армирования предельные продольные деформации в 2 раза больше у образцов с частой постановкой поперечной арматуры (50 мм). Кроме того, при одинаковом уровне напряжений (21,24 МПа) в образце со стальной арматурой (КМ 1-5) поперечные деформации были почти в 4 раза меньше, а в образце со стеклокомпозитной ар-

матурой (КС 2-5) почти в 3 раза меньше, чем у контрольного образца из бетона без армирования.

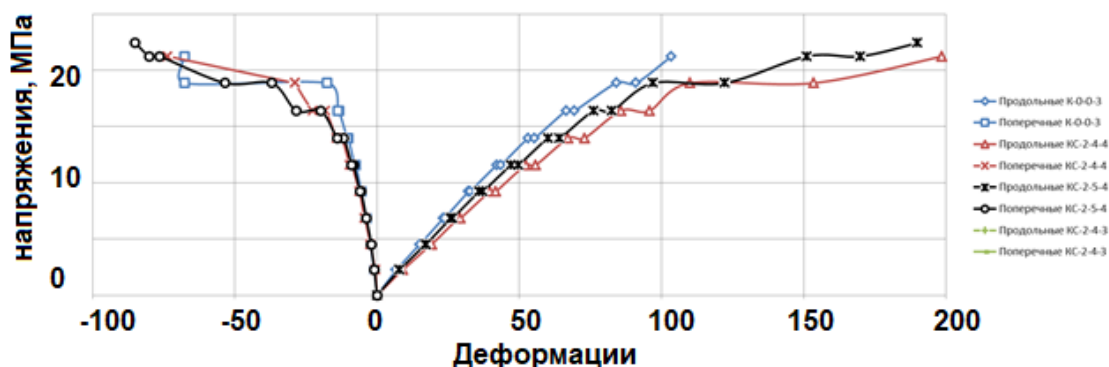


Рисунок 8 – Диаграмма σ - ε образцов КС 2-4-4, КС 2-5-4, К 0-0-3

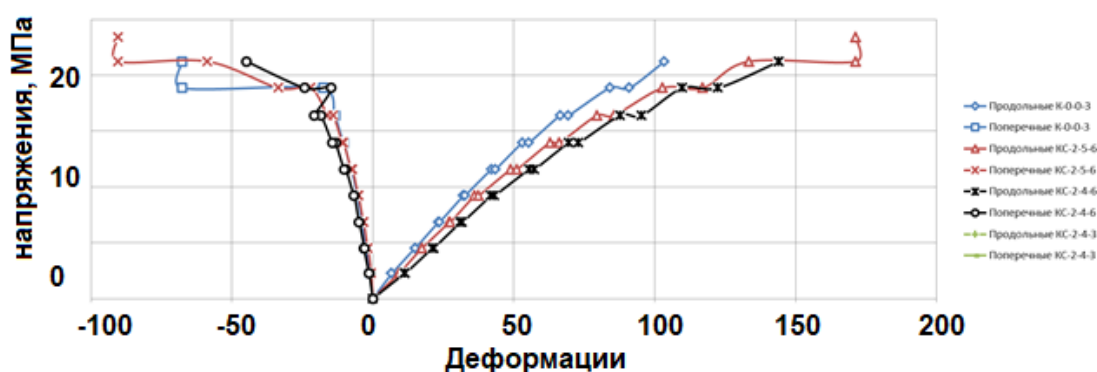


Рисунок 9 – Диаграмма σ - ε образцов КС 2-4-6, КС 2-5-6, К 0-0-3

Процент армирования продольной арматуры

На рис. 10,11 представлены диаграммы напряжения-деформации 2-х групп образцов, запроектированных с шагом хомутов 50 мм (КС 2-5-6, КС 2-5-4, КС 2-5) и 100 мм (КС 2-4-6, КС 2-5-4, КС 2-4-3) с тремя разными значениями коэффициента продольного армирования (0,565, 1,13 и 2,26% соответственно). Образцы с меньшим процентом армирования имели более хрупкое разрушение, сравнительно с образцами с более высоким значением продольного армирования. В то же время можно отметить, что низкие значения коэффициента продольного армирования практически не дают увеличения прочности опытных образцов.

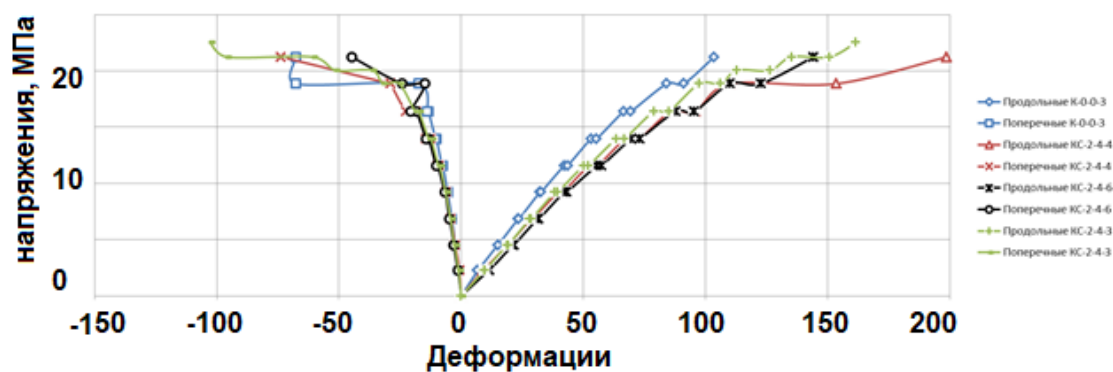


Рисунок 10 – Диаграмма σ - ε образцов КС 2-4-4, КС 2-4-6, КС 2-4-3, К 0-0-3

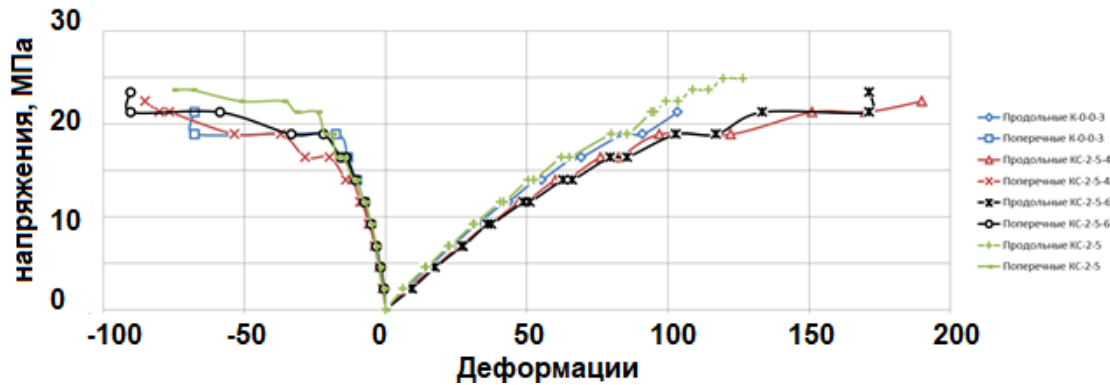


Рисунок 11 – Диаграмма σ - ε образцов KC 2-5-4, KC 2-5-6, KC 2-5, K 0-0-3

Выводы по результатам исследования.

1. Испытанные образцы-призмы, армированные стальной и композитной арматурой, показывают схожее поведение под нагрузкой. У образцов с армированием стеклокомпозитной арматурой с частой постановкой поперечной арматуры наблюдается пластичный участок перед разрушением, как и у образцов с армированием стальной арматурой.
2. При одинаковом армировании стальная арматура даёт увеличение прочности на 33%, а стеклокомпозитная арматура даёт увеличение прочности на 22% по сравнению с бетонными образцами без армирования.
3. У образцов, армированных стеклокомпозитной арматурой с частой постановкой поперечной арматуры (шаг 50 мм) прочность всего на 9,6% ниже, чем у образцов, армированных стальной арматурой с аналогичным армированием и на 22% выше, чем прочность бетонных образцов без армирования.
4. Применение стеклокомпозитной арматуры с уменьшенным шагом (как продольной, так и поперечной) позволяет добиться значительного увеличения продольных деформаций при уменьшении поперечных деформаций по сравнению с контрольным образцом без армирования.
5. Использование стеклокомпозитной арматуры с частой постановкой поперечной арматуры уменьшает коэффициент Пуассона армированных образцов по сравнению с контрольными бетонными образцами без армирования, т.е. уменьшает поперечные деформации при увеличении продольных.
6. Модуль упругости у образцов, армированных с частым шагом поперечной арматуры стеклокомпозитной арматурой выше, чем у образцов с более редким шагом поперечной арматуры и образца без армирования.
7. У образцов с маленьким шагом поперечной арматуры верхняя граница трещинообразования смещена вверх относительно контрольного образца без армирования, т.е. трещины образуются позже.
8. Результаты приведенных в статье испытаний помогут при разработке методики расчета сжатых элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Н.Г., Пахратдинов А.А. Прочность сжатых железобетонных элементов, изготовленных на щебне из бетона // Строительство и реконструкция. 2014. № 6 (56). С. 101-106.
2. Лапшинов А.Е. Исследование работы СПА и БПА на сжатие // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 52—57.

3. Лапшинов А.Е., Мадатян С.А. Колонны, армированные стеклопластиковой и базальтопластиковой арматурой // Доклад на II Международной, III Всероссийской Конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон — взгляд в будущее». Москва, РАН, май 2014.
4. Невский А.В., Балдин И.В. Прочность и деформативность сжатых бетонных элементов с продольным армированием стальными, стеклопластиковыми и углепластиковыми стержнями при статическом нагружении // В сборнике: Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014) Материалы Международной научной конференции молодых ученых. 2014. С. 315-321.
5. Николаев В.Н., Степанова В.Ф. Применение композитной полимерной арматуры для опор контактной сети с анкерным креплением на фундаментах // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 79-84.
6. Плевков В.С., Балдин И.В., Невский А.В. К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпозитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 96-113.
7. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 41-44.
8. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия.
9. СП 63.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. (с Изм. №1,2).
10. СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования.
11. American Concrete Institute (ACI) Committee 440, [2015]. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-15, Farmington Hills, Mich.
12. Afifi, M. Z., Mohamed, H., and Benmokrane, B., [2013a]. —Axial Capacity of Circular Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars and Spirals. Journal of Composites for Construction.
13. Canadian Standards Association (CSA), [2012]. Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers, CAN/CSAS806-12, Rexdale, Toronto.

Лапшинов Андрей Евгеньевич

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия,
Старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, зав. лабораторией обследования зданий и сооружений (ЛОЗИС),
E-mail: La686@ya.ru

Тамразян Ашот Георгиевич

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия,
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций (ЖБК),
E-mail: tamrazian@mail.ru

LAPSHINOV A. E., TAMRAZYAN A. G.

**TO THE INFLUENCE OF TRANSVERSE REINFORCEMENT
TO STRENGTH AND DEFORMABILITY OF CONCRETE
COMPRESSIVE MEMBERS REINFORCED WITH FRP
REINFORCEMENT**

The paper contains the results of testing of compressive members reinforced longitudinally and transversally with steel and GFRP reinforcement. The spacing of transverse reinforcement (stirrups) and longitudinal reinforcement ratio varied in the specimens. The stress-strain, stress-Poisson's ration, stress-volumetric strain relationships for tested specimens are given. It was observed that the appearance of cracks occurred with loading 90% of total. By the results of testing investigated that with the decreasing of spacing of transverse reinforcement the strength of specimens increased. It can be concluded that by using small spacing of transverse reinforcement transverse strains and Poisson's ratio decreasing, while modulus of elasticity increasing.

Key words: FRP, column, strength, compression, ductility, buckling.

REFERENCES

1. Golovin N.G., Pakhratdinov A.A. Prochnost' szhatykh zhelezobetonnykh elementov, izgotovlennykh na shchebne iz betona [Strength of compressed reinforced concrete elements made on crushed stone from concrete]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2014. No 6 (56). Pp: 101-106. (rus)
2. Lapshinov A.Ye. Issledovaniye raboty SPA i BPA na szhatiye [Study of the work of SPA and BPA on compression]. *Vestnik MGSU*. 2014. № 1. S. 52-57. (rus)
3. Lapshinov A.Ye., Madatyan S.A. Kolonny, armirovannyye stekloplastikovoy i bazal'toplatikovoy armaturoy [Columns reinforced with fiberglass and basalt-plank armature]. Doklad na II Mezhdunarodnoy, III Vserossiyskoy konferentsii po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushcheye» [Report at the II International, III All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete "Concrete and reinforced concrete - a look into the future"]. Moscow, Russian Academy of Sciences, May 2014.
4. Nevskiy A.V., Baldin I.V. Prozhnost' i deformatsiya szhatykh betonnykh elementov s prodol'nym armirovaniyem stal'nykh materialov [Strength and deformability of compressed concrete elements with longitudinal reinforcement of steel, fiberglass and carbon-fiber rods under static loading]. V sbornike: Perspektivnyye materialy v stroitel'stve i tekhnike (PMST-2014) Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh [Perspective Materials in Construction and Engineering (PMST-2014). Proceedings of the International Scientific Conference of Young Scientists]. 2014. Pp: 315-321. (rus)
5. Nikolayev V.N., Stepanova V.F. Primeneniye kompozitnoy polimernoy armatury dlya opor kontaktnoy seti s ankernym krepleniyem na fundamentakh [Application of composite polymeric reinforcement for supports of the contact network with anchorage on the foundations]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No 7. Pp: 79-84. (rus)
6. Plevkov V.S., Baldin I.V., Nevskiy A.V. K opredeleniyu raschetnykh napryazheniy v stal'noy i uglekompozitnoy armature normal'nykh secheniy zhelezobetonnykh elementov [To the determination of design stresses in steel and carbon composite reinforcement of normal sections of reinforced concrete elements]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. No 1 (60). Pp: 96-113. (rus)
7. Tamrazyan A.G., Manayenkov I.K. K raschetu izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniyem szhatoy zony [To the calculation of bent ferro-concrete elements with indirect reinforcement of the compressed zone]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No 7. Pp: 41-44. (rus)
8. GOST 31938-2012. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstruksiy. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Composite polymer reinforcement for the reinforcement of concrete structures. General specifications]. (rus)
9. SP 63.13330.2012. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii (s izm. №1,2) [Russian Building Code. Concrete and reinforced concrete structures]. (rus)
10. SP 295.1325800.2017 Konstruksii betonnyye, armirovannyye polimernoy kompozitnoy armaturoy. Pravila proyektirovaniya [Concrete structures reinforced with polymeric composite reinforcement. Design code]. (rus)
11. American Concrete Institute (ACI) Committee 440, [2015]. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-15, Farmington Hills, Mich.
12. Afifi, M. Z., Mohamed, H., and Benmokrane, B. Axial Capacity of Circular Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars and Spirals. *Journal of Composites for Construction*. 2013
13. Canadian Standards Association (CSA), [2012]. Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers, CAN/CSAS806-12, Rexdale, Toronto.

Lapshinov Andrey E.

National research Moscow state University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Senior lecturer, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Head of the inspection of buildings and structures laboratory,
E-mail: La686@ya.ru

Tamrazyan Ashot G.

National research Moscow state University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor of technical Sciences, Professor, Head of the reinforced concrete and masonry structures department,
E-mail: tamrazian@mail.ru

УДК 624.04

СЕРПИК И.Н., ШКОЛЯРЕНКО Р.О.

РАСЧЕТ СИСТЕМ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ КОРЫТООБРАЗНОГО ПРОФИЛЯ С УЧЕТОМ СТЕСНЕННОГО КРУЧЕНИЯ

Разрабатывается алгоритм для анализа методом конечных элементов деформаций рамных конструкций из тонкостенных стержней корытообразного профиля с поперечными ребрами жесткости. Исследование, выполненное с помощью пластинчатых конечных элементов, показало, что предположение о приблизительном равенстве бимоментов в узлах соединения пар стыкующихся стержней такого типа в общем случае является неприемлемым. Предложено объяснение данного явления на основе рассмотрения особенностей передачи внутренних силовых факторов в узлах соединения тонкостенных профилей. Введена пошаговая схема учета скачков по бимоментам на стыках стержней. Достаточно высокая точность представляемой методики проиллюстрирована на примере расчета тонкостенных конструкций из двух и трех стержней корытообразного профиля. Полученные результаты позволяют повысить точность расчетов несущих систем, образуемых конструктивными элементами с корытообразной формой поперечного сечения, при использовании стержневых расчетных схем.

Ключевые слова: тонкостенные стержни, корытообразные профили, стесненное кручение, бимоменты, стыковка стержней, конечные элементы.

В современных строительных нормах [1] бимомент рассматривается в качестве одного из внутренних силовых факторов, учитываемых при определении нормальных напряжений в поперечных сечениях стержней. Данный аспект оценки нагруженности конструктивных систем может иметь существенное значение для тонкостенных стержней открытого профиля, подверженных стесненному кручению. Для расчета отдельных стержней в этих случаях могут быть эффективно использованы бессдвиговая [2, 3] и полусдвиговые [4, 5] теории расчета. Большое внимание уделялось вопросам конечно-элементного моделирования деформаций тонкостенных стержней [6-22]. В то же время методология расчета рамных конструкций с учетом стесненного кручения еще требует развития. Наибольшее распространение получило использование рассмотренного в книге [3] предположения о равенстве бимоментов и мер деформаций на стыках пар стержней. В то же время в работе [21] отмечается, что эти условия во многих случаях существенно нарушаются. Данная проблема может быть принципиально решена на основе комбинированного подхода, когда вне зоны стыковочных узлов используются стержневые конечные элементы, а деформации стыков описываются с помощью оболочечных конечных элементов [22]. В то же время при этом существенно усложняются расчетные схемы. В настоящей работе выявлена закономерность передачи внутренних силовых факторов в узлах соединения стержней корытообразного профиля (швеллеров) с поперечными ребрами жесткости в отношении скачков по бимоментам. Предложена быстросходящаяся итерационная схема, позволяющая учесть отсутствие баланса бимоментов на стыках стержней такого типа.

Исследование условия передачи бимомента на стыке стержней. Рассмотрим взаимодействие стальных стержней корытообразного профиля на примере системы, показанной на рисунке 1. В качестве профиля стержней принимался швеллер №10П по ГОСТ 8240-97. В схеме предусмотрены поперечные ребра жесткости R . Объект имеет жесткое защемление H и нагружен парой сил с моментом $M = 1 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Расчет выполнялся в программном комплексе Autodesk N Ei Nastran (лицензия ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» № PR-05918596) с помощью конечно-элементной модели,

сформированной из 10602 прямоугольных пластинчатых конечных элементов (рис. 2), имеющих по 4 угловых узла.

Для ряда поперечных сечений обеих стержней были вычислены значения бимомента B_{ω} на основе напряжений, полученных с помощью пластинчатой модели. При этом использовалась приближенная зависимость

$$B_{\omega} = \sum_{i=1}^n \sigma_i t_i l_i \omega_i, \quad (1)$$

где n – число конечных элементов, разделяемых рассматриваемым поперечным сечением по отрезкам Λ_i его срединных поверхностей; σ_i – мембранное нормальное напряжение для данного сечения в конечном элементе i , осредненное по отрезку Λ_i ; t_i – толщина конечного элемента i ; l_i – длина отрезка Λ_i ; ω_i – главная секториальная координата центра этого отрезка.

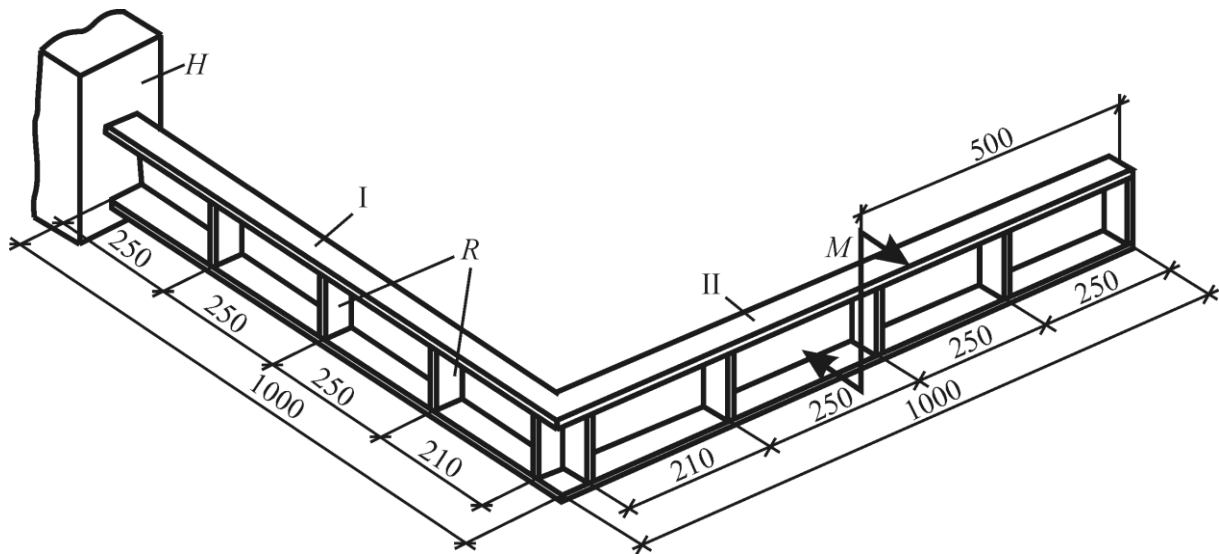


Рисунок 1 – Двухстержневая система: I, II – стержни

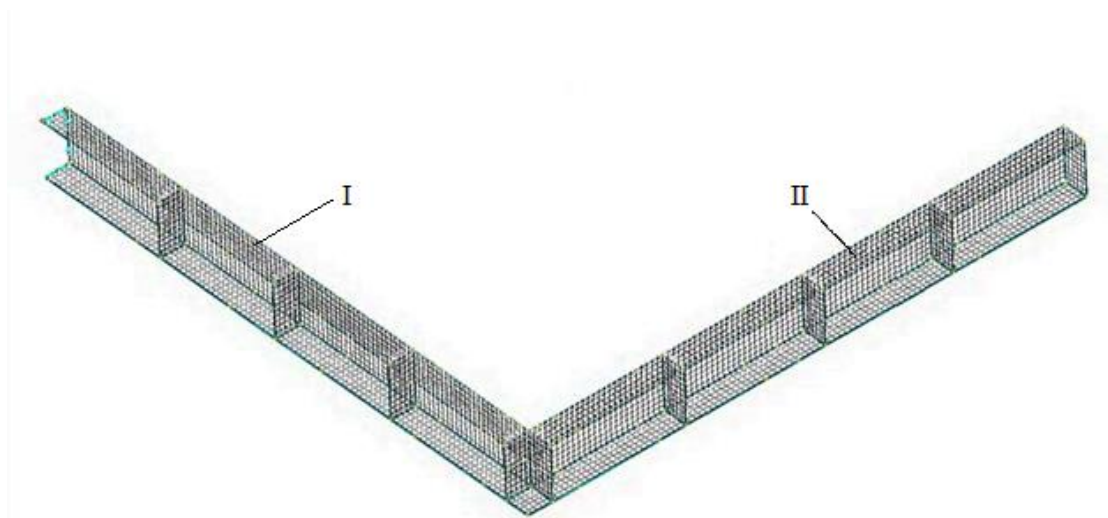


Рисунок 2 – Разбивка двухстержневой системы на пластинчатые конечные элементы

Полученная на основании равенства (1) эпюра бимоментов для этой рамы приведены на рисунке 3, где участки между рассматриваемыми поперечными сечениями упрощенно показаны прямыми отрезками. Из этой эпюры видно, что в узле соединения стержней проявился существенный скачок по величине бимомента. В стыкуемых поперечных сечениях значение бимомента в стержне I отличается от значения бимомента в стержне II на 19,5 %. Можно дать следующее объяснение данному явлению. Для каждого из попарно стыкуемых стержней крутящий момент \tilde{M}_K смежного стержня, воспринимается приблизительно в срединной плоскости Ω стенки швеллера (рис. 4). Введем самоуравновешенную систему осевых моментов M'_z, M''_z в плоскости Ψ , параллельной плоскости Ω и проходящей через точки L_1, L_2 с нулевой секториальной координатой (рис. 5). Выполняем условие $|M'_z| = |M''_z| = |\tilde{M}_K|$. При этом фактически стержень воспринимает в узле момент M'_z , вызывающий его изгиб, и бимомент, модуль которого

$$|B_\omega| = |\tilde{M}_K| d, \quad (2)$$

где d – расстояние между плоскостями Ω и Ψ (см. рис. 4).

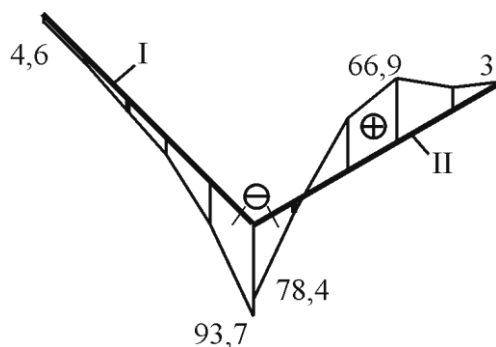


Рисунок 3 – Эпюра бимоментов для двухстержневого объекта (Н·м²)

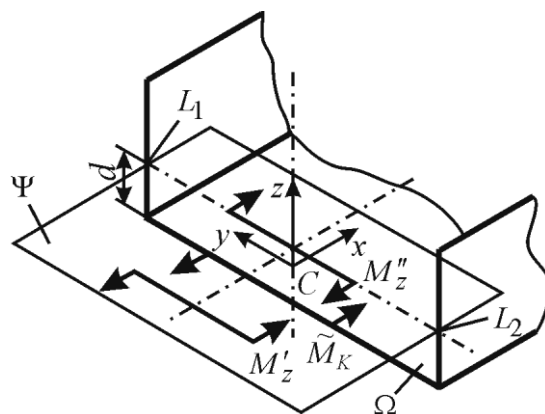


Рисунок 4 – Передача момента \tilde{M}_K на швеллер

Тогда на стыках стержней I и II уравнение связи бимоментов можно представить в виде

$$B_{\omega I} + M'_{zI} d_I = B_{\omega II} + M'_{zII} d_{II}, \quad (3)$$

где $M'_{zi}, d_i, B_{\omega i}$ ($i = I, II$) – момент M'_z , расстояние d и бимомент B_ω для стержня i .

Для рассматриваемой рамы $d_I = d_{II} = 1,81$ см; $M'_{zII} = 0$; $M'_{zI} = 1$ кН·м; $B_{\omega I} = -93,7$ Н·м²; $B_{\omega II} = -78,4$ Н·м².

При этом будем иметь:

$$B_{\omega I} + M'_{zI} d_I = -75,6 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$B_{\omega II} + M'_{zII} d_{II} = -78,4 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

То есть левая часть равенства (3) отличается от правой менее чем на 4%. Аналогичные результаты по возможности оценки влияния передаваемых моментов на величины скачков бимоментов были получены для ряда других случаев соединения стержней корытообразного профиля в плоских рамах.

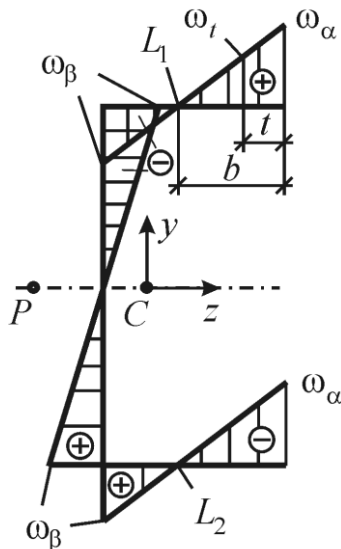


Рисунок 5 – Эпюры секториальной координаты корытообразного профиля: C, P – центр тяжести и центр изгиба поперечного сечения

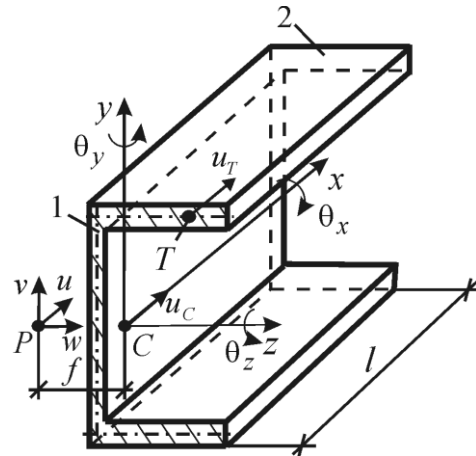


Рисунок 6 – Стержневой конечный элемент для корытообразного профиля: 1, 2 – узловые поперечные сечения

Алгоритм расчета стержневых систем с возможностью учета скачков по бимоментам. Полагаем, что каждый из стержней моделируется в соответствии с теорией стесненного кручения В.З. Власова [2] с помощью концепции метода конечных элементов в рамках метода перемещений. Принимаем, что стержень может быть в общем случае подвергнут растяжению-сжатию, поперечному изгибу в двух главных плоскостях и стесненному кручению. Рассматриваем следующую схему аппроксимации перемещений в стержневом конечном элементе корытообразного профиля с узлами в крайних поперечных сечениях 1 и 2 (рис. 6). Вектор обобщенных деформаций стержня представляем таким образом:

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \varepsilon_x \quad \chi_y \quad \chi_z \quad \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \quad \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \right\}^T, \quad (4)$$

где ε_x – относительная линейная деформация вдоль оси Sx стержня; $\chi_y = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\chi_z = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ – деформации изгиба стержня; v, w – проекции на оси Oy, Oz вектора перемещения центра изгиба P поперечного сечения; θ_x – угол поворота поперечного сечения относительно оси Sx .

Соответствующий вектору $\{\varepsilon\}$ вектор обобщенных напряжений

$$\{\sigma\} = \left\{ N \quad M_y \quad M_z \quad M_\theta \quad B_\omega \right\}^T, \quad (5)$$

где N – продольная сила; M_y, M_z – изгибающие моменты относительно осей Cy, Cz ; M_θ – момент свободного кручения.

Представим вектор обобщенных перемещений i -го узла конечного элемента в виде

$$\{\delta_i\} = \left\{ u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi} \quad u_{Ti} \right\}^T, \quad (6)$$

где u_i – проекция вектора перемещения точки P узлового поперечного сечения стержня на ось Cx ; v_i, w_i – значения v, w для узла i ; $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ – углы поворота сечения относительно осей Ox, Oy, Oz ; u_{Ti} – проекция на ось Ox вектора перемещений некоторой точки T срединной линии сечения.

В соответствии с теорией В.З. Власова будем иметь

$$u_{Ti} = u_{Ci} - \theta_{zi} y_T + \theta_{yi} z_T + \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)_i \omega_T, \quad (7)$$

где u_{Ci} – проекция перемещения точки C узлового сечения на ось Cx ; y_T, z_T – координаты точки T в осях $Cxyz$; $\left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)_i$ – значение $\frac{\partial \theta_x}{\partial x}$ в узле i , ω_T – секториальная координата точки T .

Отметим справедливость равенства

$$u_{Ci} = u_i + \theta_{yi} f. \quad (8)$$

где f – расстояние между точками P и C .

Учитывая зависимости (6)-(8), можно записать:

$$\{\tilde{\delta}_i\} = [\Delta] \{\delta_i\}, \quad (9)$$

где $\{\tilde{\delta}_i\}$ – вектор обобщенных перемещений узла i , записываемый с использованием традиционной схемы учета стесненного кручения в стержневых конечно-элементных моделях:

$$\{\tilde{\delta}_i\} = \left\{ u_{Ci} \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi} \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_i \right\}^T; \quad (10)$$

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\omega_T} & 0 & 0 & 0 & -\frac{z_T}{\omega_T} & \frac{y_T}{\omega_T} & -\frac{1}{\omega_T} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Тогда будем иметь

$$\{\tilde{\delta}_e\} = [\Omega] \{\delta_e\}, \quad (12)$$

где $\{\tilde{\delta}_e\}, \{\delta_e\}$ – векторы обобщенных перемещений конечного элемента, определяемые следующими равенствами:

$$\{\tilde{\delta}_e\} = \left\{ \begin{Bmatrix} \tilde{\delta}_1 \\ \tilde{\delta}_2 \end{Bmatrix} \right\}; \quad \{\delta_e\} = \left\{ \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} \right\}; \quad (13)$$

матрица

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} [\Delta] & 0 \\ 0 & [\Delta] \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Полагаем, что первоначально формируется матрица жесткости $[\tilde{K}_e]$ конечного элемента для вектора $\{\tilde{\delta}_e\}$ с учетом зависимостей (4), (5), (10), (13). Затем осуществлялся переход к матрице жесткости $[K_e]$ конечного элемента для вектора $\{\delta_e\}$:

$$[K_e] = [\Omega]^{-1} [\tilde{K}_e] [\Omega]. \quad (15)$$

При моделировании соединения стержней I и II (рис. 7), оси которых расположены в одной плоскости и перпендикулярны друг другу, вводим абсолютно жесткий стержень S_{I-II} , соединяющий центры изгиба стыкуемых поперечных сечений, и работающий на растяжение-сжатие стержень Q_{I-II} , соединяющий точки T_I , T_{II} соответствующие точкам T этих стержней.

Принимаем, что профили стержней имеют одинаковую высоту по своим средним линиям, точки T_I и T_{II} располагаются в плоскости, параллельной осям стержней, главные секториальные координаты этих точек не равны нулю и имеют одинаковый знак при взгляде в направлении осей $C_I x_I$, $C_{II} x_{II}$. Положение точки T_I фиксировано, положение точки T_{II} определяется расстоянием t .

При отсутствии внешних воздействий на стыкуемые сечения можно записать:

$$B_{\omega I} = (N_Q \cos \alpha) \omega_{T_I}; \quad (16)$$

$$B_{\omega II} = (N_Q \sin \alpha) \omega_{T_{II}}, \quad (17)$$

где N_Q – продольная сила в стержне Q_{I-II} .

Из равенств (16), (17) следует, что отношение бимоментов $k = B_{\omega I} / B_{\omega II}$ будет

определяться зависимостью

$$k = \frac{\omega_{T_I}}{\omega_{T_{II}}} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (18)$$

На первом шаге расчета обеспечиваем значение $k = 1$, выполнив условие

$$\omega_{T_{II}} = \omega_{T_I} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (19)$$

Далее реализуем итерационный процесс, целью которого является приближенное удовлетворение условия (3). Допустим, в итерации $r \geq 1$ получены значения моментов $M_{zI}^{(r)}$, $M_{zII}^{(r)}$ и бимоментов $B_{\omega I}^{(r)}$, $B_{\omega II}^{(r)}$. С учетом соотношения (3) принимаем для итерации $r + 1$ выражение

$$k^{(r+1)} = 1 + \frac{M_{zII}^{(r)} d_{II} - M_{zI}^{(r)} d_I}{B_{\omega II}^{(r)}}. \quad (20)$$

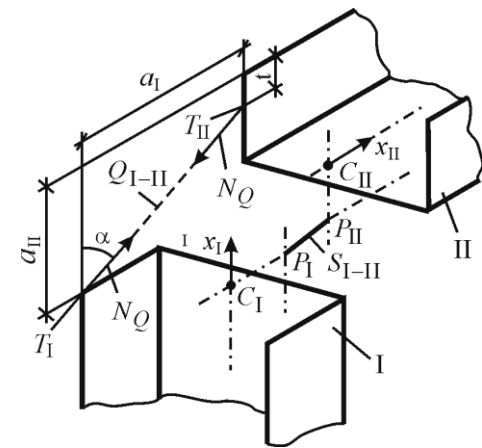


Рисунок 7 – Схема соединения стержней

Учитывая значение $k^{(r+1)}$, можно найти новое положение стержня Q_{I-II} на основе переопределения расстояния t . Согласно рисункам 5, 7 запишем

$$\omega_{TII} = \omega_{\alpha II} \frac{b_{II} - t}{b_{II}}; \operatorname{ctg} \alpha = \frac{a_{II} - t}{a_I}, \quad (21)$$

где $\omega_{\alpha II}, b_{II}$ - значения ω_{α}, b для второго профиля.

Тогда, принимая во внимание равенства (18), (21), будем иметь для итерации $r+1$

$$t^{(r+1)} = \frac{\omega_{TI} \frac{a_{II}}{a_I} - k^{(r+1)} \omega_{\alpha II}}{\frac{\omega_{TI}}{a_I} - \frac{k^{(r+1)} \omega_{\alpha II}}{b_{II}}}. \quad (22)$$

Каждая итерация $r+1$ предусматривает вычисление для стыковочных узлов значений $k^{(r+1)}$ на основе результатов итерации r , нахождения расстояний $t^{(r+1)}$ и конечно-элементный анализ рамы при новых положениях точек T_{II} . Как показывают расчеты, этот итерационный процесс практически сходится за 2-3 итерации. Приведем некоторые результаты использования данного алгоритма для двух примеров

Пример 1. Выполнялся расчет рамной конструкции, представленной на рисунке 1. Каждый стержень разбивался на 5 конечных элементов одинаковой длины. На рисунке 8 показаны полученные на основе разработанной стержневой модели бимоменты, на рисунке 9 отражена сходимость по бимоментам $B_{\omega I}, B_{\omega II}$. Из сопоставления рисунков 3 и 8 видно, что по значению $B_{\omega I}$ решение на основе предлагаемой вычислительной схемы отличается от результата моделирования с помощью пластинчатой схемы менее чем на 0,2%, по значению $B_{\omega II}$ – менее чем на 1,6 %. Рисунок 9 показывает, что сходимость по этим величинам здесь фактически достигается к 3-й итерации.

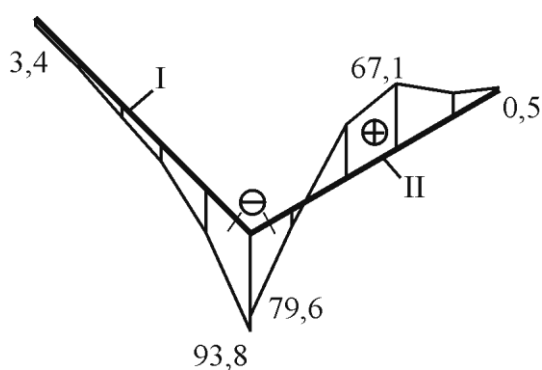


Рисунок 8 – Эпюра бимоментов при расчете в примере 1 с помощью итерационного алгоритма (Нм²)

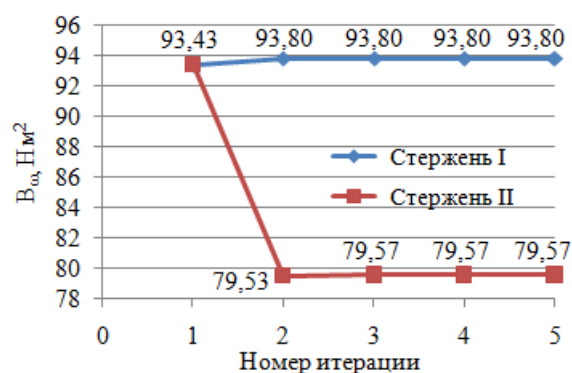


Рисунок 9 – Результаты итерационного расчета для бимоментов $B_{\omega I}$ и $B_{\omega II}$

Пример 2. Рассматривалась симметричная относительно плоскости Ω система из трех стальных стержней (рис. 10), изготовленных из швеллеров №10П по ГОСТ8240-97. Объект закреплен с помощью жестких опор H и подвержен действию равномерно распределенной нагрузки $q=100$ Н/м, приложенной к верхней кромке профиля стержня II. В стержневой модели каждый из стержней I, III равномерно разбивались на 5 конечных элементов, стержень

II – на 10 конечных элементов. В пластинчатой модели вводилось 10317 конечных элементов. На рисунке 11 сопоставлены результаты расчетов, полученные с помощью пластинчатой схемы и предлагаемого алгоритма. Из этого рисунка видно, что максимальные по модулю значения бимоментов для рамы получились на стыке стержней II и III. Для стержня II результат расчета бимомента для этого стыка с помощью стержневой схемы отличается от данных анализа, выполненного с использованием пластинчатых конечных элементов, менее чем на 6,9 %, для стержня III – менее чем на 0,7 %.

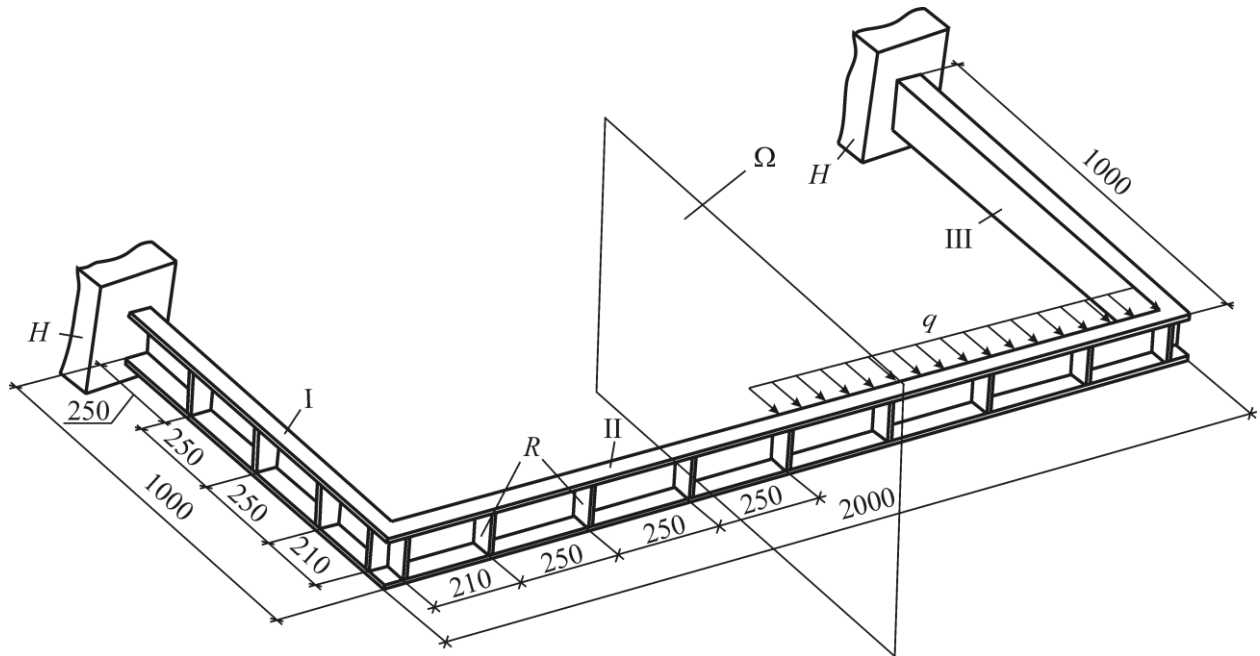


Рисунок 10 – Трехстержневая система: I-III – стержни

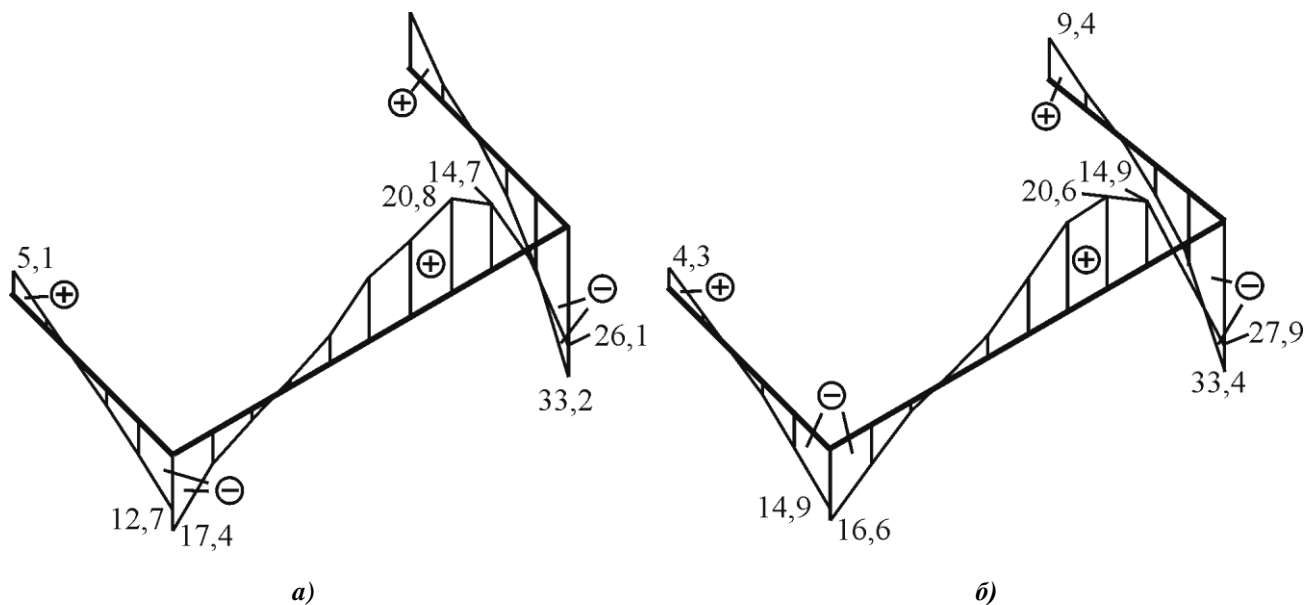


Рисунок 11 - Эпюры бимоментов (Hm^2) для трехстержневой конструкции:

а – расчет с помощью пластинчатой модели; б – расчет с использованием пошаговой методики для стержневой расчетной схемы

Заключение

На стыках стержней корытообразного профиля может проявляться существенный дисбаланс по бимоментам. Учет эксцентричной передачи моментов в таких узлах позволяет с достаточно высокой точностью принять во внимание скачки по бимоментам. Одним из возможных эффективных подходов к отражению в стержневых расчетных схемах соотношений между внутренними силовыми факторами является в данном случае корректировка условия передачи бимоментов путем изменения расположения вспомогательных связующих элементов между стержнями.

Благодарность. Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-00567.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* [Текст]. – М.: Министерство регионального развития РФ, 2011. – 173 с.
2. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 568 с.
3. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 476 с.
4. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. 736 с.
5. Wang Z.Q., Zhao J.C., Zhang D.X., Gong J.H. Restrained torsion of open thin-walled beams including shear deformation effects. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2012. Vol. 13, N. 4. Pp: 260-273.
6. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. №1. С. 53-73.
7. Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 69-98.
8. Рыбаков В.А., Гамаюнова О.С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №7. С. 79-123.
9. Tusnin A. Finite element for calculation of structures made of thin-walled open profile rods. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp: 1673-1679.
10. Gotluru B.P., Schafer B.W., Pekoz T. Torsion in thin-walled cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*. 2000. N. 37. Pp: 127-145.
11. Yoon K., Lee P.S. Modeling the warping displacements for discontinuously varying arbitrary cross-section beams. *Computers and Structures*. 2014. N. 131. Pp: 56-69.
12. Панасенко Н.Н., Юзиков В.П., Синельщиков А.В. Конечнo-элементная модель пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. В 2-х частях. Часть 1 // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2015. №2. С. 89-100.
13. Туснин А.Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. 2009. №1. Т. 15. С. 73-78.
14. Серпик И.Н., Школяренко Р.О., Швыряев М.В. Конечнo-элементное моделирование работы систем стержней двутаврового профиля с учетом стесненного кручения // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: Сборник материалов международной научной конференции. – М.: Издательство МГСУ, 2016. С. 287-292.
15. Школяренко Р.О., Серпик И.Н. Исследование работы узлов соединения тонкостенных стержней открытого профиля // Строительство 2016: Материалы II Брянского международного инновационного форума. – Брянск, 2016. Т. 1. С. 340-343.
16. Чернов С.А. Моделирование задач динамики тонкостенной стержневой системы // Программные продукты и системы. 2014. №2. С. 171-176.
17. Musat S.D., Epureanu B.I. Study of warping torsion of thin-walled beams with closed cross-section using macroelements. *Communications in Numerical Methods in Engineering*. 1996. Vol. 12. Pp: 873-884.
18. Туснин А.Р. Особенности взаимодействия мембраны, прикрепленной с эксцентриситетом к опорному контуру из замкнутых тонкостенных прямоугольных профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 47-50.
19. Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office» // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 38-46.

20. Туснина О.А. Конечно-элементное моделирование и расчет подкраново-подстропильной фермы // Инженерно-строительный журнал. 2018. №1. С. 68-89.
21. Перельмутер А.В., Юрченко В.В. О расчете пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. №6. С. 18-25.
22. Чернов С.А. Конечный элемент стержня коробчатого сечения с узлами по контуру сечения // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 2. С. 9–13.

Серпик Игорь Нафтольевич

Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Россия,
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика»,
E-mail: inserpik@gmail.com

Школяренко Роман Олегович

Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Россия,
Аспирант,
E-mail: shkroman130@mail.ru

SERPIK I.N., SHKOLYARENKO R.O.

**CALCULATION OF THIN-WALLED SYSTEMS OF CHANNEL BARS
TAKING INTO ACCOUNT THE RESTRAINED TORSION**

An algorithm has been developed for calculating channel thin-walled bar frame systems using the fi-nite elements method. The research performed based on plate finite elements showed that the assumption of approximate equality for bimoments in bar connection nodes with this type of cross-sections is generally un-acceptable. An explanation of this phenomenon is proposed that takes into account the features of the trans-fer of the internal forces in the connection joints of thin-walled bars. An iteration scheme was suggested to consider bimoment leaps at bar joints. The sufficiently high accuracy of the presented methodology was illus-trated with the examples of calculating thin-walled structures consisting of two and three channel thin-walled bars. The obtained results will make it possible to increase the accuracy of calculations of load-bearing systems formed by channel structural elements in case of using the rod models.

Key words: thin-walled bars, channel sections, restrained torsion, bimoments, connection of bars, finite elements.

REFERENCES

1. SP 16.13330.2011. Stal'nyye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81* [Steel structures. Actualized edition of SNiP II-23-81 *]. Moscow: Ministry of regions development of RF, 2011. 173 p. (rus)
2. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni [Thin-walled elastic rods]. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1959. 568 p. (rus)
3. Bychkov D.V. Stroitel'naya mekhanika sterzhnevyykh tonkostennykh konstruksiy [Construction mechanics of rod-shaped thin-walled structures]. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nyim materialam, 1962. 476 p. (rus)
4. Slivker V.I. Stroitel'naya mekhanika. Variatsionnyye osnovy [Structural mechanics. Variational bases]. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2005. 736 p.
5. Wang Z.Q., Zhao J.C., Zhang D.X., Gong J.H. Restrained torsion of open thin-walled beams including shear deformation effects. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2012. Vol. 13, N. 4. Pp: 260-273.
6. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov S.A. Issledovaniye konechnykh elementov dlya rascheta tonkostennykh sterzhnevyykh sistem [Study of finite elements for the calculation of thin-walled rod systems]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2012. No 1. Pp: 53-73. (rus)
7. Lalin V.V., Rybakov V.A. Konechnyye elementy dlya rascheta ograzhdayushchikh konstruksiy iz tonkostennykh profiley [Finite elements for calculating enclosing structures from thin-walled profiles]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 2011. No 8. Pp: 69-98. (rus)

8. Rybakov V.A., Gamayunova O.S. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye elementov karkasnykh sooruzheniy iz tonkostennykh sterzhney [Stress-strain state of elements of wireframes from thin-walled rods]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2013. No 7. Pp: 79-123. (rus)
9. Tusnin A. Finite element for calculation of structures made of thin-walled open profile rods. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp: 1673-1679.
10. Gotluru B.P., Schafer B.W., Pekoz T. Torsion in thin-walled cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*. 2000. N. 37. Pp: 127-145.
11. Yoon K., Lee P.S. Modeling the warping displacements for discontinuously varying arbitrary cross-section beams. *Computers and Structures*. 2014. N. 131. Pp: 56-69.
12. Panasenkov N.N., Yuzikov V.P., Sinel'shchikov A.V. Konechno-elementnaya model' prostranstvennykh konstruktsey iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya. V 2-kh chastyakh. Chast' 1 [Finite element model of spatial structures from thin-walled rods of open profile. In 2 parts. Part 1]. *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2015. No 2. Pp: 89-100. (rus)
13. Tusnin A.R. Konechnyy element dlya chislennogo rascheta konstruktsey iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya [Finite Element for Numerical Calculation of Structures from Thin-Walled Rods of Open Profile]. *Metallicheskiye konstruktсии*. 2009. No 1. T. 15. Pp: 73-78. (rus)
14. Serpik I.N., Shkolyarenko R.O., Shvyryayev M.V. Konechno-elementnoye modelirovaniye raboty sistem sterzhney dvutavrovogo profilya s uchetom stesnennogo krucheniya [Finite element modeling of the operation of the I-beam profile systems taking into account constrained torsion]. Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii: Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Integration, partnership and innovations in building science and education: Collected materials of the international scientific conference]. Moscow: Izdatel'stvo MGSU, 2016. Pp: 287-292. (rus)
15. Shkolyarenko R.O., Serpik I.N. Issledovaniye raboty uzlov soyedineniya tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya [Investigation of the operation of knots connecting thin-walled rods of the open profile]. *Stroitel'stvo 2016: Materialy II Bryanskogo mezhdunarodnogo innovatsionnogo foruma* [Construction 2016: Materials of the II Bryansk International Innovation Forum]. Bryansk, 2016. T. 1. Pp: 340-343. (rus)
16. Chernov S.A. Modelirovaniye zadach dinamiki tonkostennoy sterzhnevoy sistemy [Modeling of the dynamics problems of a thin-walled rod system]. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2014. No 2. Pp: 171-176. (rus)
17. Musat S.D., Epureanu B.I. Study of warping torsion of thin-walled beams with closed cross-section using macroelements. *Communications in Numerical Methods in Engineering*. 1996. Vol. 12. Pp: 873-884.
18. Tusnin A.R. Osobennosti vzaimodeystviya membrany, prikrepennoy s ekstsentsititetom k opornomu konturu iz zamknutykh tonkostennykh pryamougol'nykh profiley [Features of the interaction of a membrane attached with eccentricity to a supporting contour from closed thin-walled rectangular profiles]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2013. No 12. Pp: 47-50. (rus)
19. Yurchenko V.V. Proyektirovaniye karkasov zdaniy iz tonkostennykh kholodnognutnykh profiley v srede «SCAD Office» [Designing the frame of buildings from thin-walled cold-formed profiles in the SCAD Office environment]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No 8. Pp: 38-46. (rus)
20. Tusnina O.A. Konechno-elementnoye modelirovaniye i raschet podkranovo-podstropil'noy fermy [Finite Element Modeling and Calculation of a Crane-Podstriplil Farm]. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 1. Pp: 68-89.
21. Perel'muter A.V., Yurchenko V.V. O raschete prostranstvennykh konstruktsey iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya [Tekst]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2012. No 6. Pp: 18-25. (rus)
22. Chernov S.A. Konechnyy element sterzhnya korobchatogo secheniya s uzlamy po konturu secheniya [The final element of a box-shaped rod with nodes along the contour of the cross section]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii*. 2014. No 2. Pp: 9-13. (rus)

Serpik Igor N.

Bryansk State Engineering and Technology University, Bryansk, Russia,
Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department "Mechanics",
E-mail: inserpik@gmail.com

Shkolyarenko Roman O.

Bryansk State Engineering and Technology University, Bryansk, Russia,
Postgraduate student,
E-mail: shkroman130@mail.ru

УДК 624.012.45

ФЕДОРОВА Н.В., КОРЕНЬКОВ П.А., ВУ НГОК ТУЕН

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Приведена методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при особых аварийных воздействиях. В качестве основной задачи исследований поставлена задача экспериментальной проверки принятых критериев разрушения элементов железобетонной рамно-стержневой системы каркаса монолитного многоэтажного здания в запредельных состояниях, после аварийного воздействия в виде внезапного удаления одной из несущих колонн. Численно с использованием метода декомпозиции и программного комплекса LS Dyna; определены расчетные значения максимальных динамических деформаций сжатого бетона, арматуры и перемещения элементов рассматриваемой конструктивной системы на первой полуволне колебаний и обоснованы принятые варианты армирования опытных конструкций, методика аварийного нагружения и схемы установки измерительных приборов, а также перечень основных опытных параметров подлежащих экспериментальной проверке.

Ключевые слова: методика, экспериментальное исследование, железобетонный каркас здания, аварийное воздействие, критерии разрушения.

Введение

В связи с принятым в России законом РФ «Технический регламент по безопасности зданий и сооружений» [1] и вводимым в текущем году в практику проектирования сводом правил СП «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения [2]. Основные положения» проблема защиты сооружений от особых аварийных воздействий приобретает практические очертания. Уместно заметить, что аналогичные требования уже приняты и действуют в ряде других стран ближнего и дальнего зарубежья [3-6].

Реализация этих документов в практике проектирования требует расширение спектра натурных, и особенно экспериментальных, исследований различных типов конструктивных систем по уточнению особенностей их деформирования и разрушения в запредельных состояниях при таких воздействиях. В частности, необходима экспериментальная проверка критериев статической и динамической прочности сечений, нагруженных рамно-стержневых железобетонных каркасов монолитных многоэтажных зданий от внезапного выключения одной из несущих конструкций. Учитывая, что таких экспериментальных исследований конструктивных систем зданий и сооружений крайне мало, а имеющиеся отдельные исследования выполнены на разной методологической основе и по различным методикам, носят фрагментарный характер, задача разработки и расчетное обоснование методологии и методики испытаний по установлению критериев разрушения при особых воздействиях монолитных многоэтажных рам в запредельных состояниях является актуальной.

Расчетное обоснование методики экспериментальных исследований

Рассматривается рамно-связевый каркас монолитного многоэтажного здания, схема модели которого приведена на рисунке 1, а. В направлении осей А-Д каркас выполнен в виде жестких монолитных или сборно-монолитных рам, а в направлении осей 1-5 имеет связевую

схему. Примером такого каркаса могут быть монолитный или сборно-монолитный каркас [7-9]. Для исследования рассматриваемого каркаса конструкции использован метод декомпозиции [9-13] или по-другому метод подконструкции [14-17] и соответственно разноуровневые расчетные схемы.

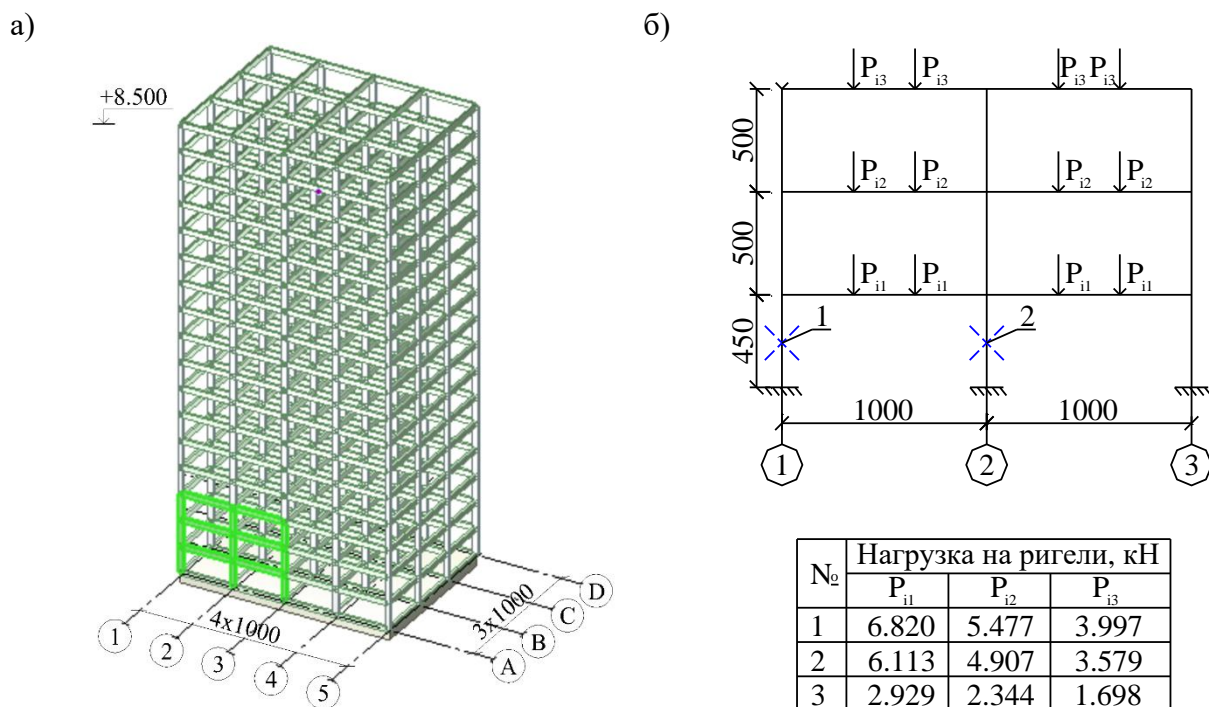


Рисунок 1 - Схема модели конструктивной системы здания (а) и нагруженного фрагмента железобетонной рамы (б):
1, 2 – удаленные колонны

На первом этапе расчетная схема строится для всего здания и результатом расчета является напряженно-деформированное состояние во всех конструктивных элементах каркаса при заданных эксплуатационных нагрузках.

Второй этап включает определение наиболее нагруженных или ключевых с позиций ответственности за распределение силовых потоков конструктивных элементов каркаса здания и производится построение расчетной схемы второго уровня. Анализируя результаты расчета первого этапа, выделяется одна из наиболее нагруженных колонн первого этажа крайнего или средних рядов, или угловая колонна первого этажа и в соответствии с [2] определяется зона возможного локального разрушения при удалении названной конструкции. Для этой зоны локального разрушения должны быть определены критерии разрушения при рассматриваемом особом аварийном воздействии. В качестве критерия особого предельного состояния, учитывая перераспределения силовых потоков в запредельных состояниях [11] и возможность деформирования элементов статически неопределимой конструктивной системы на ниспадающей ветви деформаций [18,19] целесообразно использовать деформационный критерий для бетона и арматуры.

Используя описанный подход для численного и экспериментального моделирования процесса деформирования монолитного железобетонного каркаса здания при особом аварийном воздействии на первом этапе была рассчитана модель 17-ти этажного здания в масштабе 1:6, с жесткими узлами сопряжения колонн и ригелей в плоскости рам, расположен-

ных вдоль буквенных осей А, В ... Д и шарнирно сопряженных по направлению числовых осей 1, 2...5 (см. рис. 1, а).

На втором этапе расчета, целью которого являлась проверка деформационных критериев для зон локального разрушения при внезапном выключении угловой или промежуточной колонны первого этажа, расположенной по оси ряда А, был выделен фрагмент модели каркаса здания, включавший два пролета рамы 1-2 и 2-3, высотой на три этажа (рисунок 1, б).

При моделировании нагрузок, геометрических размеров и армирования принято геометрическое подобие натуры и модели и соответственно сосредоточенная нагрузка, и площадь арматуры принималась уменьшенными на величину равную квадрату масштаба, а геометрические размеры сечений - масштабу. Результатом расчета явилось напряженно-деформированное состояние в ригелях и колоннах модели фрагмента.

Учитывая поставленную задачу экспериментальных исследований - проверка критериев разрушения рамно-стержневой системы при особом предельном состоянии, армирование ригелей фрагмента рамы было выполнено в трех вариантах: вариант 1- переармированная конструкция ригелей, с таким расчетом, чтобы при выключении угловой или промежуточной колонны происходило хрупкое разрушение по сжато-растянутому бетону от достижения в сжатой зоне бетона предельных деформаций; вариант 2 - недоармированная конструкция ригелей с таким расчетом, чтобы при выключении колонны (угловой или промежуточной) разрушение происходило из-за разрыва продольной арматуры; вариант 3 - армированная конструкция ригелей двойной арматурой, с таким расчетом, чтобы при выключении колонны (угловой или промежуточной) происходило «мягкое» деформирование ригелей из-за текучести растянутой арматуры как ванты.

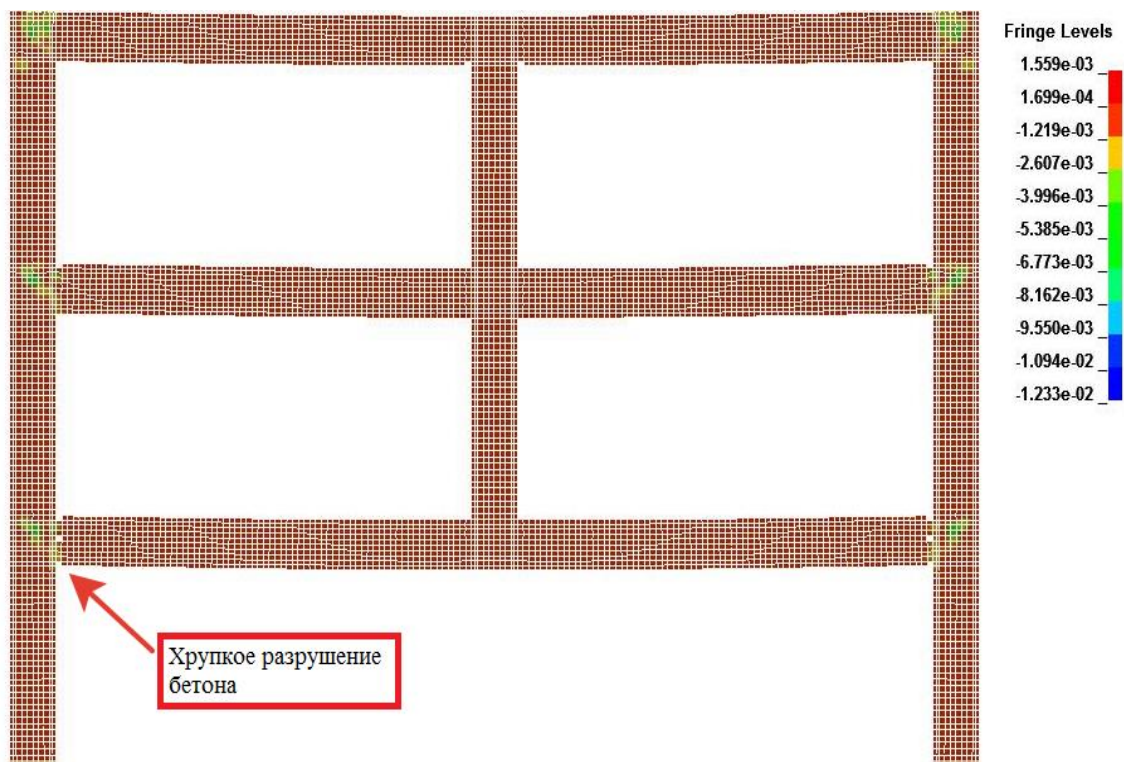
Был проведен также расчет модели опытного фрагмента по вторичной (по терминологии [2,11]) расчетной схеме в статико-динамической постановке с использованием расчетного комплекса LS Dyna. Вторичная расчетная схема была получена из первичной путем удаления угловой (1)- вариант I или средней (2) вариант II колонны.

Статико-динамическое нагружение было вызвано тем, что в нагруженной статической проектной нагрузкой рамной системе мгновенно выключалась колонна 1 или 2 (см. рисунок 1, б). Усилие, действовавшее в этой колонне, при проектной нагрузке мгновенно передавалось на вышележащую колонну с обратным знаком, и производился динамический расчет системы. При таком динамическом догружении проверялись все три деформационных критерия разрушения элементов рамно-стержневой системы. Результаты статико-динамического расчета на 1/2 полуволны колебаний приведены на рисунке 2. В результате было назначено армирование конструкций опытного фрагмента первой, второй и третьей серии (Рисунок 3 и табл. 1).

Методика экспериментального определения картин трещинообразования и разрушения

Экспериментальные исследования планируется выполнить на железобетонных конструкциях, моделирующих фрагмент рамно-связевого каркаса здания. Конструкция опытного фрагмента запроектирована в трех вариантах (три серии) по два образца в каждой серии (см. Рисунок 3 и табл. 1)

а)



б)

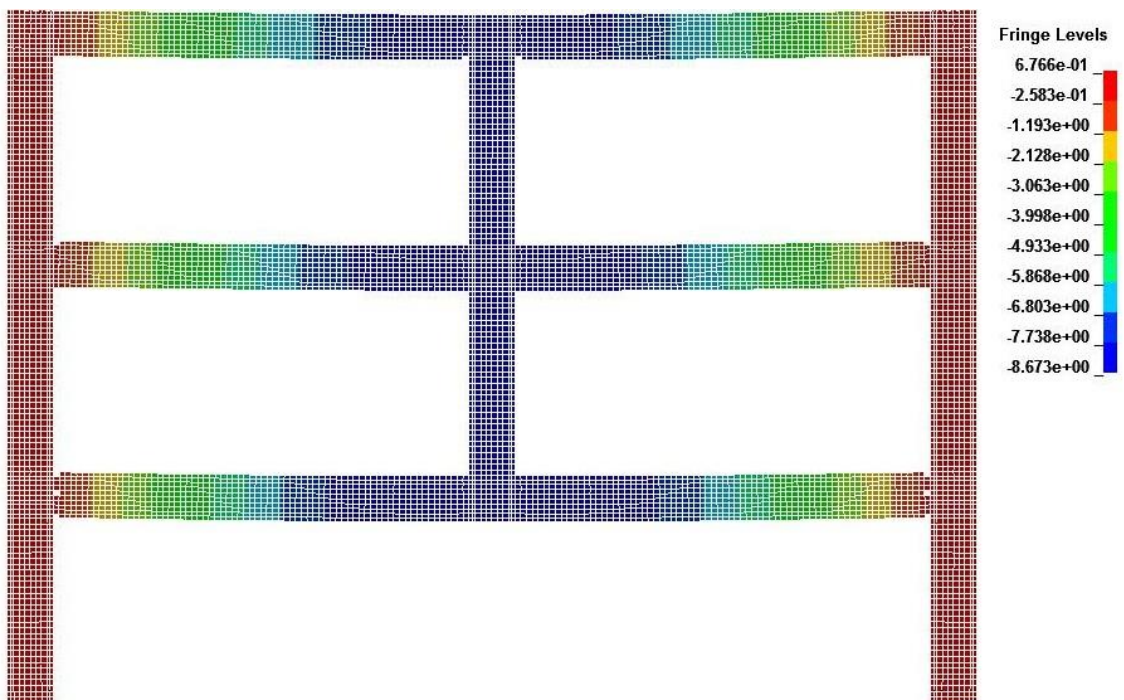


Рисунок 2 - Напряженно-деформированное состояние железобетонной рамы первой серии при $t_d = 0,026$ (с) (1/2 полуволны):
а - деформация в бетоне; б - с вертикального перемещения

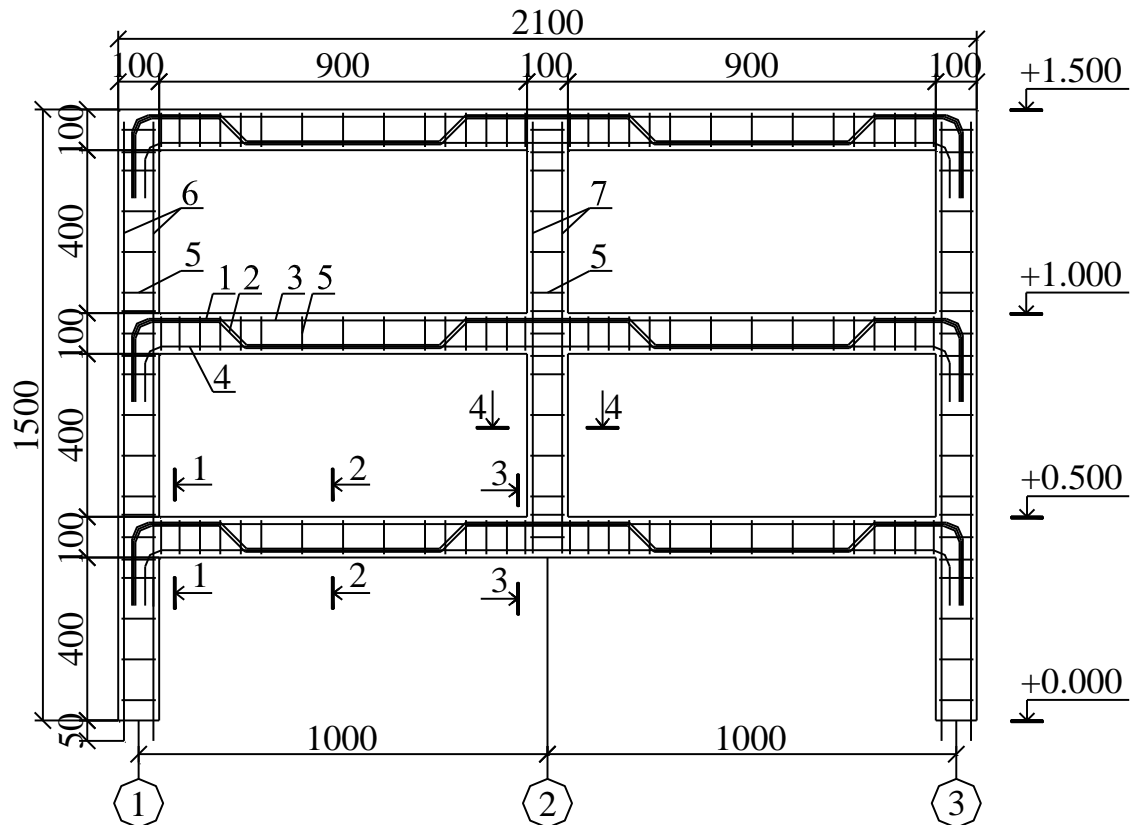


Рисунок 3- Схема армирования конструкции рам

Образцы опытных конструкций разных серий отличались их продольным рабочим армированием.

Конструкции первой серии РЖ-2Ф8(б) армированы в верхней и нижней зонах сечений ригеля 1-1, 2-2 и 3-3 двумя стержнями А500 диаметром 8мм. Такая схема армирования при достаточной анкеровке рабочей арматуры после запроектного воздействия, в виде внезапного удаления средней или крайней колонны, обеспечивает реализацию первого критерия особого предельного состояния, когда деформации сжатого бетона могут достигать предельных значений $\varepsilon_{b2} \leq 0,0035$, а деформации арматуры не достигают предельных значений, (рисунок 4, а).

Конструкции второй серии РЖ-1Ф8(с) армированы в сечениях 1-1, 2-2 и 3-3 одним стержнем исходя из требований предельных состояний I и II группы когда $\xi \leq \xi_R$. Такая схема направлена на экспериментальную проверку второго критерия особого предельного состояния, когда деформации растянутой арматуры могут достигать предельных значений $\varepsilon_{s2} \geq 0,025$ и разрушение элементов рамы может произойти из-за разрыва продольной арматуры.

Конструкции третьей серии РЖ 2Ф8(в) армированы во всех растянутых зонах рассматриваемых сечений двумя стержнями А500 диаметром 8 мм. Эта схема армирования при надежной анкеровке растянутой арматуры после запроектного воздействия допускает разрушение бетона в сжатой и растянутой зонах и обеспечивает критерий по деформациям для растянутой арматуры при её работе как растянутой висячей нити.

Проектная нагрузка на конструкцию опытной рамы на первом этапе испытаний прикладывается с помощью рычажно-подвесной системы. В каждом пролете ригель нагружается двумя сосредоточенными силами P_{ij} (где i,j- номер ригеля рамы по её высоте и номер проле-

та). Нагружение сосредоточенными силами (см. рисунок 1, б) производилось до уровня эксплуатационной нагрузки, рассчитанной с учетом масштаба модели, с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,0$.

Запроектное воздействие на втором этапе испытаний прикладывается внезапным включением промежуточной или крайней колонны первого этажа рамы. Для этого вместо железобетонной колонны (угловой или промежуточной) устанавливалось специальное сборно-разборное устройство, включающее трехшарнирную стойку и жесткую опору, соединенную с центральным по высоте стойки, шарниром специальной пружиной и фиксирующим её болтом и гайкой. При выкручивании болта и разжатия пружины происходит переход трехшарнирной стойки в мгновенно изменяемую систему, и эта связь-стойка мгновенно выключается из работы в составе стойки рамы. Приоритет такого способа моделирования приложения аварийного воздействия защищен патентами РФ [21,22].

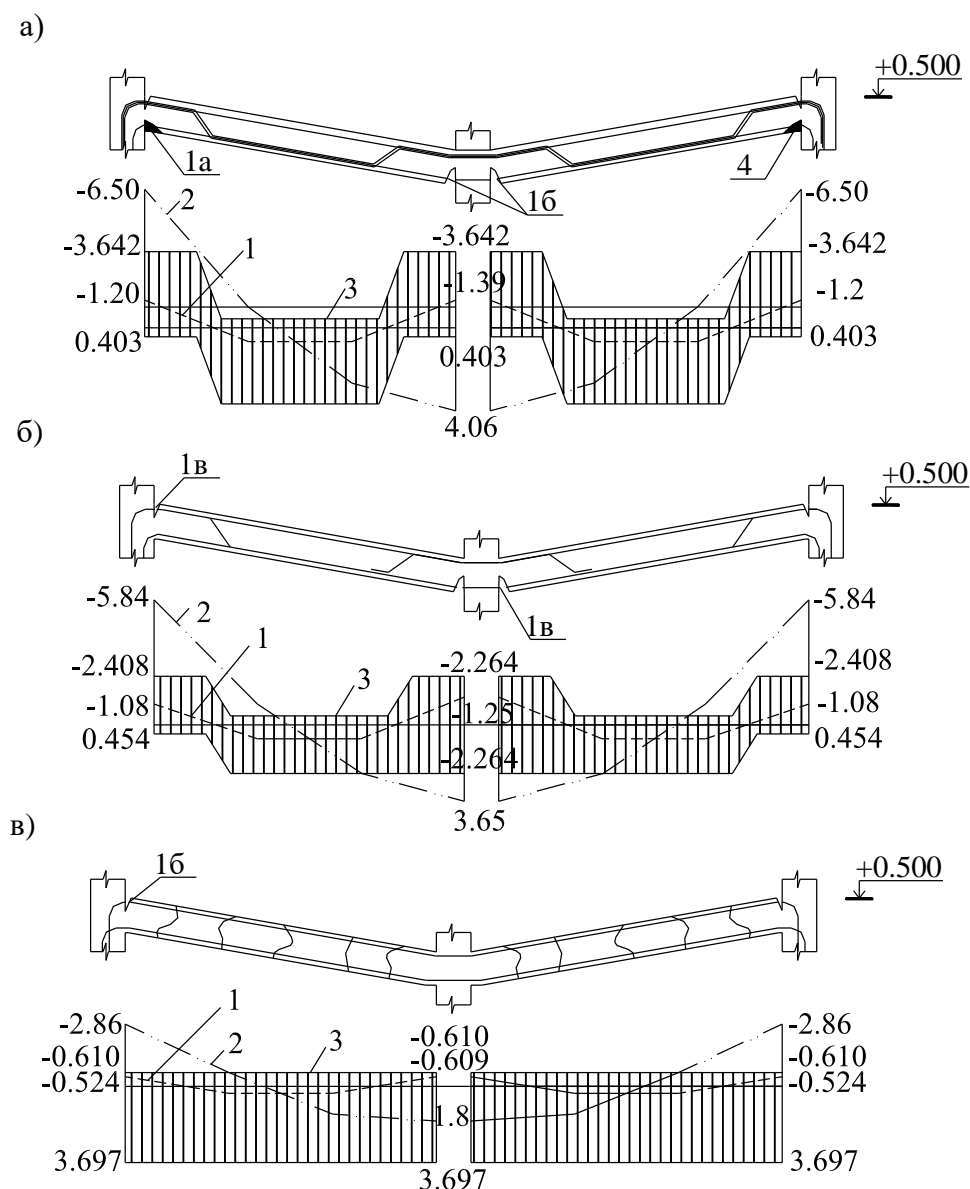


Рисунок 4 - Эпюры моментов в ригеле первого этажа опытных конструкций первой (а), второй (б) и третьей серии (в) рам и схема характерных зон разрушения:

1- при проектной нагрузке; 2 - при запроектной нагрузке; 3- эпюра предельных моментов
 1а- зона хрупкого разрушения по сжато-му бетону; 1б- зона разрыва растянутой арматуры;
 1с- зона пластического разрушения растянутой арматуры

Таблица 1 - Основные характеристики опытных конструкций рам опытных серий

N п/п	N серии	Схема поперечного сечения			Армирование					Класс бетона	Примечания
		1-1	2-2	3-3	Поз. 1	Поз. 2	Поз. 3	Поз. 4	Поз. 5		
1	РЖ-2Ф8(б)				Ф8 А500	Ф8 А500	Ф4 Вр500	Ф4 Вр500	Ф2 Вр500	В40	
2	РЖ-1Ф8(с)				Ф8 А500	Ф8 А500	Ф4 Вр500	Ф4 Вр500	Ф2 Вр500	В40	
3	РЖ-2Ф8(в)				Ф4 Вр500	Ф8 А500	Ф8 А500	Ф2 Вр500		В40	

Экспериментальное определение значений опытных параметров деформированного состояния конструкций рам используются механические приборы и тензорезисторы. Согласно схемам рисунка 5, в процессе испытаний индикаторами И-1...И-5 и прогибомерами П-4...П-5 предусматривается измерение вертикальных и горизонтальных перемещений ригелей опытного фрагмента рамы на обоих этапах испытаний. При этом, учитывая динамический характер нагружения конструкции рамы на втором этапе испытаний, для фиксации показаний механических приборов в момент динамического догружения конструкции используется асциллограф, а также цифровые фотокамеры с частотой измерений не менее 200 кадров в секунду. Этими же камерами по специально установленным маякам напрямую фиксируются перемещения наиболее характерных точек ригелей, время динамического догружения ригелей рамы, процессы трещинообразования и разрушения конструкций.

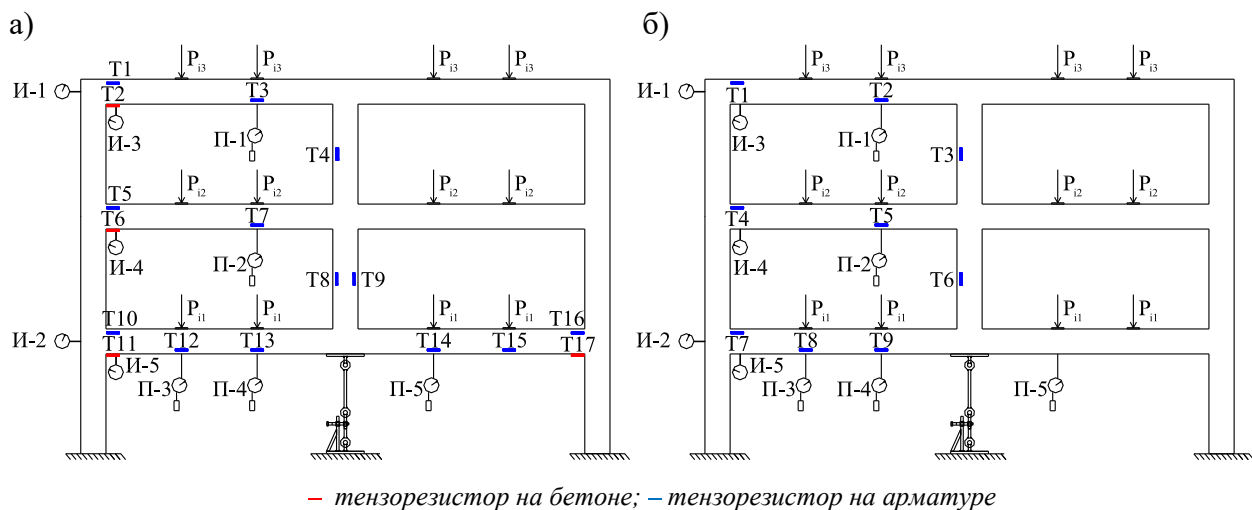


Рисунок 5 - Схема установки тензорезисторов и прогибомеров на опытной конструкции первой (а), второй и третьей (б) серии

Методом электротензометрии измеряются деформации арматуры и бетона в наиболее напряженных сечениях опытных конструкций рам. Схемы установки тензорезисторов показаны на рисунке 5а, б.

В процессе испытаний определяются схемы образования, развития и раскрытия трещин на первом этапе нагружения проектной нагрузкой, а также их приращения от динамического догружения рамы при аварийном воздействии.

Приведенная методика измерений опытных параметров конструкций на обоих этапах испытаний обеспечивает решение основной задачи испытаний – определение опытных значений приращений деформаций бетона и арматуры, статических и динамических перемещений конструктивных элементов опытных рам во времени и установление предельных значений опытных параметров при исследуемом особом предельном состоянии в условиях статико-динамического характера деформирования конструкций железобетонных рам.

Выводы

1. Численным анализом, с использованием программного комплекса LS Dyna и уровней расчетных схем, обоснована методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при особых аварийных воздействиях, вызванных внезапным выключением из работы одной из колонн каркаса.

2. Предложена физическая модель железобетонной подконструкции фрагмента каркаса многоэтажного здания и методика его испытания, для оценки деформационных критериев при особом предельном состоянии в условиях их статико-динамического деформирования при рассматриваемом режиме нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс: Законодательство: Версия Проф. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (18.03.2017).
2. Свод правил СП xx.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования». Приказ Минстроя РФ № 393/пр от 2018.
3. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. - 176 p.
4. GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, Washington, D.C., October 2016, 203p.
5. ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. – К.: Минрегіонстрой України, 2009. – 43 с.
6. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45- 3.02-108-2008 (02250) – Введ. 01.12.2008. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008. – 92 с.
7. Деркач В.Н. Совместная работа каменного заполнения и железобетонного монолитного каркаса // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 20–27.
8. Коянкин А.А., Митасов В.М. Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. № 9. С. 28—35.
9. Ключева Н. В, Колчунов В. И., Рыпаков Д. А. Жилые и общественные здания из железобетонных панельно-рамных элементов индустриального производства // Жилищное строительство. 2015. № 5. С. 69–75.
10. Бондаренко В.М., Колчунов В.И., Воробьев Е.Д., Римшин В.И., Осовских Е.В., Доценко В.Н., Творогова М.Н. О расчете сборно-монолитных железобетонных каркасов зданий // Бетон и железобетон в Украине. 2004. №1(19). С.2-7.
11. Емельянов С.Г., Ключева Н.В., Кореньков П.А. Методика определения параметров живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий. Известия высших учебных заведений // Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 252-258.
12. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с.
13. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В. и др. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: монография. М.: АСВ, 2004. 216 с.

14. Фиалко С.Ю. О методах решения большемерных задач строительной механики на много-ядерных компьютерах // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 116–124.
15. Yu J., Tan K. H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages // Engineering Structures. 2013. Т. 55. Pp. 90-106.
16. Ahmadi R. et al. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly // Shock and Vibration. 2016. Т. 2016.
17. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // Engineering Structures. 2017. Т. 139. Pp. 31-45.
18. Ключева Н. В., Кореньков П. А. Методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 44-48.
19. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Издательство АСВ, 2004.- 472 с.
20. Hallquist, J.O. et al. LS-DYNA Keyword User's Manual v.970/ J.O. Hallquist Livermore Software Technology Corporation, 2003. - 1564 p.
21. Патент 2437074 Российской Федерации, МПК G01M99/00. Способ экспериментального определения динамических догрузений в железобетонных рамно-стержневых системах от внезапного выключения линейной связи / Н. В. Ключева, А. С. Бухтиярова; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ; заявл. 07.12.2009; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35.
22. Патент 2642542 Российской Федерации. Устройство для экспериментального определения динамических догрузений в рамно-стержневых конструктивных системах / Н. В. Ключева, П. А. Кореньков; заявитель и патентообладатель КФУ; опубл. 29.01.2018.

Федорова Наталия Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонные и каменные конструкции

E-mail: fenavit@mail.ru

Кореньков Павел Анатольевич

Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

кандидат технических наук, ассистент кафедры строительных конструкций

E-mail: kpa_gbk@mail.ru

Ву Нгок Туен

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

Аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений

E-mail: ngoctuyennd91@gmail.com

FEDOROVA N.V., KOREN'KOV P.A., VU N.T.

**EXPERIMENTAL METHOD OF RESEARCH OF DEFORMATION
OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BUILDING
UNDER ACCIDENTAL ACTIONS**

The technique of experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete building under under accidental actions is presented. The main task of the research was the task of experimental verification of the accepted criteria for the destruction of the elements of the reinforced concrete frame system of a monolithic multi-storey building in out-of-state conditions, after the accidental actions in the form of a sudden removal of one of the columns, numerically using the decomposition method and the LS Dyna software package; The calculated values of the maximum dynamic deformations of compressed concrete, reinforcement and displacement of the elements of the considered structural system on the first half-wave of oscillations are determined, and the accepted variants of re-

inforcement of experimental structures, accidental loading techniques and schemes of installation of measuring instruments, a list of the main experimental parameters subject to experimental verification are substantiated.

Key words: methodology, experimental research, reinforced concrete frame of a building, accidental actions, criteria of destruction.

REFERENCES

1. Federal'nyy zakon ot 30.12.2009 N 384-FZ «Tekhnicheskiiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy» [Federal Law of December 30, 2009 N 384-FZ "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures"] // SPS Konsul'tantPlyus: Zakonodatel'stvo: Versiya Prof. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (18.03.2017). (rus)
2. Svod pravil SP khkh.1325800.2018 «Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obru-sheniya. Pravila proyektirovaniya». Prikaz Ministroya RF No 393/pr ot 2018 [Code of Regulations SP xx.1325800.2018 "Protection of buildings and structures from a progressive naughtiness. Design rules ». Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation No 393 / pr from 2018]. (rus)
3. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. - 176 p.
4. GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, Washington, D.C., October 2016, 203p.
5. DBN V.1.2-14-2009. Obshchiye printsipy obespecheniya nadezhnosti i konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy, sooruzheniy stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy [General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures of structures and foundations]. Kiev: Minregionstroy Ukrainy, 2009. 43 p. (ukr)
6. Vysotnyye zdaniya. Stroitel'nyye normy proyektirovaniya [High-rise buildings. Construction standards of design]: TKP 45- 3.02-108-2008 (02250) – Vved. 01.12.2008. – Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2008. 92 p. (rus)
7. Derkach V.N. Sovmestnaya rabota kamennogo zapolneniya i zhelezobetonnoy monolitnoy karkasa [Joint work of stone filling and ferro-concrete monolithic carcass]. *Magazine of civil engineering*. 2013. No 5(40). Pp: 20–27. (rus)
8. Koyankin A.A., Mitsov V.M. Karkas sborno-monolitnoy zdaniya i osobennosti yego raboty na raznykh zhiznennykh tsiklakh [The frame of a prefabricated-monolithic building and features of its work on different life cycles]. *Vestnik MGSU*. 2015. No 9. Pp: 28–35. (rus)
9. Klyuyeva N. V., Kolchunov V. I., Rypakov D. A. Zhilye i obshchestvennyye zdaniya iz zhelezobetonnykh panel'no-ramnykh elementov industrial'nogo proizvodstva [Residential and public buildings of reinforced concrete panel-frame elements of industrial production] *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2015. No 5. Pp: 69–75. (rus)
10. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I., Vorob'yev Ye.D., Rimshin V.I., Osovskikh Ye.V., Dotsenko V.N., Tvorogova M.N. O raschete sborno-monolitnykh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy [On the calculation of precast-monolithic reinforced concrete building skeletons]. *Beton i zhelezobeton v Ukraine*. 2004. No 1(19). Pp: 2-7. (rus)
11. Yemel'yanov S.G., Klyuyeva N.V., Koren'kov P.A. Metodika opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Method for determining the survivability parameters of reinforced concrete skeletons of multi-storey buildings] *Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2016. No 3 (363). Pp: 252-258. (rus)
12. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh [Survivability of buildings and structures under beyond design impacts]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2014. 208 p. (rus)
13. Geniyev G.A., Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V. and etc. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruksiy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh [Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond design effects]: monograph. Moscow: ASV, 2004. 216 p. (rus)
14. Fialko S.YU. O metodakh resheniya bol'sherazmernykh zadach stroitel'noy mekhaniki na mnogoyadernykh komp'yuterakh [On the methods of solving large-dimensional problems of structural mechanics on multi-nuclear computers] *Magazine of civil engineering*. 2013. No 5(40). Pp: 116–124. (rus)
15. Yu J., Tan K. H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*. 2013. T. 55. Pp: 90-106.
16. Ahmadi R. et al. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage. *Shock and Vibration*. 2016.
17. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Engineering Structures*. 2017. T. 139. Pp: 31-45.
18. Klyuyeva N. V., Koren'kov P. A. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevnykh konstruktivnykh sistem [Method of experimental determination of living pa-

rameters of reinforced concrete frame-rod structural systems] *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No 2. Pp: 44-48. (rus)

19. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnyye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Calculated models of resistance to reinforced concrete]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2004. 472 p. (rus)

20. Hallquist, J.O. et al. LS-DYNA Keyword User's Manual v.970/ J.O. Hallquist Livermore Software Technology Corporation, 2003. 1564 p.

21. Patent 2437074 Rossiyskoy Federatsii, MPK G01M99/00. Sposob eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzheniy v zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevyykh sistemakh ot vnezapnogo vyklyucheniya lineynoy svyazi / N. V. Klyuyeva, A. S. Bukhtiyarova; zayavitel' i patentoobladatel' OrelGTU; zayavl. 07.12.2009; opubl. 20.12.2011, Byul. № 35.

22. Patent 2642542 Rossiyskoy Federatsii. Ustroystvo dlya eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzheniy v ramno-sterzhnevyykh konstruktivnykh sistemakh / N. V. Klyuyeva, P. A. Koren'kov; zayavitel' i patentoobladatel' KFU; opubl. 29.01.2018.

Fedorova Natalia V.

National Research Moscow State Construction University, Moscow, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures,
E-mail: fenavit@mail.ru

Korenkov Pavel A.

Academy of Construction and Architecture (structural unit) of the Federal State Unitary Enterprise VO "Vernadsky Crimean Federal University", Simferopol, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Building Constructions,
E-mail: kpa_gbk@mail.ru

Vu Ngok Tuen

South-Western State University, Kursk, Russia,
Post-graduate student of the department of unique buildings and structures,
E-mail: ngoctuyennd91@gmail.com

УДК 551.521.9, 551.506.3

ГОРБАРЕНКО Е.В., ШИЛОВЦЕВА О.А.

ЕСТЕСТВЕННАЯ ОСВЕЩЕННОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ МО МГУ

В метеорологической обсерватории Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова с 1964 года проводится мониторинг естественной освещенности земной поверхности, с 2012 – освещенности четырех различно ориентированных вертикальных поверхностей. Это наиболее длительный ряд непрерывной регистрации естественной освещенности в мире, а для территории России – единственный. На базе этих наблюдений анализируется временная изменчивость освещенности при ясном небе и при средних условиях облачности. Приведены оценки влияния разных климатообразующих факторов на освещенность: высоты Солнца как главного астрономического фактора, обуславливающего периодическое изменение освещенности земной поверхности, облачности – фактора, приводящего к нарушению цикличности, альbedo подстилающей поверхности как сезонно действующего фактора. Получены соотношения между освещенностью горизонтальной и каждой из вертикальных поверхностей. Результаты мониторинга освещенности могут быть использованы для оценки световых условий помещений для взаимной увязки норм искусственного и естественного освещения в течение дня.

Ключевые слова: многолетние наблюдения, прозрачность атмосферы, облачность, освещенность, строительные нормы, освещенность стен.

Введение

Проблема создания рационального светового климата в производственных и жилых помещениях всегда привлекала внимание широкого круга специалистов-гигиенистов, биофизиков, светотехников, строителей и архитекторов. Для создания комфортной световой среды все помещения, предназначенные для длительного пребывания людей, должны иметь естественное освещение. Недостаточное естественное освещение в соответствии с нормативными документами дополняется искусственным, и создается совместное освещение. С другой стороны, избыточная инсоляция может создавать световой дискомфорт, что предполагает устройства солнцезащиты [8]. Нормируемым показателем естественного освещения помещений принят коэффициент естественной освещенности (КЕО). КЕО показывает, какая часть наружной освещенности на горизонтальной открытой поверхности может быть получена в помещении. За основу расчетов принимается освещенность от небесного свода равномерной яркости при пасмурном небе. Учет освещения вертикальных поверхностей представляет интерес строителей и архитекторов, как в эстетическом, так и в функциональном (размещение витрин, реклам и т.п.) отношении. Естественное освещение фасадов и помещений существенно меняется вслед за освещенностью земной поверхности (Е).

Под естественной освещенностью земной поверхности понимается фотометрическая величина, которую создает солнечное излучение в диапазоне длин волн 380-760 нм, ее оценивают по зрительному восприятию. Световой режим территории формируется под влиянием нескольких факторов: основные, астрономические, – это продолжительность светового дня и высота солнца над горизонтом, кроме того, существенно влияют облачность, альbedo подстилающей поверхности, прозрачность атмосферы. Высота солнца характеризуется циклическим изменением, облачный покров – хаотичным, альbedo поверхности – сезонным. На прозрач-

ность атмосферы может оказывать существенное влияние естественное (лесные пожары, вулканические извержения) и антропогенное загрязнение. Велики различия естественной освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей. Поэтому световой режим территории характеризуется значительной изменчивостью. Основные закономерности возможно получить в результате многолетнего мониторинга естественной освещенности на базе наземных наблюдений [2,9].

Цель настоящей статьи – предоставить специалистам качественную информацию по динамике естественной освещенности в Московском регионе используемую при проектировании освещения помещений различного назначения.

Метеорологическая обсерватория МГУ (МО МГУ) является единственной станцией на территории Российской Федерации, где регулярно с 1964 г. проводятся световые наблюдения [6]. До 2012 года непрерывная регистрация проводилась приборами, разработанными инженерами МО МГУ (регистратор естественного освещения – РЕО). С 2012 г. контрольным прибором служит фотометр LI-210SL фирмы "LI-COR" (США). Наблюдения за освещенностью и обработка результатов производятся строго по Наставлению гидрометеорологическим станциям, принятому на актинометрических станциях сети Росгидромета. Контрольный датчик освещенности МО МГУ проходит регулярную поверку по рабочему эталону первого разряда в соответствии с ГОСТ 8.023-2003 (измеритель естественной освещенности №5801/9-2Б), предоставленным ФБГУ ГГО. Погрешность измерений естественной освещенности в среднем не превышает 10-12%.

В 2012 г. в МО МГУ начались измерения естественной освещенности вертикальных поверхностей, ориентированных на север, юг, запад и восток. Они стали дополнением к многолетним наблюдениям за естественной освещенностью горизонтальной поверхности, что позволило получить достоверные результаты о световом климате Москвы. Наблюдения за освещенностью различно ориентированных по сторонам горизонта вертикальных поверхностей в МО МГУ проводятся с помощью фотометра Daylight Photometer Head Model 910GV фирмы PRC Krochman GmbH (Германия) [12]. За каждую минуту находятся значения и отношения освещенности вертикальной (E_v) к горизонтальной (E_g) поверхности для южной (E_s), северной (E_n), западной (E_w) и восточной (E_e) ориентации. Получены часовые, суточные, месячные, годовые значения E_v и соответствующие соотношения E_v/E_g за период 2014-2017 гг. Так же в МО МГУ с 1955 проводятся все необходимые метеорологические и актинометрические наблюдения, позволяющие оценить влияние факторов, формирующих световой режим территории.

Режим естественной освещенности горизонтальной поверхности

Для решения прикладных задач представляет интерес дневная освещенность. Переход от ночной освещенности к дневной происходит в течение некоторого периода времени, называемого сумерками. В этот период освещенность меняется от 0,1 до 0,5 лк. После восхода Солнца естественная освещенность земной поверхности быстро возрастает, достигая максимальных значений в околополуденное время. Для суточного хода суммарной освещенности характерно наличие небольшой асимметрии относительно полудня в весенне-летнее время. Дополуденные величины E несколько больше соответствующих послеполуденных значений. Это объясняется развитием внутримассовой облачности во второй половине дня. В течение года околополуденные значения E возрастают от 12 до 70 клк·ч, т.е. более чем в 5 раз.

Влияние различных непериодических факторов на освещенность приводит к значительной межсуточной изменчивости дневного количества освещения (рис.1). Максимальные значения E отмечаются при переменной облачности и диске солнца, не закрытом облаками. Минимальные значения E наблюдаются в дни со сплошной облачностью нижнего яруса и осадками в течение всего дня. Коэффициент вариации суточных сумм для летних месяцев 30-36%, для зимних – 45-50%, а для переходных осенне-зимних – 60-65%. Минимальные суммы E составляют 10-15% от средней суммы в холодный период и до 7-8% в теплый. Максимум E

больше средних значений в 2,5-3 раза в холодное время года и в 1,5-2 раза – в теплое. Дневное количество освещения в течение года в среднем возрастают примерно в 20 раз: от 34 в декабре до 652 клк·ч в июне. Характерной особенностью годового хода суточных сумм E является их сравнительно небольшие отличия от месяца к месяцу за период с мая по июль, и резкие изменения E в переходные периоды (рисунок 1).

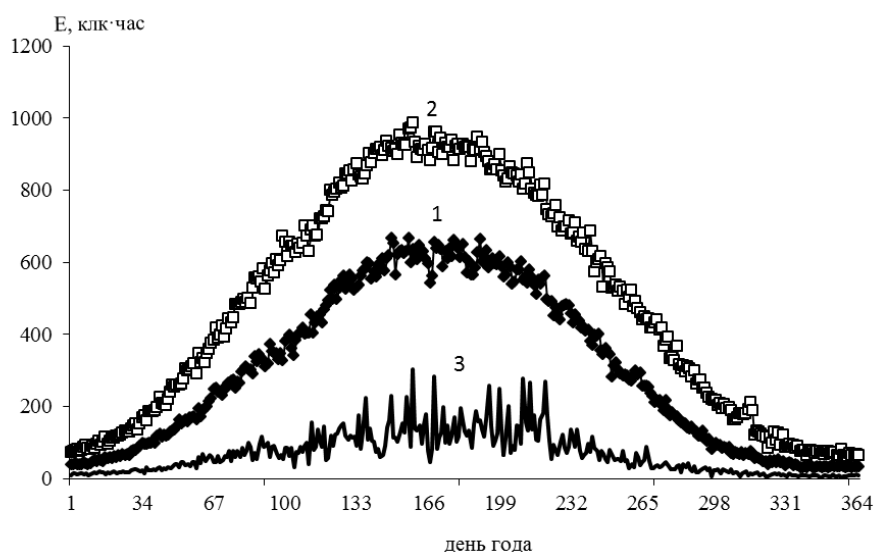


Рисунок 1 - Суточное освещение: 1 – среднее, 2 – максимальное, 3 – минимальное значение за каждый день года (1964-2015 гг.)

Минимальное количество E (2 клк·ч) поступило к земной поверхности 14 декабря 1965 года, а максимальное (1024 клк·ч) – 1 июня 2016 года. Наибольшая повторяемость суточных значений E в зимние месяцы приходится на градацию 0-50 клк·ч, в летние 750-800 клк·ч (таблица 1).

Таблица 1 - Повторяемость (%) дневного количества освещения суммарным светом

Градации E_0 , клк·ч		Месяцы											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
От	До												
0	50	<u>50</u>	9	0	0		0	0		1	13	<u>53</u>	<u>79</u>
50	100	44	26	7	3	0	0	1	1	7	<u>28</u>	33	21
100	150	5	<u>29</u>	<u>14</u>	6	2	2	2	2	10	19	11	
150	200	0	20	13	8	2	2	3	3	10	16	3	
200	250		12	12	8	3	1	3	4	10	9	0	
250	300		5	13	7	3	2	3	5	<u>12</u>	7		
300	350		1	12	8	3	4	4	6	<u>12</u>	4		
350	400			12	8	5	3	4	7	11	2		
400	450			8	<u>11</u>	6	4	5	8	10	0		
450	500			6	10	7	5	6	9	8			
500	550			2	10	7	6	6	9	6			
550	600			0	7	9	6	7	12	2			
600	650				8	9	9	<u>10</u>	<u>13</u>	1			
650	700				4	<u>10</u>	9	9	8	0			
700	750			0	1	<u>10</u>	10	<u>10</u>	6				
750	800				1	<u>10</u>	<u>11</u>	9	3				
800	850				0	7	10	8	1				
850	900					3	7	6	0				
900	950					1	5	3	0				
950	1000					1	3	1					
1000	1050					0	1	0					

* выделены максимальные значения повторяемости; n – число дней

Результаты мониторинга суточной изменчивости освещенности могут быть использованы для оценки световых условий помещений для взаимной увязки норм искусственного и естественного освещения в течение дня, что необходимо для технических и экономических расчетов при создании рабочих мест и нормальной освещенности жилых помещений. При нормировании освещения в здании задается критический уровень естественной освещенности горизонтальной поверхности равный 5 клк [5]. В таблице 2 представлены расчеты продолжительности суток выше этого уровня при условии безоблачного неба ($\Pi_{\text{я}}$) и при средних условиях облачности (Π_0).

Таблица 2 - Время наступления критической освещенности, равной 5 клк, и продолжительность использования естественного освещения в Москве (Π , час)

срок	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
утро ¹	9,1	8,0	6,5	5,5	4,6	4,1	4,3	5,0	6,0	7,0	8,6	9,4
вечер	14,6	15,6	16,9	17,9	18,9	19,5	19,2	18,4	17,4	16,2	14,9	14,3
$\Pi_{\text{я}}$	5,5	7,6	10,4	12,3	14,3	15,4	14,9	13,4	11,4	9,2	6,3	4,9
утро	9,6	8,2	6,9	5,8	4,8	4,3	4,6	5,4	6,5	7,8	9,3	10,3
вечер	14,4	15,3	16,6	17,7	18,7	19,2	18,9	18,1	18,2	15,6	14,6	13,7
Π_0	4,9	7,1	9,7	11,9	13,9	14,8	14,4	12,8	11,7	7,8	5,2	3,4

Примечание: 1 – моменты критической освещенности указаны по истинному солнечному времени, минуты указаны в долях часа

В малооблачную погоду 9 месяцев в году в рабочее время освещенность помещений может быть обеспечена естественным светом. В самые «темные» месяцы года в ноябре и декабре при сплошной облачности в помещении необходимо электрическое освещение в течение всего дня.

Годовой ход количества E по месяцам определяется сезонным ходом высоты Солнца, продолжительностью солнечного сияния и ходом облачности. Максимальное поступление E в соответствии с продолжительностью светового дня наблюдается в июне (18,6 Млк·ч), а минимальное – в декабре (1 Млк·ч) (таблица 3). Коэффициент вариации месячных сумм E меньше, чем суточных, и колеблется в пределах 17-21% в холодное время года и 9-14% - в теплое.

Таблица 3- Среднее количество освещения за месяц (Мкл·час)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1964-2017	1,67	3,58	8,15	11,79	17,56	18,64	18,34	14,76	8,75	4,16	1,66	0,99
$V, \%$	17	17	12	11	11	10	9	9	14	16	21	20
$\delta, \%$	2	-18	-5	-3	3	4	-2	11	-19	-30	-13	2
max год	2,21 2010	4,99 1969	10,77 1969	14,57 2014	22,39 2002	22,38 1968	22,73 2014	17,43 2015	11,35 2014	5,62 1987	2,68 1967	1,67 2002
min год	1,11 1989	2,22 1990	5,67 1979	8,35 1986	12,54 1974	14,51 2003	15,04 2000	11,57 1998	5,07 2013	2,33 1970	1,02 2003	0,61 2017

Облачность – главный фактор, который нарушает астрономически обусловленные сезонные закономерности изменения освещения. Небольшое количество облаков может явиться причиной того, что максимальная суточная сумма E на 2-10% превышает E в безоблачных условиях. Сплошная плотная облачность нижних ярусов уменьшает освещенность – в среднем на 75-85%.

Фактор снежного покрова увеличивает естественную освещенность за счет многократного переотражения света от поверхности и складок снега. Здесь немалую роль играет также содержание воды, чистота и цвет снега, от которых зависит световое альбедо. В период с октября по апрель (в месяцы со снежным покровом) величина E в среднем на 6-8% больше, в декабре разница значений E в годы со снежным покровом и без него составила 26%.

Влияние прозрачности атмосферы на уровни освещенности начинает сказываться при сильной замутненности атмосферы. При аномальных значениях аэрозольной мутности атмосферы в период дымной мглы от лесных и торфяных пожаров (1972, 2002, 2010) ослабление суммарной освещенности дымной мглой составило около трети от возможного светового потока. В 2010 г. сильная мгла ослабляла суммарную освещенность в среднем более чем на 40% [10].

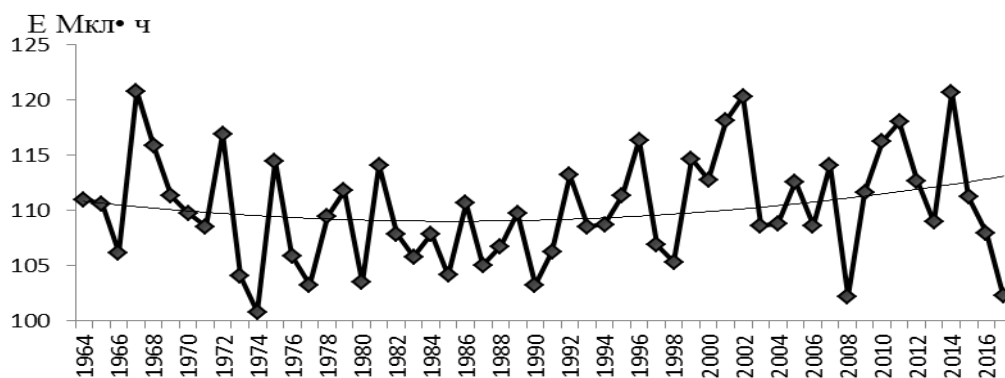


Рисунок 2 - Многолетнее изменение годового количества естественного суммарного освещения в Москве

Многолетние измерения освещенности в МО МГУ позволяют получить представление о характере изменения светового режима Московского региона в период 1964-2017 гг. В среднем за год сумма освещения в Москве составляет 110 Мкл·ч. Закономерности многолетней изменчивости E происходят в соответствии с изменением режима облачности, продолжительности солнечного сияния, суммарной радиации [1,3]. Годовое количество E с середины 60-х годов до середины 70-х годов интенсивно уменьшалось от 120 Мкл·ч до 105-108 Мкл·ч. С середины 80-х годов прослеживается тенденция к постепенному увеличению годового количества освещения до уровня 60-х годов (рисунок 2). В годовом ходе поступление общей световой энергии заметно уменьшилось в зимний период, а весна стала более «светлой». Летом и осенью изменения E невелики. Статистически значимый рост E отмечен в апреле и июле ($P > 0,95$, $\alpha = 281/10$ лет клк·ч и $\alpha = 333/10$ лет клк·ч соответственно) [11].

Режим естественной освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей

Суммарная освещенность формируется прямым и рассеянным светом. Для освещенности вертикальных поверхностей различной ориентации важным фактором становится азимут солнца. Положение Солнца на небосводе определяет возможную продолжительность облучения вертикальных поверхностей прямым светом. Наиболее выраженное влияние высоты и азимута солнца на освещенность стен различной экспозиции прослеживается в ясные летние дни. На рисунке 3 в качестве примера приведен суточный ход освещенности в безоблачные дни. Вертикальная южная поверхность в летний период получает в целом до двух третей от потока света на горизонтальную поверхность (рисунок 3а). Зимой это соотношение меняется, освещенность южной стены в два раза превышает освещенность горизонтальной поверхности. В это время года высота солнца такова, что угол падения радиации на южную стену близок к вертикальному (рисунок 3б). Максимумы в суточном освещении северной стены приходятся

на ранние утренние и поздние вечерние часы. Уровни освещения восточной и западной вертикальных поверхностей близки по своим значениям и в 2,5-3 раза превышают E_g в утренние и вечерние часы соответственно (рисунок 3а, б). Освещенность вертикальных поверхностей различной экспозиции согласуется с их радиационным режимом [4,7].

Освещенность стен разной экспозиции различается, эти различия существенно меняются в течение дня в зависимости от условий облачности и состояния солнечного диска. Поэтому при расчете естественного освещения внутренних помещений приходится иметь дело с относительными значениями, которые определяются по сравнению с освещенностью на открытом воздухе. Для упрощения за основу расчетов принимается освещенность от небесного свода равномерной яркости при пасмурном небе – изотропная модель. В действительности при пасмурной погоде освещение всех четырех стен практически одинаково (рисунок 4 в,г), но отношение E_v/E_g меняется и лежит в пределах 25-50%. Такие колебания связаны с различной яркостью облачного неба при облаках нижнего яруса различной оптической толщины.

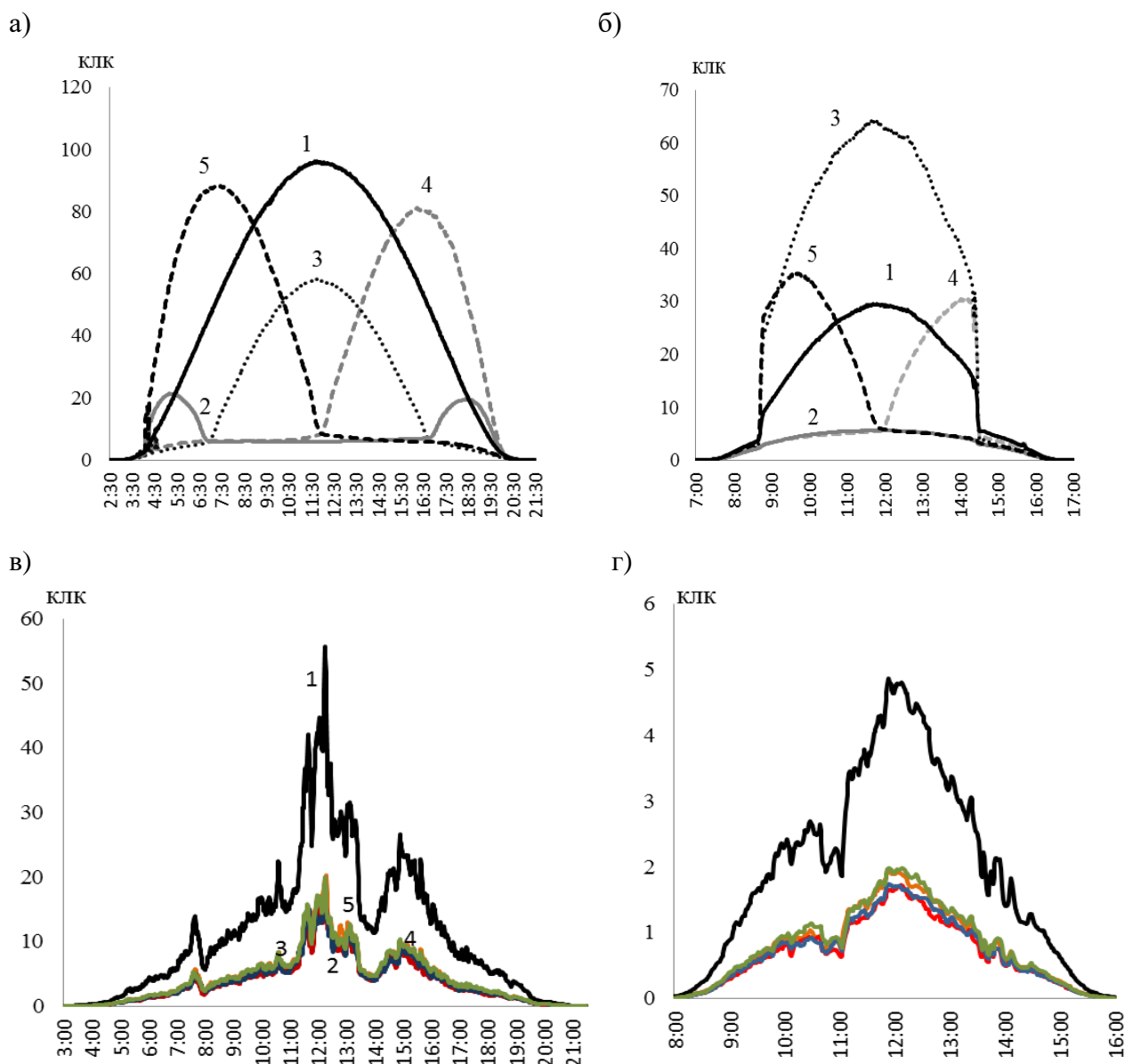


Рисунок 3 - Суточный ход естественной освещенности (по минутным данным):
на горизонтальной (1), северной (2), южной (3), западной (4) и восточной (5) поверхностях: а – лето, ясно; б – зима, ясно; в – лето, пасмурно; г – зима, пасмурно

Средние значения E_N позволили учесть все возможные для нашего региона условия, которые отражают освещенность стен разной ориентации при средних условиях облачности (рисунок 4).

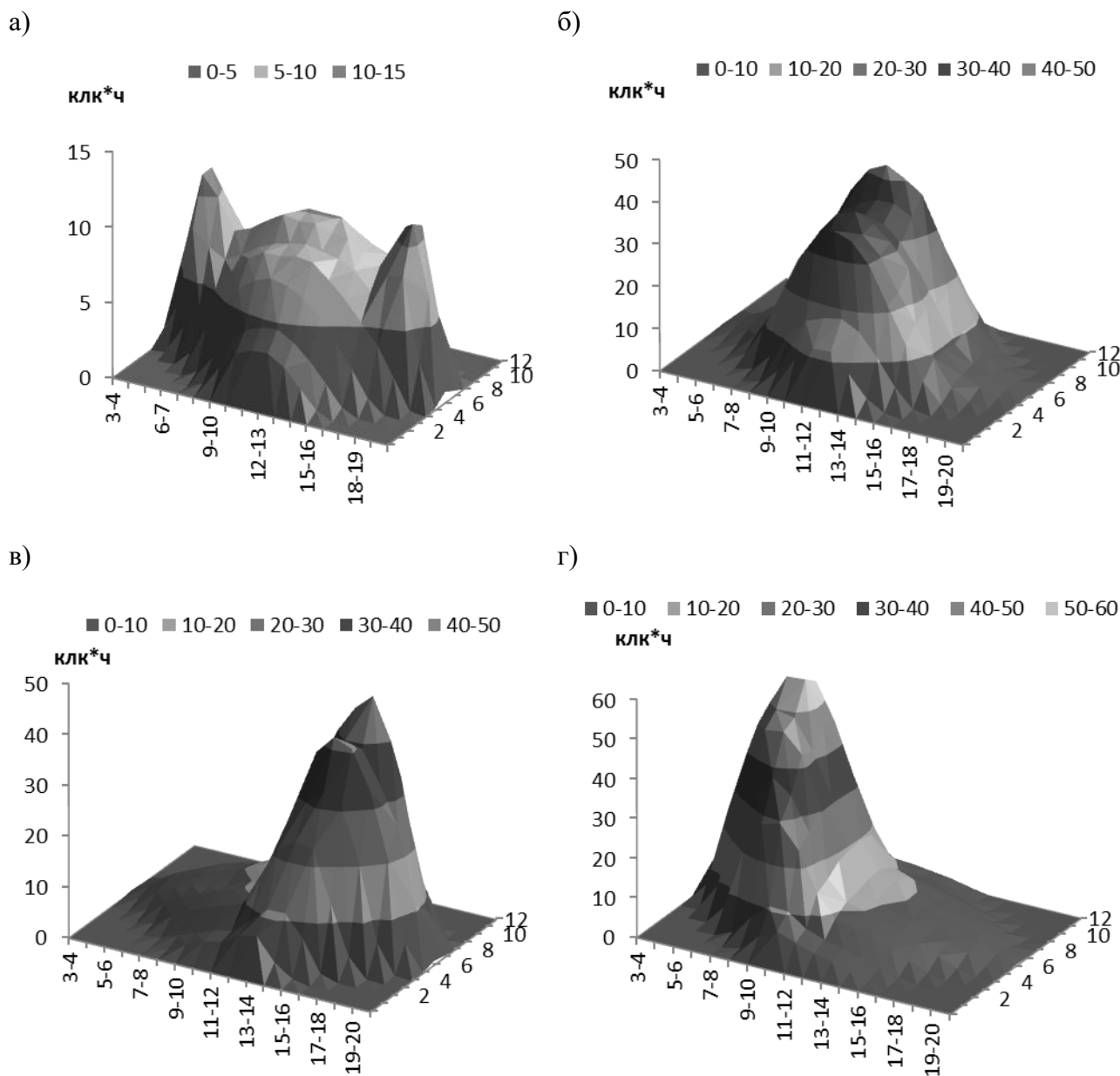


Рисунок 4 - Годовой ход часового количества естественного освещения вертикальных поверхностей, ориентированных на: а–север, б–юг, в–запад, г–восток

Практически для всех месяцев года освещенность северной стены имеет два максимума в утренние и вечерние часы. Отношение E_N/E_g в срок максимальных значений E_N меняется от 1 летние месяцы до 0,5 в зимние. В середине дня величина освещения северной стены составляет всего около 12-17% от E_g в теплое время года, увеличиваясь до 35% в холодное. Абсолютные средние величины E_N в околополуденное время меняются от 2 клк*ч в декабре до 10-11 клк*ч в июле (рисунок 4а). Южная стена, наоборот, освещена солнцем максимально в середине дня, при этом летние отношения E_s/E_g составляют 0,4-0,6, в холодное время они могут достигать 1,5. E_s в полдень, в среднем изменяется от 5 клк*ч в декабре до 45-50 клк*ч летом (рисунок 4б). Распределение количества освещения восточной и западной стен практиче-

ски симметричны друг относительно друга. Для западной стены летом в первой половине дня отношение E_w/E_g составляет 0,40-0,50 в ранние утренние часы, уменьшаясь до 0,15-20 в середине дня. После полудня количество освещения возрастает и может в среднем превышать величину горизонтальной освещенности в эти часы суток в 1,5-2 раза. Зимой E_w/E_g в среднем составляет 0,6-0,8. Абсолютные значения E_w в околополуденные часы в среднем изменяются от 2,5 клк·ч в декабре до 11-13 клк·ч в середине лета, а в конце летнего дня E_w достигали 50 клк·ч (16-17 ч.) (рисунок 4в). Для восточной стены максимальные значения освещенности и значительное превышение количества освещения вертикальной стены по сравнению с горизонтальной освещенностью отмечаются в утренние часы. В это время уровень освещения летом в среднем составил 55 клк·ч (7-8 ч.), уменьшаясь к полудню до 12-13 клк·ч. В декабре уровень освещения восточной стены составлял всего 2-3 клк·ч в первой половине дня, уменьшаясь до 1 клк·ч и ниже в послеполуденное время (рисунок 4г).

В период с ноября по февраль наибольшая повторяемость суточных значений E_v для всех стен лежит в пределах от 0 до 100 клк·ч, для горизонтальной поверхности – от 100-200 клк·ч. В летний период для северной стены наибольшая повторяемость смещается на градацию 100 – 200 клк·ч, для стен южной и западной экспозиций – от 300 до 400 клк·ч; для восточной стены – 400-500 клк·ч. Превышение освещенности восточной стены относительно западной в теплый период года объясняется развитием в течение дня кучевой облачности, которая достигает своего максимума после полудня. Минимальные дневные значения освещенности для стен всех экспозиций наблюдаются в дни со сплошной дождевой облачностью и осадками в течение всего дня.

Изменения освещения от месяца к месяцу имеет четко выраженный годовой ход, определяемый возможной продолжительностью солнечного сияния, годовым ходом высоты Солнца, облачности и альбедо подстилающей поверхности. Максимальные значения для всех поверхностей отмечены в июле, минимальные в декабре (рисунок 5). Для стен южной экспозиции в марте месячная сумма E_s превышает июньское значение, что определяется сочетанием высоты Солнца и высоким альбедо снежного покрова.

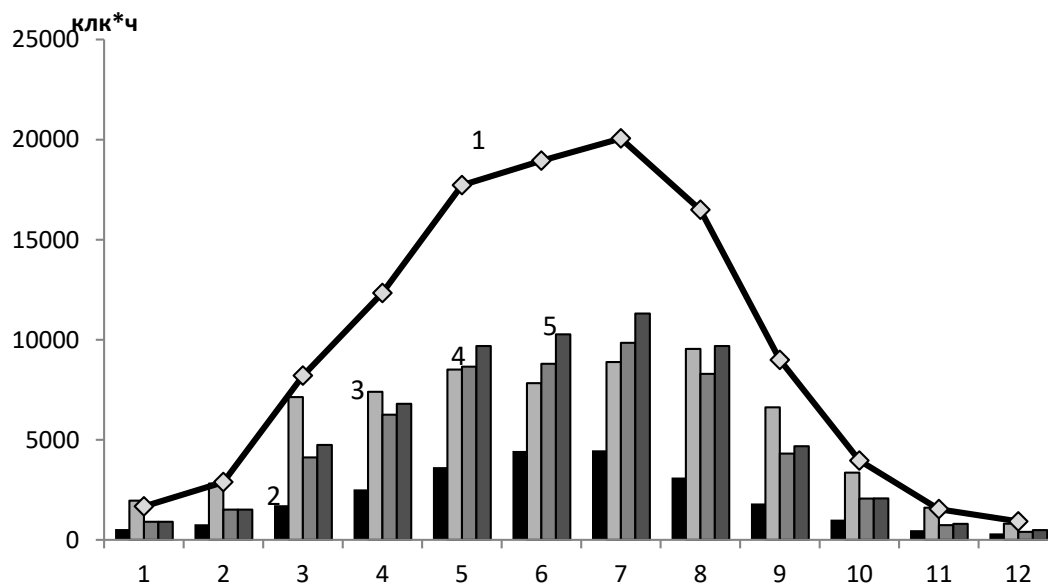


Рисунок 5 - Годовой ход месячного количества освещения горизонтальной и различно ориентированных вертикальных поверхностей: 1– горизонталь, 2–север, 3–юг, 4–запад, 5– восток

В целом за год количество естественного освещения, поступающего на вертикальную стену любой ориентации, меньше, чем на горизонтальную поверхность. Освещенность северных стен составляет только 20%, южной – 60%, западной и восточной чуть больше 50 % от освещенности горизонтальной поверхности.

Выводы

В результате мониторинга естественной освещенности в МО МГУ получены средние оценки E горизонтальной и вертикальных поверхностей, ориентированных на север, восток, юг, запад разного временного разрешения при разных условиях облачности.

1. Закономерности суточного и годового хода естественной освещенности, вызванные астрономическими факторами, могут быть существенно нарушены условиями облачности. Облачность может стать основным фактором, полностью изменив закономерности суточного хода освещенности. Она также влияет и на внутригодовое распределение освещенности, однако, в годовом ходе E основным фактором остается продолжительность светового дня.

2. Зависимость освещенности от прозрачности атмосферы начинает проявляться в экстремальных условиях, в период дымной мглы от лесных пожаров.

3. Экстремальные месячные значения E лежат в пределах от 0,61 Млк·ч в декабре 2017 года до 22,73 Млк·ч в июле 2015 года; годовые – от 100,78 Млк·ч в 1974 до 120,65 Млк·ч в 2014 году.

4. В многолетней изменчивости годового количества освещения наблюдается квазипериодическая изменчивость и тенденция к росту на 0,75 Млк·ч за 10 лет

5. Различия в освещении вертикальных поверхностей велики в ясные дни. При сплошной облачности освещенность всех четырех стен практически одинакова. При средних условиях облачности сохраняются особенности освещения стен различной экспозиции, отмеченные при ясном небе. Наблюдается годовой ход с максимумом освещения на каждую из стен в июле и с минимумом в декабре.

6. В ясные дни зимой освещение южной стены в середине дня, освещение восточной и западной стен утром и вечером превышают освещенность горизонтальной поверхности в течение всего года. В весенние и летние месяцы восточные стены получают освещения больше, чем западные, а зимой и осенью таких различий практически нет. Освещенность северных стен осуществляется в большей степени рассеянным светом, прямая составляющая наблюдается только утром и вечером в теплый период года.

7. В целом за год количество естественного освещения, поступающего на вертикальную стену любой ориентации, меньше, чем на горизонтальную поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В., Незваль Е. И., Шиловцева О. А. Климатические ресурсы солнечной радиации Московского региона. М.: ЛИБРОКОМ. 2012. 312 с.
2. Бартенева О. Д., Полякова Е. А., Русин Н. П. Режим естественной освещенности на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1971. 238 с.
3. Горбаренко Е.В. Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. 2016. №2. С. 5-17.
4. Горбаренко Е.В., Коркина Е.В., Ларин О.А. Радиационный режим различно ориентированных вертикальных поверхностей по данным МО МГУ // Бюллетень строительной техники. 2017. № 6 (994). С. 43-45
5. Гусев Н.М., Киреев Н.Н. Освещение промышленных зданий. — М.: Изд-во литературы по строительству. 1968. 160 с.
6. Евневич Т. В. Регистрация естественной освещенности в Москве // Сб. "Климат большого города". М., изд. МГУ, 1965. С.180—186.
7. Коркина Е.В., Горбаренко Е.В., Гагарин В.Г., Шмаров И.А. Основные соотношения для расчета облучения солнечной радиацией стен отдельно стоящих зданий // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 27-33.
8. Оболенский Н.В. Архитектура и солнце. М. Стройиздат. 1988. 205 с.
9. Стадник В.В., Шанина И.Н. Оценка естественной освещенности земной поверхности по актинометрическим данным // Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С.110-124.
10. Шиловцева О.А. Световые условия в Москве во время дымной мглы. // Метеорология и гидрология. 2014. №4. С.5-18.
11. Шиловцева О.А. Многолетние изменения естественной освещенности земной поверхности в Москве // Труды ГГО. 2014. Вып. 572. С.100-122.

12. Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2015 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова (2016) / Под ред. Шиловцевой. М.: МАКС Пресс Москва, 2016. 268 с.

Горбаренко Екатерина Валентиновна

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Географический факультет, г. Москва, Россия, Ведущий научный сотрудник

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

Старший научный сотрудник

E-mail: catgor@mail.ru

Шиловцева Ольга Александровна (1958-2017)

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Географический факультет, г. Москва, Россия, Ведущий научный сотрудник

GORBARENKO E.V., SHILOVTSEVA O.A.

THE NATURAL ILLUMINANCE OF HORIZONTAL AND VERTICAL SURFACES ACCORDING TO MOSCOW STATE UNIVERSITY OBSERVATIONS

Since 1964, the natural illumination of the earth's surface has been monitored at the Meteorological Observatory of the Lomonosov's Moscow State University, since 2012 - the illumination of four differently oriented vertical surfaces. This is the longest series of continuous recording of natural light in the world, and for the territory of Russia it is the only one. Based on these observations, the temporal variability of illumination under a clear sky and at average cloudy conditions were analyzed. The estimation of impact of various climatic factors on the illumination was done: solar elevation as the main astronomical factor causing the periodic change in earth's surface illumination, cloudiness as a factor leading to disruption of cyclicality, surface albedo as a seasonally acting factor. The correlations between illumination of the horizontal surface and each of the vertical surfaces have been obtained. The results of monitoring the illumination can be used to assess the light conditions of premises for the mutual coordination of the norms of artificial and natural lighting during the day.

Key words: long-term measurements, atmosphere transparency, cloudiness, illumination, building regulations, wall illumination, daylighting.

REFERENCES

1. Abakumova G. M., Gorbarenko Ye. V., Nezval' Ye. I., Shilovtseva O. A. Klimaticheskiye resursy solnechnoy radiatsii Moskovskogo regiona [Climatic resources of solar radiation of the Moscow region]. Moscow: LIBROKOM. 2012. 312 p. (rus)
2. Barteneva O. D., Polyakova Ye. A., Rusin N. P. Rezhim yestestvennoy osveshchennosti na territorii SSSR [Mode of natural illumination in the territory of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1971. 238 p. (rus)
3. Gorbarenko Ye.V. Klimaticheskiye izmeneniya radiatsionnykh parametrov atmosfery po dannym nablyudeniyy v meteorologicheskoy observatorii MGU [Climatic changes in the radiation parameters of the atmosphere from observations in the Meteorological Observatory of Moscow State University]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2016. No 2. Pp: 5-17. (rus)
4. Gorbarenko Ye.V., Korkina Ye.V., Larin O.A. Radiatsionnyy rezhim razlichno oriyentirovannykh vertikal'nykh poverkhnostey po dannym MO MGU [Radiation regime of differently oriented vertical surfaces according to the data of the Moscow State University MGU]. *Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2017. No 6 (994). Pp: 43-45. (rus)
5. Gusev N.M., Kireyev N.N. Osveshcheniye promyshlennykh zdaniy [Lighting of industrial buildings]. Moscow: Izd-vo literatury po stroitel'stvu. 1968. 160 p.
6. Yevnevich T. V. Registratsiya yestestvennoy osveshchennosti v Moskve [Registration of natural illumination in Moscow]. Sb. "Klimat bol'shogo goroda" [Proceedings "The climate of the big city."]. Moscow. Publ. MGU, 1965. Pp: 180—186. (rus)

7. Korkina Ye.V., Gorbarenko Ye.V., Gagarin V.G., Shmarov I.A. Osnovnyye sootnosheniya dlya rascheta oblucheniya solnechnoy radiatsiyey sten otdel'no stoyashchikh zdaniy [Basic relationships for the calculation of solar irradiation of walls of detached buildings]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2017. No 6. Pp: 27-33. (rus)
8. Obolenskiy N.V. Arkhitektura i solntse [Architecture and sun]. Moscow: Stroyizdat. 1988. 205 p. (rus)
9. Stadnik V.V., Shanina I.N. Otsenka yestestvennoy osveshchennosti zemnoy poverkhnosti po aktinometricheskim dannym [Estimation of the natural illumination of the earth's surface by actinometric data]. *Trudy GGO [Proceedings of the GGO]*. 2016. Vol. 580. Pp: 110-124. (rus)
10. Shilovtseva O.A. Svetovyye usloviya v Moskve vo vremya dymnoy mgly [Light conditions in Moscow during the smoke haze]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2014. No 4. Pp: 5-18. (rus)
11. Shilovtseva O.A. Mnogoletniye izmeneniya yestestvennoy osveshchennosti zemnoy poverkhnosti v Moskve [Long-term changes in the natural illumination of the earth's surface in Moscow]. *Trudy GGO [Proceedings of the GGO]*. 2014. Vol. 572. Pp: 100-122. (rus)
12. Ekologo-klimaticheskiye kharakteristiki atmosfery v 2015 g. po dannym Meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova (2016) [Ecological and climatic characteristics of the atmosphere in 2015 according to the data of the Meteorological Observatory of the Moscow State University. Lomonosov Moscow State University (2016)]. Edited by Shilovtseva. Moscow: MAKS Press Moskva, 2016. 268 p.

Gorbarenko Ekaterina Valentinovna

Lomonosov's Moscow State University, Geographical Faculty, Moscow, Russia,

PhD in geography, a senior researcher of the actinometrical department of meteorological observatory of the chair of meteorology and climatology

Scientific and Research Institute of Construction Physics of Russian Academy of Architecture and Constructional Science, Moscow, Russia,

Senior researcher,

E-mail: catgor@mail.ru

Shilovtseva Olga A. (1958-2017)

Lomonosov's Moscow State University, Geographical Faculty, Moscow, Russia,

PhD in geography, a senior researcher of the actinometrical department of meteorological observatory of the chair of meteorology and climatology

УДК 711.4-112

ЕНИН А.Е., ШЕВЕЛЁВ В.П., СТУПАК Е.Ю

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ СИСТЕМНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ «НАСЕЛЕНИЕ↔СРЕДА» (НА ПРИМЕРЕ Г. ВОРОНЕЖ)

Целью данной работы является исследование формирования структурно-функциональной, планировочной и композиционной структур городов под воздействием внутренних и внешних факторов. Взаимосвязанное решение композиционных проблем с общими проблемами развития и территориального роста города остаётся основой последовательного структурного и функционального формирования городской среды для создания комфортной среды жизнедеятельности современного общества.

В данной работе на примере г. Воронежа рассмотрено формирование планировочной структуры мегаполиса и выявлены градостроительные проблемы в процессе исторического развития города. На основе полученных результатов предложена концепция нового проекта пространственного развития города на перспективу.

Темпы и развитие композиционно-планировочного, структурно-функционального каркаса города должны определяться необходимостью сохранения его целостности, как сложной многоуровневой системы, т.е., направлением и темпами, формами и принципами всей его структуры. Поэтапно анализируя исторические схемы городов, и выявляя проблемы в формировании пространства разных иерархических уровней, возможно создание нового проектного предложения, удовлетворяющего запросам современного общества и ближайшей перспективе развития.

Ключевые слова: Воронеж, ретроспективный эксперимент, планировочная структура, композиционный каркас, улично-дорожная сеть, генеральный план, историческое развитие, композиция

Динамическое увеличение и усложнение, в основном нелинейное (качественное и количественное), градостроительных объектов, скажем генерального плана города, увеличивает ответственность и долю «ошибки» за установленные проектные решения.

Проектировщикам и исследователям становится понятным, что существующие технико-экономические и/или комплексные методы и подходы не полностью соответствуют новым требованиям и параметрам решения задач различных видов деятельности (наука, практика). В ранее опубликованных материалах авторов показано, что это: *поликритериальность* - применение ряда критериев, оценивающих качество отдельных, частей конкретного объекта. Бытующее мнение что, чем сложнее объект, тем больше нужно критериев применять при его оценке, можно объяснить двумя проблемами: первая - при назначении критериев не учитывается свойство иерархичности их структуры и поэтому правильно было бы рассуждать о «дереве критериев», а не о их количестве; вторая - под поликритериальностью подразумевается некое качество сложных систем, как *многоаспектность*. Город и его функциональная структура по-иному видится разным представителям сфер человеческой деятельности (экономисту, социологу, архитектору, инженеру, связисту, историку). Эти моменты по своему пониманию относятся к разным уровням функциональных компонентов объекта исследования и не могут иметь единовременной, - «одноуровневой» оценки. *Существующий временной дисбаланс существующего «алгоритма» проектирования и «согласования» генплана крупного города, и т.п., - и объективного процесса развития его функционально-пространственной структуры.* [1].

«...Единственный реально осуществимый путь успешного построения и управления жизнедеятельностью демозкосистем, как объекта архитектуры и градостроительства, это раз-

работка функциональных моделей, адекватных реальным экологическим системам типа «население ↔ среда» с точностью до «С-изоморфизма» (системного изоморфизма)» [1, 2].

Один из возможных процессов построения функциональной модели, являющейся формализованной теорией изучаемого объекта, можно представить в следующем виде: **задание на разработку проекта, корректное обозначение проблемы, разработка онтологической модели** (осмысление природы и сущности исследуемого объекта как системы, определение иерархических уровней системы, определение системообразующих элементов (подсистем) и связей (коммуникаций), **разработка функциональной модели** (определение функциональной структуры системы, определение и обоснование принципов функционирования компонентов системы в целом, формулировка и обоснование структуры «генерального» критерия оптимальности /эффективности системы), **измерение компонентов системы** (измерение системообразующих элементов и связей (коммуникаций) системы, определение принципа соизмерения компонентов системы), **экспериментальная проверка соответствия полученной системной модели исследуемому объекту** (разработка экспериментальных вариантов решений объекта на основе его системной модели, приведение вариантов к сопоставимому виду, исследование допустимой разницы между экспериментальными и модельными показателями качества сравниваемых вариантов, ранжирование вариантов по значению критерия оптимальности, принятого в данной модели/теории, проверка на достаточность соответствия данных, полученных на модели, показателям фактического уровня качества экспериментальных вариантов) [1].

Все блоки алгоритма связаны прямыми обратными связями. *Прямые связи* – чёткое указание к осуществлению следующего этапа алгоритма, а обратные связи могут появиться, если «на выходе» этапа результат не отвечает наперед заданным (нормативным) количественным или качественным свойствам.

Наиболее важный и меньше всего исследованный и разработанный в градостроительстве - этап *научного эксперимента* (от лат. experimentum - проба, опыт), - чувственно-предметная деятельность в науке, исключительно ответственная предпроектная фаза воссоздания объекта познания, - *формирование принципов функционально-планировочной структуры генеральных планов поселений*.

Методологической основой научного эксперимента является создание мысленной и/или материальной *модели*, с достаточной степенью соответствия (адекватности) отображающей *сущность* будущего реального объекта - его «внутреннее содержание, выражающееся в единстве всех его многообразных свойств и отношений» [3]. Но в то же время часть зарубежных и отечественных учёных и практиков полагают, что проведение эксперимента (в общепринятом понимании этого процесса) на иерархическом уровне градостроительства и районной планировки *в принципе невозможно*.

Эксперимент - одна из органических частей единого процесса познания, с помощью которой в подконтрольных и управляемых условиях изучаются явления окружающей объективной реальности. Эксперимент проводится на основе теории, определяющей корректность постановки задач и интерпретации выводов, поэтому к числу задач, решаемых на этом этапе и имеющих принципиальное значение, относится также проверка гипотез и прогнозов данной теории, т. е. критическая оценка истинности научного познания в целом. Но на уровне районной планировки и градостроительства последняя задача - с позиций современного положения в области теории и практики архитектурного эксперимента - фактически невыполнима. По некоторым научным разработкам [2], в случае, когда проверка выполненных архитектурно-градостроительных решений при помощи «физического» выполнения будущего объекта в масштабе 1:1 невозможна, эта проблема может быть разрешена (с достаточной степенью достоверности) на основе выполнения и применения абстрактных объектов, так называемых моделей. «Модель – отображение определённых характеристик объекта в целях его исследования. Модель является важным инструментом научной абстракции, позволяющим выделить,

обособить и анализировать существенные для данного исследования характеристики - свойства, взаимосвязи, структурные, функциональные параметры» [4,5].

Обнаруживается, что мы можем использовать «прошлое» с большой выгодой. Если мы на «прошлое» посмотрим с позиций понимания архитектуры и градостроительства как системы. Если мы исследуем исторический объект в «прошлом», то возникает вопрос: можно его целиком использовать в настоящем или нет? Наверное, можно только в том, аспекте, если он является системой. Даже может не получаться какая та часть в современном объекте и её в историческом аналоге нет, но можно найти в соседнем квартале, улице и т.д. Это системный подход, системное мышление. Рассматривая данный объект («памятник») как систему, обнаружим, что она совершенно идентична любой современной самой сложной системе. Функциональное назначение элементов и их количество в архитектурной системе одинаково, инвариантно. Это не зависит от его функционального назначения и размера.

На сегодняшний день в архитектурно-градостроительной сфере деятельности есть предпосылки зарождения эксперимента. При этом его процедура, состоящая из следующих разделов: 1-й – проверка непосредственно модели, а затем (2-й раздел) соответствия данной модели той, модели того образца, являющегося «памятью», удачного или неудачного эксперимента. Афинская Хартия провозгласила, что все архитектурные объекты, имеющие три нормируемые параметры и один ненормируемый, идентичны, одинаковы. Но это, другой срез, и другая задача количественной оценки, целевой функции. Важно отметить, что есть четыре процесса (производственные, бытовые, рекреационные и коммуникационные). Исследовать и зафиксировать их качество и если в результате оно подтверждается, то мы можем принимать проектные решения. Это первый этап эксперимента для архитектурно-градостроительных объектов любого уровня иерархии [1] (рис. 1.).

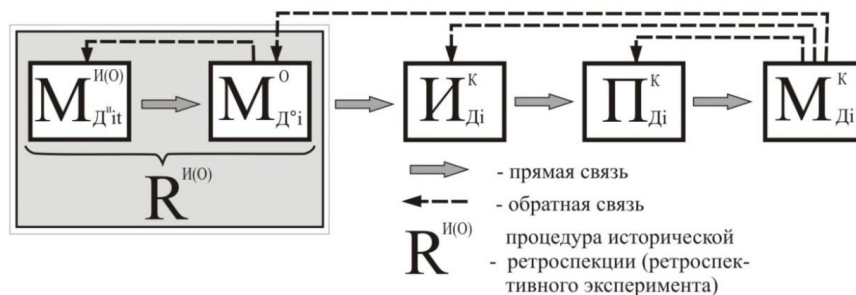


Рисунок 1 - Укрупнённые этапы процесса разработки количественной (математической) модели современной демозкосистемы (D_i) с учётом ретроспективного онтологического эксперимента:

$M^u_{Di}^{(0)}$ - онтологическая модель градостроительного объекта $D^{u(0)}_{it}$

(i – множество функционально различающихся объектов i -го типа; t – множество объектов i -го типа, различающихся временем создания и существования).

M^o_{Di} - модель демозкосистемы i -ого типа

I^k_{Di} – измерение и соизмерение элементов и связей демозкосистемы (D^o_{Di}),

P^k_{Di} – конкретизация («адаптация») системных принципов «поведения» системы, обеспечивающая функционирование целевой функции и алгоритма решения исследовательских и проектных задач

M^k_{Di} – количественная (математическая) модель демозкосистемы i -го типа.

Современные крупнейшие города занимают колоссальные территории, при этом их линейные параметры значительно превосходят нелинейные. Исходя из этого утверждения, при анализе пространства города в целом подразумевается характеристика плоскостного типа территориально-пространственной организации. По мнению некоторых авторов [6], такой способ формирования в 2D пространстве - планировка, а ведущей характеристикой будет планировочная структура. Она подчиняется схеме улично-дорожной сети города, интенсивностью и затратами времени на их осуществление.

Составляющие улично-дорожной сети неравнозначны, магистрали служат как бы «основой», на которую «опираются» дороги и улицы, а композиционные многокомпонентные градостроительные узлы могут быть фокусами коммуникационных связей и пространственных осей между центрами.

В ряде изданий [7,8] делается предположение, что при формировании градостроительной композиции основная роль композиционной основы, вытекает из следующего:

«принципа неизменяемости сложившейся структуры плана», определяющего значение исторически сложившегося плана города в качестве основы вновь формируемой композиционной структуры;

«принципа сохранения ранее сложившегося центра композиции», определяющего доминирующую роль исторического центра как композиционного ядра вновь формируемой структуры;

«принципа типологического сходства ранее сложившегося и нового плана», т.е. сохранением основных композиционных признаков исторически сложившейся пространственно-планировочной организации города;

«принципа усложнения композиции»- её качественного развития на основе количественного увеличения элементов и усложнения пространственных связей между ними в процессе территориального роста города [9].

Анализ формирования планировочной структуры городов на примере г. Воронежа.

Границы территориальных единиц формируются в процессе их исторического становления и развития как вполне определенных, характеризующихся специфическими признаками местности города (рис.2).

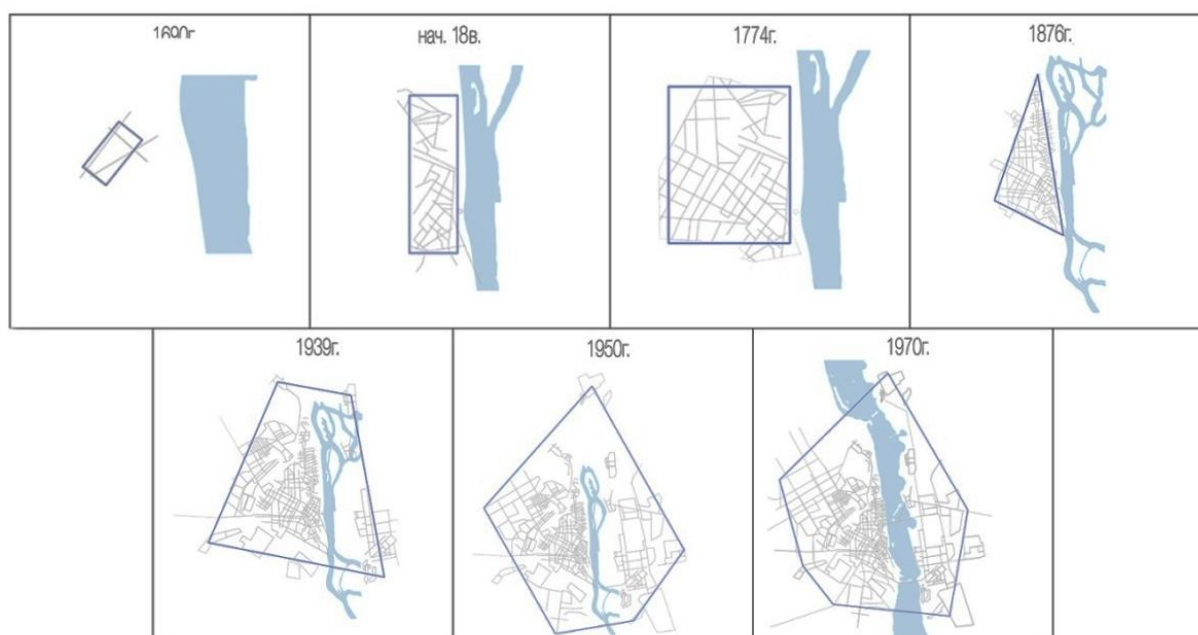


Рисунок 2 - Анализ формы планов г. Воронежа

Так в периоды незначительной функциональной дифференциации городской застройки планировка городов достаточно полно характеризовалась схемами основных улиц и дорог (прямоугольной, радиальной или свободной), соответствующим конкретным историческим

условиям, в которых возникала и развивалась городская система. В терминологии используются и другие их названия: решетчатая, шахматная, радиально-концентрическая, лучевая, радиально-кольцевая и смешанная [11] (рис.3).



Рисунок 3 - Пример лучевой системы в основе генерального плана г. Воронежа, 1774 г.

Различные планировочные схемы улично-дорожной сети обычно соответствуют историческим этапам роста города. Транспортные связи, вне зависимости от специализации улиц можно условно представить в виде системы линий на плане города. Часто они соответствуют также основным композиционным осям (рис.4).

Естественная тенденция приближения мест концентрации городской активности к районам проживания населения обуславливает формирование и развитие общественно-обслуживающих функций вблизи транспортно-коммуникационных узлов и сосредоточением вдоль основных связей центральных функций (рис. 5).

Транспортная инфраструктура не только фиксирует планировочную структуру, но и совокупности с узловыми центрами составляет основу пространственно-планировочного построения города (рис.6, рис.7).

Характеристика композиционно-пространственного развития г. Воронежа в концепции генерального плана 2045 г.

Реализуя принцип территориально-пространственного развития, конфигурация и планировочная структура ориентируют строение системы центров на определенные планировочные схемы соответственно размерам города.

На определенном этапе, связанном с территориальным ростом города, композиционный каркас перестает соответствовать величине города и обеспечивать ему композиционную целостность. Нагрузка на улично-дорожную сеть возрастает, что порождает автомобильный коллапс на дорогах, большую потерю времени на трудовые поездки, транспортную усталость, отсутствие возможности застройки периферийных районах [11].

В г. Воронеж эти проблемы стоят особенно остро. При существующей плотности населения используемая инфраструктура не отвечает потребностям города, что подтверждает исследование архитектурно-градостроительной компании «Яуза-проект» (Рис.8, Рис.9) [12].

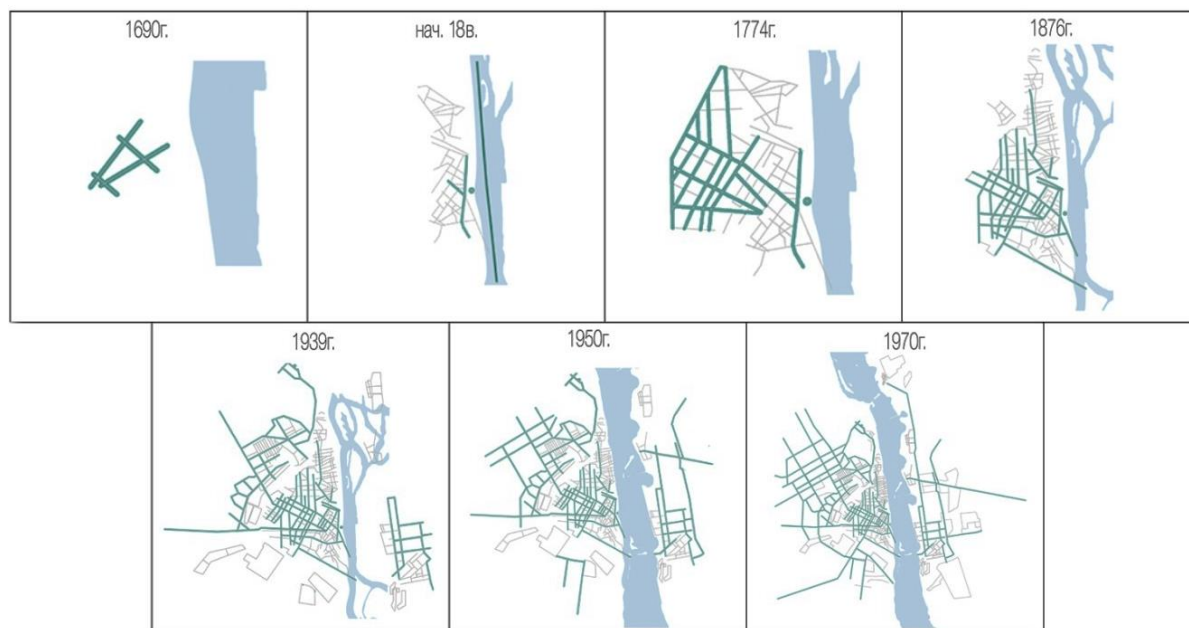


Рисунок 4 - Анализ композиционных осей г. Воронежа

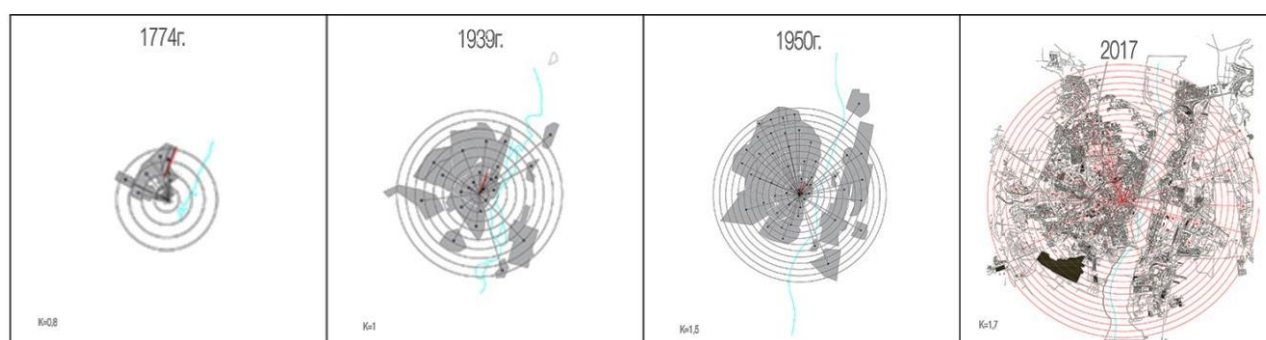


Рисунок 5 - Анализ средней удаленности населения в г. Воронеже

Устойчивое развитие города и сохранение природного ландшафта может обеспечить реконструкция промышленных зон и реорганизация транспортного каркаса.

В основе концептуального предложения развития генерального плана г.Воронежа к 2045г. лежит идея о создании транспортного каркаса с учетом связей между центральными и периферийными частями, а именно:

- вынос промышленных территорий за пределы города и создание Масловского технокомплекса;

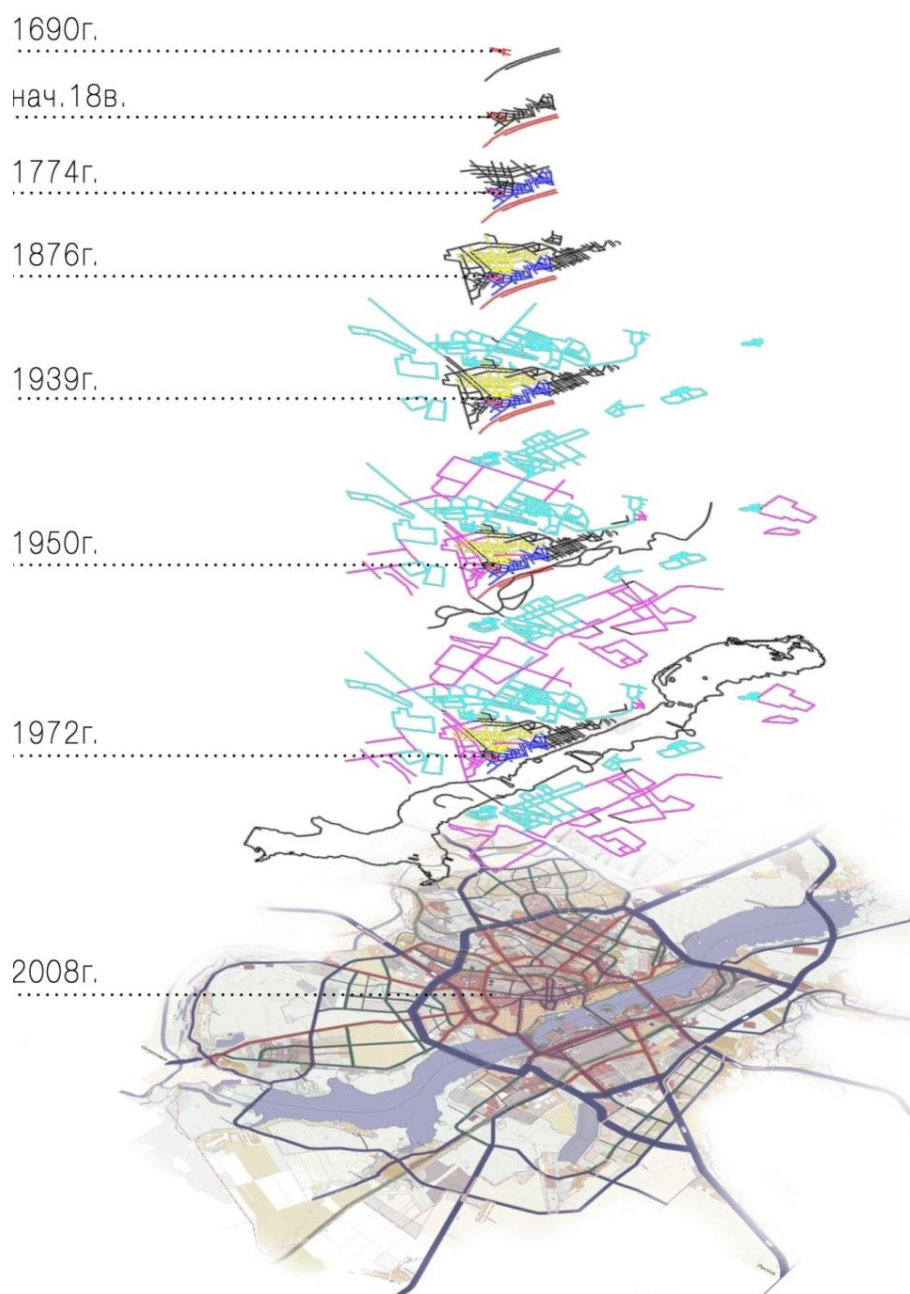


Рисунок 6 - Ретроспективный анализ развития планировочного каркаса г. Воронежа

- совершенствование транспортного каркаса, на основе сложившихся связей и с учетом возможности развития города в юго-восточном направлении;
- разработка схемы монорельсового транспорта на основе сложившегося транспортного каркаса;
- создание скоростной магистрали над железной дорогой;
- создание магистрали в структуре рекреационного комплекса «Водохранилище»;
- создание «парковых путей» по направлению к водохранилищу, которые являются связующим звеном селитебной застройки и главной рекреационной зоной г.Воронежа;
- формирование системы транспортно-градостроительных многокомпонентных узлов с учетом их композиционного, структурного и функционального влияния.

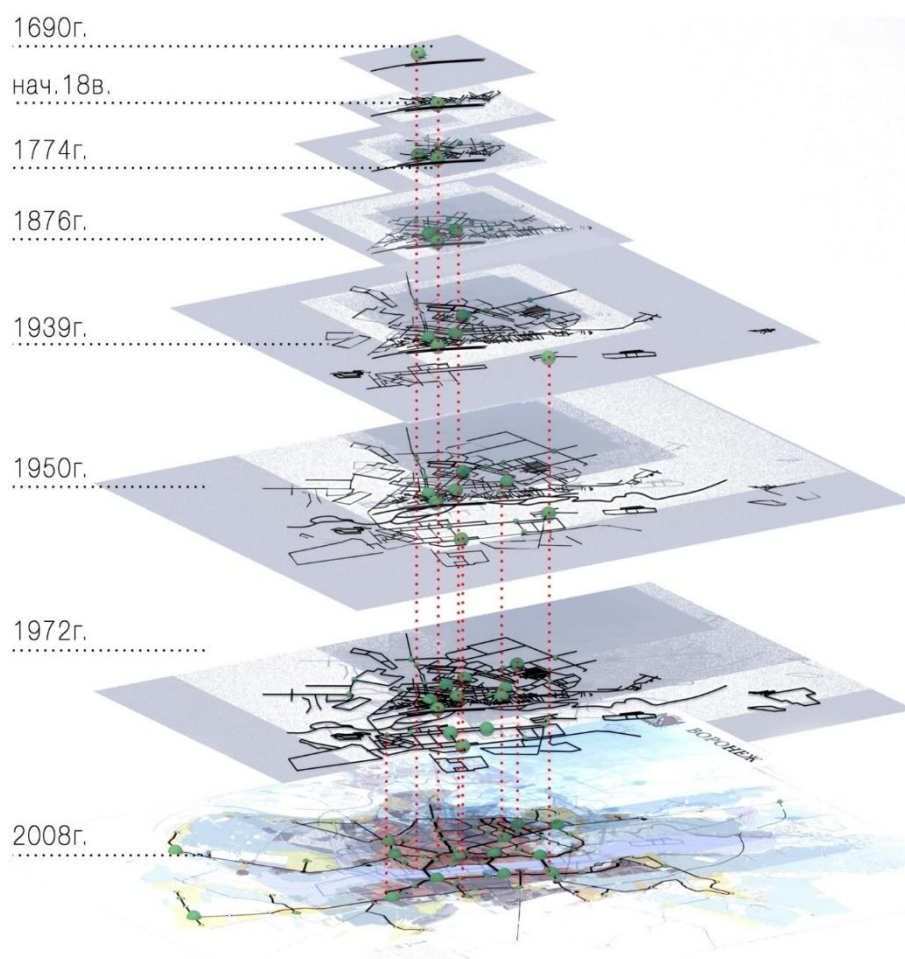


Рисунок 7 - Ретроспективный анализ формирования узловых центров в г. Воронеже

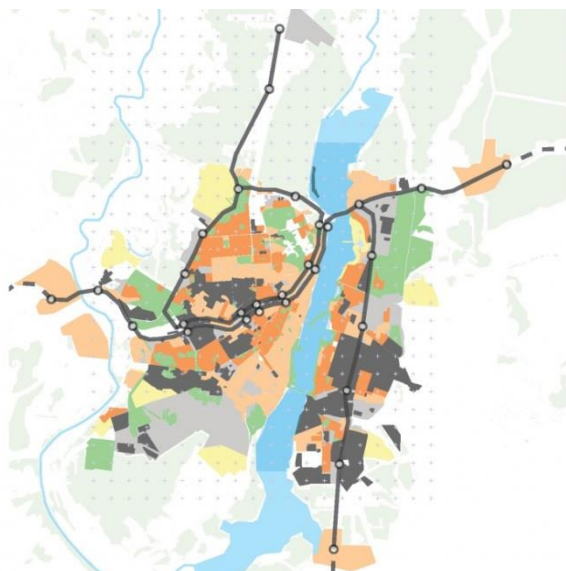


Рисунок 8 - Существующая плотность населения

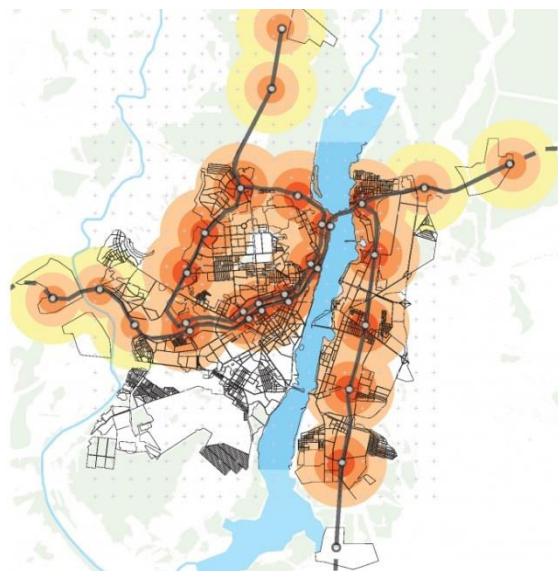


Рисунок 9 - Радиусы доступности до ТПУ и их плотность

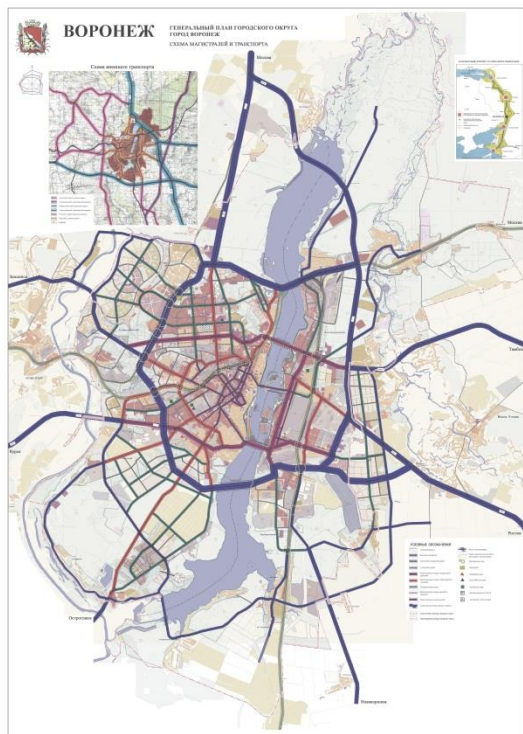


Рисунок 10 - Схема магистралей и транспорта на генеральном плане г. Воронежа от 2008г.

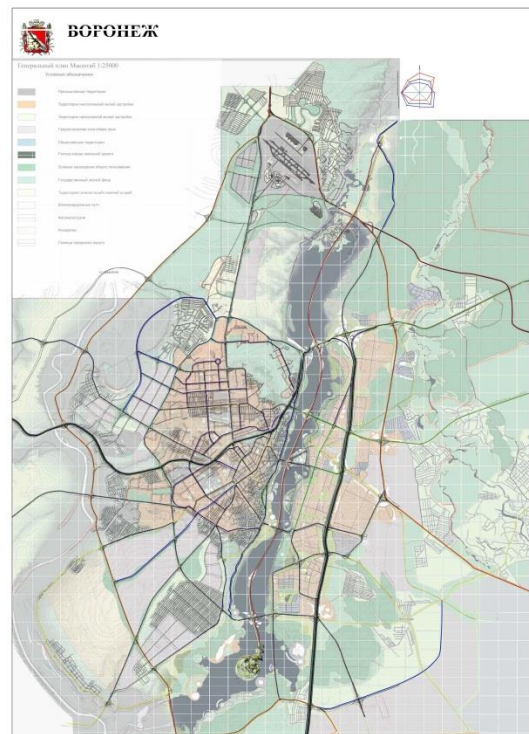


Рисунок 11 - Схема магистралей и транспорта в предложении генерального плана г. Воронежа до 2045г.

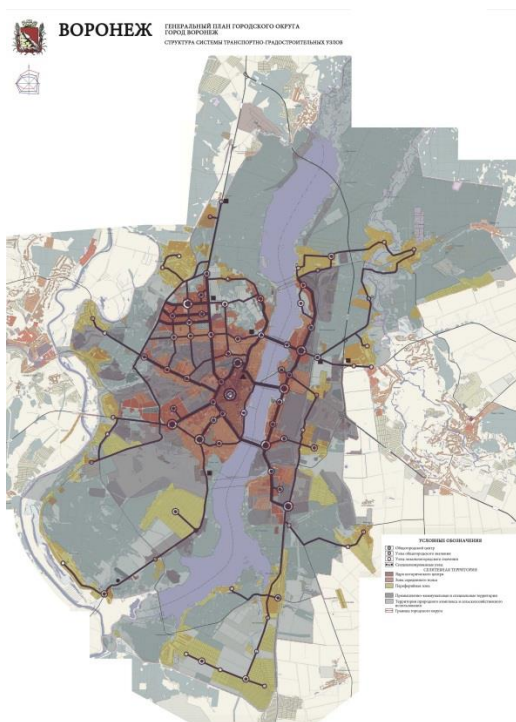


Рисунок 12 - Структура системы ТГУ на генеральном плане г. Воронежа от 2008г.

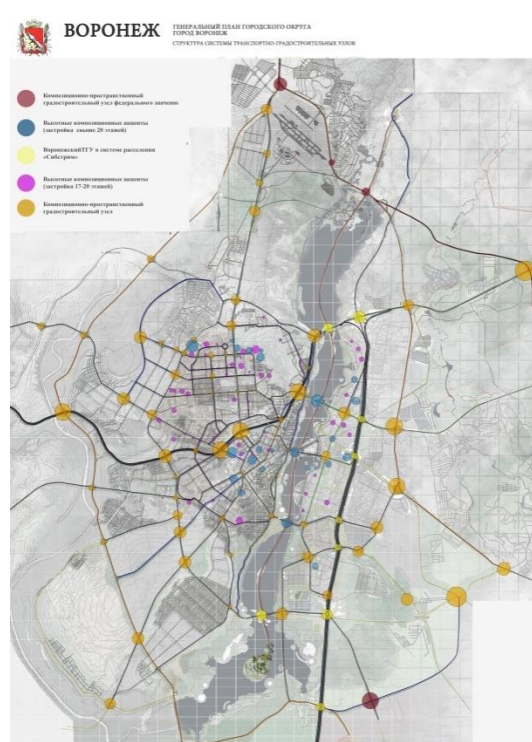


Рисунок 13 - Структура системы ТГУ в предложении генерального плана г. Воронежа до 2045г.

На рис. 10 - 13 в соответствии с материалами решения Воронежской городской Думы от 19.12.2008 № 422-II [13] представлено сравнение улично-дорожной сети и системы градостроительных узлов нового проектного предложения с существующим положением.

Темпы и развитие композиционно-планировочного, структурно-функционального каркаса города должны определяться необходимостью сохранения его целостности, как сложной многоуровневой системы т.е., направлением и темпами, формами и принципами всей его структуры. Поэтапно анализируя исторические схемы городов и выявляя проблемы в формировании пространства разных иерархических уровней, возможно создание нового проектного предложения, удовлетворяющего запросам современного общества и ближайшей перспективе развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Енин А.Е. Понятие эксперимента в архитектуре как деятельности, направленной на гармонизацию взаимосвязи и взаимовлияния населения и среды его жизнедеятельности // Градостроительство. 2012. № 4. С. 22-29.
2. Лаврик Г.И. Методологические основы исследования архитектурных систем [Текст]: дис...д-ра архитектуры: 18.00.01: утв. 20.02.81 / Лаврик Геннадий Иванович. – К., 1979. – 251 с.
3. Советский энциклопедический словарь. – 4 изд. – М.: Сов. энциклопедия, 1989.
4. Математика и кибернетика в экономике. М.: «Экономика», 1972. С. 96
5. Штофф В.А. Моделирование и философия. М.-Л.: «Наука», 1966. С.25
6. Веретенников Б.Д. Понятие планировочной структуры города. Структурные компоненты и их планировочное воплощение // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. №3 (16). С.6-10.
7. Учеб. пособие для архит. и строит. спец. вузов / Под общ. ред. Н.Н. Миловидова, Б.Я. Орловского, А.Н. Белкина. М.: Высш. шк., 1988. 104 с.
8. Кострикин Н.Д. Искусство городского плана // Архитектура СССР, 1984, №3.
9. Шевелёв В.П., Ступак Е.Ю. Время как основополагающий фактор развития городского пространства // Архитектурные исследования. 2017. № 4 (12). С. 58-62
10. Планировка и застройка городов / В. В. Бабуров, П. И. Гольденберг и др.; Академия архитектуры СССР, Институт градостроительства. Москва: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1956. 346 с.
11. Алексашина В.В. Градостроительный аспект реорганизации производственных территорий мегаполиса на примере Москвы // ACADEMIA. Архитектура и строительство. 2010. №1. С. 54-62.
12. Анатомия города Воронеж // Яузaproект. – URL: <http://jauzaproject.com/projects/voronez> (дата обращения 12.08.2015).
13. Воронежская городская Дума. Решение от 19 декабря 2008 года N 422-II Об утверждении Генерального плана городского округа город Воронеж (с изменениями на 6 декабря 2017 года).
14. Шевелёв В.Г., Енин А.Е. Особенности формирования коммуникационных процессов, определяемых функциональной деятельностью населения в градостроительных системах (аспект транспортно-пассажирских связей) // Градостроительство. 2014. № 2 (30). С. 43-48.
15. Енин А.Е., Бокарева Е.А. Ретроспективный анализ планировочной структуры дорегулярных и регулярных планов исторических городов Черноземья (на примере Воронежской области) // Градостроительство. №2(24). 2013. С. 60-66.
16. Енин А.Е., Ливенцева А.В. Обоснование эффективности применения системных принципов в формировании многофункциональных коммуникационных узлов городской среды // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2(30). С. 114-121.
17. Енин А.Е. Научный эксперимент в градостроительстве – предпроектный этап воспроизведения объекта познания // Архитектурное интерпространство XXI века: опыт, проблемы, перспективы: материалы междунар. Науч.-метод. конф. (25-26 сентября 2013 г.). СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2013. С. 41-44
18. Енин А.Е. Системный анализ и экспериментальная проверка принимаемых градостроительных решений // Глобальный научный потенциал. 2011. № 9. С. 36-40
19. Yenin A., Liventceva A. System Approach in Urban Planning. History. General Foundations. Objects of System Researches // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2017. Pp: 91-101.

Енин Александр Егорович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,
Кандидат архитектуры, профессор, зав. кафедрой основ проектирования и архитектурной графики,
E-mail: a_yenin@mail.ru

Шевелёв Владимир Петрович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,
Доцент, кафедры основ проектирования и архитектурной графики,
E-mail: af@vgasu.vrn.ru

Ступак Елизавета Юрьевна

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,
Магистрант кафедры основ проектирования и архитектурной графики,
E-mail: tangerrinne@gmail.com

ENIN A.YE., SHEVELOV V.P., STUPAK E. YU.

**RETROSPECTIVE SYSTEM EXPERIMENT WITH ARCHITECTURAL
AND URBAN STUDIES OF ECOLOGICAL SYSTEMS “POPULATION ↔
ENVIRONMENT” (FOR EXAMPLE, VORONEZH)**

The purpose of this work is to study the formation of the structural-functional planning and compositional structures of cities under the influence of internal and external factors. Interconnected decision composite problems with General problems of development and territorial growth of the city remains the basis for a coherent structural and functional urban formation Wednesday for creating comfortable Wednesday of vital functions modern society. In this paper, based on the example of Voronezh forming planning structure of the metropolis, and the urban problems have been identified in the course of the historical development of the city. On the basis of the results, a concept of a new project of spatial development of the city.

The pace and development of compositional design, structural-functional frame of the city should be guided by the need to preserve its integrity as a complex multilevel system, i.e., the direction and pace forms and principles of his structure. Gradually analyzing historical urban schemes and identifying problems in the formation of the space of different hierarchical levels, it is possible to create a new project proposal that meets the needs of modern society and the short term development.

Keywords: Voronezh, retrospective experiment planning structure, composite frame, road network, master plan, historical development, composition

REFERENCES

1. Yenin A.Ye. Ponyatiye eksperimenta v arkhitekture kak deyatel'nosti, napravlennoy na garmonizatsiyu vzaimosvyazi i vzaimovliyaniya naseleniya i sredy yego zhiznedeyatel'nosti [The concept of experiment in architecture as activities aimed at harmonizing the relationship and interaction of the population and its vital functions]. *Gradostroitel'stvo*. 2012. No 4. Pp: 22-29. (rus)
2. Lavrik G.I. Metodologicheskiye osnovy issledovaniya arkhitekturnykh sistem [Methodological bases for the research of architectural systems]: Dis. ... Dr. architecture: 18.00.01 p.10. 20.02.81/ Lavrik Gennadiy Ivanovich. - Kiev, 1979. 251 p. (rus)
3. Soviet encyclopedic dictionary. 4th ed. Moscow: Sov. Encyclopedia, 1989. (rus)
4. Matematika i kibernetika v ekonomike [Mathematics and cybernetics in economics]. Moscow: "Ekonomika", 1972. Pp: 96. (rus)
5. Shtoff V.A. Modelirovaniye i filosofiya [Modeling and philosophy]. Moscow – Leningrad: "Nauka", 1966. Pp: 25. (rus)

6. Veretennikov B.D. Ponyatiye planirovochnoy struktury goroda. Strukturnyye komponenty i ikh planirovochnoye voploshcheniye [The concept of the planning structure of the city. Structural components and their planning embodiment]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2014. №3 (16). Pp: 6-10. (rus)
7. Ucheb. posobiye dlya arkhitek. i stroit. spets. vuzov [Textbook for architects and civil engineers] / Under the general. Ed. By N.N. Milovidova, B.Ya. Orlovsky, A.N. Belkin. Moscow: Vyschaya Shkola, 1988. 104 p.
8. Kostrikin N.D. Iskustvo gorodskogo plana [The art of the urban plan]. *Arkhitectura SSSR*. 1984. No 3.
9. Shevelov V.P., Stupak Ye.YU. Vremya kak osnovopolagayushchiy faktor razvitiya gorodskogo prostranstva [Time as a fundamental factor in the development of urban space] *Arkhitekturnyye issledovaniya*. 2017. No. 4 (12). Pp: 58-62. (rus)
10. Baburov V. V., Gol'denberg P. I. and etc. Planirovka i zastroyka gorodov [Planning and development of cities]. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture, 1956. 346 p.
11. Alexashina V.V. Gradostroitel'nyy aspekt reorganizatsii proizvodstvennyy territoriy megapolisa na primere Moskvy [Town-planning aspect of the reorganization of the industrial area of the megalopolis on the example of Moscow]. *Academia. Architecture and construction*. 2010. Iss. 1. Pp: 54-62. (rus)
12. Anatomy of the city of Voronezh. Yauzaproject. - URL: <http://jauzaproject.com/projects/voronezh> (available on 12.08.2015).
13. Voronezh City Duma. Decision of December 19, 2008 N 422-II Ob utverzhdenii General'nogo plana gorodskogo okruga gorod Voronezh [On the approval of the General Plan of the Urban District of the city of Voronezh] (as amended on December 6, 2017).
14. Shevelov V.G., Yenin A.Ye. Osobennosti formirovaniya kommunikatsionnykh protsessov, opredelyayemykh funktsional'noy deyatel'nost'yu naseleniya v gradostroitel'nykh sistemakh (aspekt transportno-passazhirskikh svyazey) [Peculiarities of communication processes defined by the functional activity of the population in urban systems (aspect of transport-passenger links)]. *Gradostroitel'stvo*. 2014. No 2 (30). Pp: 43-48.
15. Yenin A.Ye., Bokareva Ye.A. Retrospektivnyy analiz planirovochnoy struktury doregulyarnykh i regulyarnykh planov istoricheskikh gorodov Chernozem'ya (na primere Voronezhskoy oblasti) [Retrospective planning structure doregulatory and regular plans of historic cities of black soil (on the example of the Voronezh region)]. *Gradostroitel'stvo*. No 2(24). 2013. Pp: 60-66. (rus)
16. Yenin A.Ye., Liventseva A.V. Obosnovaniye effektivnosti primeneniya sistemnykh printsipov v formirovaniy mnogofunktsional'nykh kommunikatsionnykh uzlov gorodskoy sredy [The efficiency of the use Rationale systemic principles in forming a multifunctional communication nodes City Wednesday]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. No 2(30). Pp: 114-121. (rus)
17. Yenin A.Ye. Nauchnyy eksperiment v gradostroitel'stve – predproyektnyy etap vosproizvedeniya ob'yekta poznaniya [Scientific experiment in urban planning-preproject stage play the object of cognition]. *Arkhitekturnoye interprostranstvo XXI veka: opyt, problemy, perspektivy: materialy mezhdunar. Nauch.-metod. konf. (25-26 sentyabrya 2013 g.)* [Architectural interprostranstvo of the twenty-first century: experience, problems and prospects: the materials of the intern. Researcher-method. CONF. (25-26 September, 2013.)]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGASU, 2013. Pp: 41-44.
18. Yenin A.Ye. Sistemnyy analiz i eksperimental'naya proverka prinyimayemykh gradostroitel'nykh resheniy [System analysis and experimental validation of urban decisions]. *Global'nyy nauchnyy potentsial*. 2011.No 9. Pp: 36-40. (rus)
19. Yenin A., Liventseva A. System Approach in Urban Planning. History. General Foundations. Objects of System Researches. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017. Pp: 91-101.

Enin Alexander E.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
candidate of architecture, Professor, head of Chair of fundamentals of design and architectural graphics,
E-mail: a_yenin@mail.ru

Shevelov Vladimir P.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
Associate Professor of the Chair of foundations of design and architectural graphics,
E-mail: af@vgasu.vrn.ru

Stupak Elizaveta Yu.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
Undergraduate Chair bases design and architectural graphics,
E-mail: tangerrinne@gmail.com

УДК 534.2

АНТОНОВ А.И., ЛЕДЕНЕВ В.И., ГУСЕВ В.П.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ИЗМЕРЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУХОВОДОВ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА FLEX-ST

Практика проектирования звукоизолирующих облицовок воздуховодов показывает, что в ряде случаев фактическая звукоизоляция воздуховодов из пористых материалов, и в частности из материала Flex-ST, может отличаться от расчетных величин. В статье приведены результаты сравнительного анализа измеренных и рассчитанных значений дополнительной звукоизоляции воздуховодов за счет устройства облицовки из пористого звукоизолирующего материала Flex-ST. Сравнение экспериментальных и теоретических исследований акустической эффективности облицовок воздуховода из звукоизолирующего пористого материала показало хорошее совпадение измеренных и расчетных данных при определении звукоизоляции в области высоких частот. В этой области частот облицовка воздуховодов пористым материалом типа Flex-ST снижает акустическую мощность излучения шума воздуховодом на 25 дБ и более. На низких частотах проявляются явления интерференции звуковых волн. В результате этого наблюдаются местные провалы или повышения звукоизоляции. Основываясь на полученных результатах, даны предложения по практическому расчету звукоизоляции воздуховодов при их облицовке пористыми материалами.

Ключевые слова: воздуховод, звукоизолирующая облицовка воздуховода, расчет шума, звукоизоляция, материал Flex-ST.

Шум, распространяющийся по крупногабаритным вентиляционным каналам, проникает через их ограждения и негативно воздействует на окружающую их среду. Для защиты от него необходимо проектирование стенок каналов как звукоизолирующих конструкций, исходя из уровней шума, возникающего внутри каналов, и требований к шумовому режиму в окружающей их среде [1,2,3].

В настоящее время промышленность выпускает большое количество звукоизолирующих материалов с пористой структурой. Их широко используют для устройства звукоизолирующих облицовок воздуховодов [4,5]. При проектировании облицовок из таких материалов необходимо выполнять расчеты дополнительной звукоизоляции воздуховодов, учитывая их особенности. В частности, диаметр пор в таких материалах мал и поры распределены по материалу равномерно, поэтому их можно рассматривать как однородную среду с равномерно распределенными характеристиками. При расчетах следует учитывать, что в пористых материалах, как правило, происходит значительное внутреннее затухание звуковых волн.

В статье приведены результаты сравнения измеренных и рассчитанных значений дополнительной звукоизоляции воздуховодов при устройстве на них облицовок из пористого звукоизолирующего материала Flex-ST, даны предложения по практическому расчету дополнительной звукоизоляции воздуховодов при облицовках из таких материалов.

Акустические характеристики материала Flex-ST. Материал Flex-ST относится к материалам с податливым скелетом [6], у которых свойства полностью определяются комплексными характеристиками – постоянной распространения γ и импедансом поверхности Z . Акустические параметры материала Flex-ST представлены в табл. 1.

Действительная часть постоянной распространения γ' определяет степень затухания амплитуд звукового давления и колебательной скорости, то есть поглощающие свойства мате-

риала, мнимая часть γ'' является фазовой характеристикой, показывающей с какой частотой и скоростью происходит распространение колебаний.

Вследствие малой толщины образцов материала экспериментальное определение скорости звука в материале и волнового сопротивления затруднительно. В этой связи скорость звука и волновое сопротивление материала определялись на основе значений постоянной распространения. Скорость звука в материале вычислялась по выражению

$$c_i = \frac{2\pi f_i}{\text{Im}(\gamma_i)}, \quad (1)$$

Таблица 1 – Акустические параметры материала Flex-ST

Частота, Гц	Постоянная распространения, γ		Импеданс поверхности, Z^*	
	Действительная часть γ'	Мнимая часть γ''	Действительная часть Z'	Мнимая часть Z''
125	0.015	0.058	6.63	0.62
250	0.036	0.12	6.49	0.78
500	0.06	0.22	5.16	0.21
1000	0.15	0.4	5.85	-2.5
2000	0.335	0.78	4.0	-2.28

Примечание: * индекс приведен в долях волнового сопротивления воздуха
 $Z_0 = 428 \text{ кг/м}^2\text{°C}$

Значения скорости звука c , длины волны λ и волнового сопротивления ρc материала Flex-ST для различных диапазонов частот f_i приведены в табл. 2.

Экспериментальные данные. В табл. 3 и на рис. 1 приведены экспериментально определенные в лаборатории НИИСФа [7] величины дополнительной звукоизоляции круглого воздуховода диаметром 400 мм за счет устройства на нем облицовки из материала Flex-ST толщиной 2.5; 5.0; 7.5; 10.0 см в октавных полосах частот с $f_{cp}=125, 250, 500, 1000, 2000$ Гц.

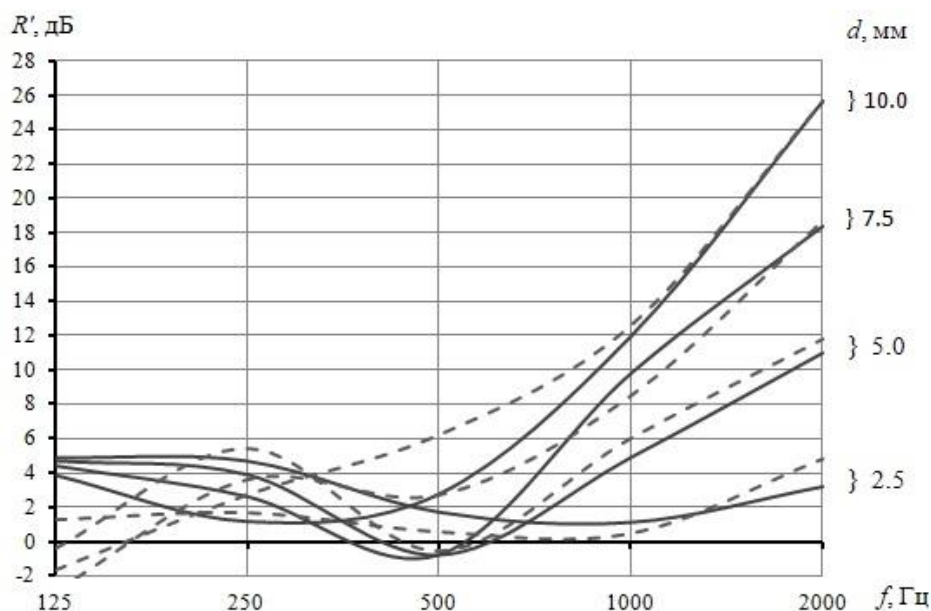


Рисунок 1 - Уровни звукоизоляции облицовки: - - - - измеренные; — - - рассчитанные методом прослеживания волн

Таблица 2 – Скорость звука, длина волны и волновое сопротивление материала Flex-ST

f_i , Гц	$\text{Im}(\gamma_i)$, см ⁻¹	c_i , м/с	λ , м	$\rho_1 c_1$, кг/м ² с	$\rho_1 c_1 / \rho_0 c_0$
125	0.058	135	1.08	6075	14.1
250	0.12	131	0.52	5895	13.7
500	0.22	143	0.286	6435	15.0
1000	0.4	157	0.157	7065	16.4
2000	0.78	161	0.08	7245	16.8

Таблица 3 – Измеренная звукоизоляция облицовок Flex-ST

Частота, Гц	Звукоизоляция, дБ, при толщинах облицовок, см			
	2.5	5.0	7.5	10
125	1.3	-0.45	-2.9	-1.7
250	1.7	5.4	3.6	2.7
500	0.6	-0.6	2.7	6.2
1000	0.5	6	8.5	12.6
2000	4.8	11.8	18.7	25.7

Экспериментальные данные показывают рост звукоизоляции облицовки с увеличением частоты звука и ее толщины. В табл. 3 отмечен диапазон соотношений толщины облицовки и частоты звука, при которых звукоизоляция воздуховода достигает значительных величин и определяется в основном процессом затухания волн в материале облицовки. На низких частотах и при небольшой толщине облицовки наблюдаются локальные повышения (до 5 дБ) и провалы (до -2.9 дБ) звукоизоляции. Нестабильность значений звукоизоляции связана с интерференционными явлениями

Расчетные данные. Расчет дополнительной звукоизоляции воздуховодов можно выполнять аналитическими методами, предложенными в 20-м веке в работах [8-10]. Однако они имеют высокую трудоемкость, а в ряде случаев и недостаточную точность. Поэтому использован прямой численный метод расчета звукового поля в облицовке воздуховодов. Для реализации метода разработана компьютерная программа. Методика численного расчета параметров звукового поля основана на прослеживании звуковых волн при их распространении и затухании в толще звукоизолирующего материала, отражении и проницании волн на границах сред. Сложение звуковых волн производится с учетом фазовых различий. Результаты расчета звукоизоляции облицовки даны в табл. 4 и на рис. 1.

Таблица 4 - Расчетные значения звукоизоляции облицовки воздуховода и их отклонения от экспериментальных данных

Частота звука, Гц	Расчетные значения звукоизоляции, дБ / расхождение между расчетными и экспериментальными значениями звукоизоляции воздуховода, дБ				$\overline{\Delta L}$, дБ
	2.5	5.0	7.5	10.0	
125	4.9/3.6	4.7/5.1	4.4/7.3	3.9/5.6	5.5
250	4.7/3.0	3.9/1.5	2.6/-1.0	1.2/-1.5	1.9
500	1.7/1.1	-0.8/-0.2	-0.8/-3.5	2.8/-3.4	2.5
1000	1.1/0.6	4.9/-1.1	9.8/1.3	12/-0.6	0.9
2000	3.2/-1.6	11.0/-0.8	18.4/-0.3	25.7/0	0.9
$\overline{\Delta L}$, дБ	2.3	2.5	3.7	3.0	2.9

Сравнение экспериментальных и расчетных значений звукоизоляции. Для оценки расхождений выполнялась их статистическая обработка и вычислялась величина среднеквадратичного отклонения $\overline{\Delta L}$.

Сравнительный анализ показал, что в целом результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными. В большинстве случаев расхождения между ними не превышают 2 дБ. В тоже время наблюдаются принципиальные расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями звукоизоляции в октавной полосе с $f_{cp}=125$ Гц. Измерения показали, что в этой полосе отсутствует дополнительная звукоизоляция, а по результатам расчетов звукоизоляция может достигать 5 дБ. Причиной расхождения, по нашему мнению, является неучет при расчетах отсутствия эффекта отражения звуковых волн на границе контакта материала облицовки с воздухом. В реальности колебания воздуховода с облицовкой при длине волны более 1 м в полосе частот с $f_{cp}=125$ Гц как бы «не замечают» звукоизолирующий материал. В целом среднеквадратичное расхождение между расчетными и экспериментальными данными при исключении результатов для октавной частотной полосы $f_{cp}=125$ Гц составляет 1.7 дБ.

В процессе экспериментов и расчетов установлено, что в отдельных полосах частот при устройстве облицовки наблюдается снижение звукоизоляции по сравнению с необлицованным воздуховодом. Возможной причиной повышения мощности излучения облицованного воздуховода по сравнению с необлицованным может быть изменение соотношения импедансов на границе облицовки и воздуха. Например, граница раздела необлицованного воздуховода «сталь - воздух» имеет звукоизоляцию 43.8 дБ [11]. При облицовке более «акустически мягким материалом» разность между импедансами материала и воздуха, уменьшается и, соответственно, происходит снижение звукоизоляции на границе сред. По этой причине при низких поглощающих свойствах материала может происходить и общее снижение звукоизоляции воздуховода по сравнению с его звукоизоляцией без облицовки. Для выявления и исключения этого негативного эффекта необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Ранее установлено, что в материале большой толщины, обладающем значительным затуханием звуковых волн ($\gamma'd > 2$, где d – толщина материала), отражающие и звукопоглощающие характеристики в наибольшей мере определяются параметрами первой отраженной волны [12]. В этом случае звукоизолирующие свойства облицовки можно рассчитать приближенным методом по первой проходящей в ней звуковой волне.

Величина амплитуды звукового давления первой волны, проходящей через многослойную облицовку, рассчитывается по выражению

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{ex}} \prod_{i=1}^K \left(\tau_{i,i+1} \right) \cdot \exp \left(\sum_{i=1}^K (-\gamma'_i d_i) \right), \quad (2)$$

где P_{ex} – амплитуда звуковой волны в облицовке в зоне ее контакта с воздуховодом; $\gamma'_i = \text{Re}(\gamma_i)$ – действительная часть постоянной распространения; d_i – толщина слоя; K – количество слоев облицовки; $\tau_{i,i+1}$ – коэффициент проницания границы i и $i+1$ слоев.

При $i = K$ следует принять $\tau_{i,i+1} = \tau_{K,0}$, где $\tau_{K,0}$ – коэффициент проницания звукового давления на границе крайнего K слоя с внешней средой (воздухом). Звукоизоляция облицовки, определяемая по первой проникающей волне, рассчитывается по выражению

$$R = 10 \lg \left(\frac{\rho_o c_o}{\rho_1 c_1} \left(\frac{P_{\text{BX}}}{P_{\text{ВЫХ}}} \right)^2 \right) = 8,69 \sum_{i=1}^K \gamma'_i \alpha_i - \sum_{i=1}^K 20 \lg \frac{2Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} + 10 \lg \left(\frac{\rho_o c_o}{\rho_1 c_1} \right), \quad (3)$$

где $\rho_o c_o = 428 \text{ кг/м}^2\text{с}$ – волновое сопротивление воздуха; $\rho_1 c_1$ – волновое сопротивление материала наружного слоя облицовки; $Z_{i+1} = Z_o$ при $i = K$; Z_o – импеданс граничащей среды.

В нашем случае облицовка однослойная и выражение (3) примет вид

$$R = 8.69 \operatorname{Re}(\gamma) d - 20 \lg \left| \frac{2}{Z+1} \right| + 10 \lg \left(\frac{\rho c}{\rho_0 c_0} \right). \quad (4)$$

В табл. 5 и на графиках рис. 2 приведены рассчитанные значения звукоизоляции облицовки по величине первой проникающей через облицовку волны и их сравнение с экспериментальными данными.

Видно (см. табл. 5 и рис. 2), что в большинстве случаев расхождение измеренных и рассчитанных по первой проникающей волне уровней звукоизоляции облицовок не превышает 2 дБ. Среднеквадратичное расхождение $\overline{\Delta L}$ по всем экспериментальным данным составляет 1.8 дБ, а в случае исключения результатов октавной полосы со среднегеометрической частотой $f_{cp}=125$ Гц равно 1.5 дБ.

Таблица 5 – Рассчитанные значения звукоизоляции облицовки воздуховода по первой проникающей волне

Частота звука, Гц	Звукоизоляция облицовки *, дБ, при толщине облицовки, см				$\overline{\Delta L}$, дБ
	2.5	5.0	7.5	10.0	
125	0.54/-0.8	0.87/ 1.3	1.19/4.1	1.52/3.2	2.7
250	0.94/-0.8	1.72/-3.7	2.5/-1.1	3.29/0.6	2.0
500	-0.67/-1.3	0.61/1.2	1.92/-0.8	3.22/-3.0	1.8
1000	2.3/+1.8	5.58/-0.4	8.84/0.3	12.1/-0.5	1.0
2000	3.8/-1.0	11.0/-0.8	18.3/-0.4	25.6/-0.1	0.7
$\overline{\Delta L}$, дБ	1.2	1.9	1.9	2.0	1.8
Примечание: * в знаменателе дроби указаны расхождения между рассчитанной и измеренной звукоизоляцией.					

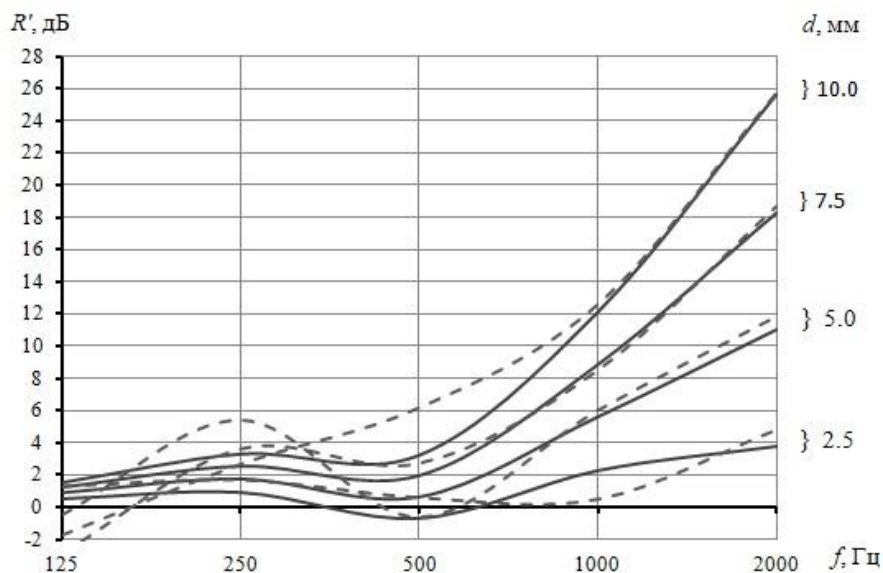


Рисунок 2 - Уровни звукоизоляции облицовки:

----- - измеренные;
 — - рассчитанные по первой проникающей волне

Сравнение результатов табл. 4 и 5 также показывает, что расчет звукоизоляции облицовки только по первой проникающей волне обеспечивает хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Занижение звукоизоляции в полосе частот с $f_{cp}=125$ Гц (см. табл. 5) в большей степени соответствует условиям образования звукового поля в облицовке. В ок-

тавных полосах со среднегеометрическими частотами 1000 и 2000 Гц результаты расчетов по различным методикам почти полностью совпадают (см. рис. 2).

Выводы

Сравнение экспериментальных и теоретических исследований акустической эффективности облицовок воздуховода из звукоизолирующего пористого материала показало хорошее совпадение измеренных и расчетных данных при определении звукоизоляции в области высоких частот. В этой области частот облицовка воздуховодов пористым материалом типа Flex-ST снижает акустическую мощность излучения шума воздуховодом на 25 дБ и более. На низких частотах проявляются явления интерференции звуковых волн. В результате этого наблюдаются местные провалы или повышения звукоизоляции. Расхождения между расчетом и экспериментом достигают 7 дБ. Измерения показали, что в октавной полосе со среднегеометрической частотой $f_{cp}=125$ Гц облицовка воздуховодов пористым материалом не приводит к повышению звукоизоляции воздуховода, а в ряде случаев и снижает ее.

Расчет звукоизоляции пористых облицовок возможно выполнять только с учетом первой, проникающей через облицовку звуковой волны. Точность расчета в этом случае сопоставима с точностью более сложных расчетных методов, в которых учитывается отражение и наложение большого количества звуковых волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.П., Сидорина А.В., Антонов А.И., Леденев В.И. Проектирование звукоизоляции крупногабаритных вентиляционных каналов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2 (368). С. 254-260.
2. Жоголева О.А., Леденёв В.И., Фёдорова О.О. Расчет требуемой звукоизоляции стенок газоздушных каналов систем вентиляции зданий // В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт Материалы 2-й международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета. 2015. С. 45-50.
3. Антонов А.И., Леденев В.И., Гусев В.П. Оценка погрешностей при определении звуковой мощности, излучаемой воздуховодами со звукоизолирующими облицовками // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 6 (1006). С. 22-24.
4. Гусев В.П., Сидорина А.В. Акустические характеристики покрытий на воздуховоды и технологические трубы // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 35-38.
5. Гусев В.П., Сидорина А.В. Изоляция шума воздуховодов систем вентиляции покрытиями с использованием эластомерных и волокнистых материалов // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 37-40.
6. Осипов Г.Л., Бобылев В.Н., Борисов Л.А. и др. Звукоизоляция и звукопоглощение. М.: ООО «Издательство АСТ», ООО «Издательство Астрель», 2004. 450с.
7. Гусев В.П., Сидорина А.В. Акустические исследования звукоизолирующих покрытий на трубопроводы воздушных и газовых систем // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 59-62.
8. Бреховский Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 502 с.
9. Crook A.W. The reflection and transmission of light by any system of parallel isotropic tiems // J. Opt. Soc. Am. 1948. Vol. 38 № 11. Pp: 954
10. Тартаковский Б.Д. Критерии распространения плоских волн через однородные слои. ДАН СССР, 1950. 465 с.
11. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Л.: Судостроение. 1986. 368 с.
12. Осипов Г.Л., Юдин Е. Я., Хюбнер Г. Снижение шума в зданиях и жилых районах. М.: Стройиздат, 1987. 558 с.

Антонов Александр Иванович

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", г. Тамбов, Россия,
Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Архитектура и строительство зданий»,
E-mail: ais@nnn.tstu.ru

Леденев Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Гусев Владимир Петрович

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физика Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,

Доктор технических наук, главный научный сотрудник, зав. лабораторией «Защита от шума вентиляционного и инженерно-технологического оборудования»,

E-mail: wpgusev@yandex.ru

ANTONOV A.I., LEDENEV V.I., GUSEV V.P.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATED AND MEASURED
VALUES OF ADDITIONAL SOUND INSULATION OF DANGERS
FROM POROUS MATERIAL
FLEX-ST**

The practice of designing sound-insulating liners of air ducts shows that in some cases the actual sound insulation of air ducts made of porous materials, and in particular of Flex-ST material, may differ from the calculated values. The article presents the results of a comparative analysis of the measured and calculated values of additional soundproofing of air ducts due to the installation of the cladding from the porous sound-insulating material Flex-ST. Comparison of experimental and theoretical studies of the acoustic efficiency of airway linings from sound-insulating porous material showed good agreement between the measured and calculated data in determining the sound insulation in the high-frequency region. In this frequency range, airtight lining with a porous material of the Flex-ST type reduces the acoustic power of noise emission from the duct by 25 dB or more. At low frequencies, phenomena of interference of sound waves are manifested. As a result, local dips or increased sound insulation are observed. Based on the results obtained, suggestions are given on the practical calculation of sound insulation of air ducts when they are faced with porous materials.

Keywords: air duct, soundproofing air duct lining, noise calculation, soundproofing, Flex-ST material.

REFERENCES

1. Gusev V.P., Sidorina A.V., Antonov A.I., Ledenev V.I. *Proyektirovaniye zvukoizolyatsii krupnogabaritnykh ventilyatsionnykh kanalov* [Designing of sound insulation of large-sized ventilation ducts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2017. No 2 (368). Pp: 254-260. (rus)
2. Zhogoleva O.A., Ledenov V.I., Fodorova O.O. *Raschet trebuyemoy zvukoizolyatsii stenok gazovozdushnykh kanalov sistem ventilyatsii zdaniy* [Calculation of the required sound insulation of the walls of gas-air channels of building ventilation systems]. *Ustoychivoye razvitiye regiona: arkhitektura, stroitel'stvo, transport* *Materialy 2-y mezhdu-narodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii instituta arkhitektury, stroitel'stva i transporta Tambovskogo gosudarstven-nogo tekhnicheskogo universiteta* [Sustainable development of the region: architecture, construction, transport. Materials of the 2nd international scientific and practical conference of the Institute of Architecture, Construction and Transport of the Tambov State Technical University]. 2015. Pp: 45-50. (rus)
3. Antonov A.I., Ledenev V.I., Gusev V.P. *Otsenka pogreshnostey pri opredelenii zvukovoy moshchnosti, izluchayemoy vozdukhovodami so zvukoizoliruyushchimi oblitsovkami* [Estimation of errors in determining the sound power emitted by air ducts with soundproofing lining]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2018. No 6 (1006). Pp: 22-24. (rus)
4. Gusev V.P., Sidorina A.V. *Akusticheskiye kharakteristiki pokrytiy na vozdukhovody i tekhnologicheskiye trubyy* [Acoustic characteristics of coatings on air ducts and process pipes]. *Stroitel'nyye materialy*. 2015. No 6. Pp: 35-38. (rus)
5. Gusev V.P., Sidorina A.V. *Izolyatsiya shuma vozdukhovodov sistem ventilyatsii pokrytiyami s ispol'zovaniyem elastomernykh i voloknistykh materialov* [Insulation of air duct noise of ventilation systems with coatings using elastomeric and fibrous materials]. *Stroitel'nyye materialy*. 2013. No 6. Pp: 37-40. (rus)
6. Osipov G.L., Bobylev V.N., Borisov L.A. and etc. *Zvukoizolyatsiya i zvukopogloshcheniye* [Soundproofing and sound absorption]. Moscow: ООО «Izdatel'stvo AST», ООО «Izdatel'stvo Astrel», 2004. 450 p. (rus)
7. Gusev V.P., Sidorina A.V. *Akusticheskiye issledovaniya zvukoizoliruyushchikh pokrytiy na truboprovody*

vozdushnykh i gazovykh sistem [Acoustic research of soundproof coatings on pipelines of air and gas systems]. *Stroitel'nyye materialy*. 2017. No 6. Pp: 59-62. (rus)

8. Brekhovskiy L.M. Volny v sloistyykh sredakh [Waves in layered media]. Moscow: Nauka, 1973. 502 p. (rus)

9. Crook A.W. The reflection and transmission of light by any system of parallel isotropic tiems. *J. Opt. Soc. Am.* 1948. Vol. 38. No 11. Pp: 954

10. Tartakovskiy B.D. Kriterii rasprostraneniya ploskikh voln cherez odnorodnyye sloi [Criteria for the propagation of plane waves through homogeneous layers]. DAN SSSR, 1950. 465 p. (rus)

11. Bogolepov I.I. Promyshlennaya zvukoizolyatsiya [Industrial soundproofing]. Leningrad: Sudostroyeniye. 1986. 368 p. (rus)

12. Osipov G.L., Yudin Ye. YA., Khyubner G. Snizheniye shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh [Reduction of noise in buildings and residential areas]. M.: Stroyizdat, 1987. 558 p. (rus)

Antonov Alexander I.

FGBOU VO "Tambov State Technical University", Tambov, Russia,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head. Chair of Architecture and Building Construction,

E-mail: ais@nnn.tstu.ru

Ledenev Vladimir I.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Construction and Highways,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Gusev Vladimir P.

Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Head. laboratory "Protection against noise of ventilation and engineering equipment",

E-mail: wpgusev@yandex.ru

УДК 691.1276 + 536.2.022

КИСЕЛЁВ И.Я.

РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫЕ ИЗДЕЛИЯ ПЛОТНОСТЬЮ ОТ 10 ДО 125 КГ/М³ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ – 20 ДО +25 °С

Тепловой поток через стекловолокнистые изделия представляет собой сумму четырёх слагаемых: кондукционного потока через газ в порах материала, кондукционного потока через матрицу материала, радиационного потока через газ в порах материала и конвекционного потока через газ в порах материала. Выполнены расчёты общего и радиационного тепловых потоков для стекловолокнистых изделий из плавленного кварца плотностью от 10 до 125 кг/м³ в диапазоне температуры от –20 до +25 °С. Расчёты позволяют сделать следующие выводы: доля радиационного потока в общем тепловом потоке существенна только при малых плотностях материала и уменьшается с увеличением его плотности, наиболее быстро доля уменьшается при малых значениях плотности материала; доля радиационного потока в общем тепловом потоке уменьшается с уменьшением температуры, но даже при температуре +25 °С она существенна только при малых плотностях материала.

Ключевые слова: стекловолокнистые изделия, радиационный теплоперенос, диапазон плотности от 10 до 125 кг/м³, диапазон температуры от –20 до +25 °С.

1. Тепловой поток через стекловолокнистые изделия

Теплопроводность теплоизоляционных материалов, применяемых в наружных ограждающих конструкциях зданий, является одной из их важнейших характеристик, т.к. именно она в значительной мере определяет ход процесса теплопереноса через наружные конструкции и, как следствие, теплоизоляционные свойства этих конструкций [1-7].

Тепловой поток через стекловолокнистые изделия представляет собой трёх слагаемых: кондукционного потока через газ в порах материала, кондукционного потока через матрицу материала и радиационного теплового потока. На основе этой модели с учётом того, что в общем случае также имеет место конвекционный теплоперенос через газ в порах материала в работе [8] получена следующая зависимость, описывающая теплопроводность волокнистого:

$$\lambda \left(\gamma_o, \gamma_g, \gamma_s, D_1, \Theta, \nabla(\Theta + 273,15), \alpha_g, \eta_g f_{\Theta g}, f_{\Theta s}, \lambda_{g25}, \lambda_{s25}, c_p, p, d \right) =$$

$$= \lambda_{cdg} + \lambda_{cds} + \lambda_r + \lambda_{cv} = \frac{\frac{\pi \gamma_s D_1}{4 \gamma_o}}{\frac{\pi \gamma_s D_1}{4 \gamma_o} + \frac{RT}{\pi \sqrt{2} \cdot d^2 p N_A}} \lambda_{g25} [1 + f_{\Theta g} (\Theta - 25)] +$$

$$+ K_B \lambda_{s25} [1 + f_{\Theta s} (\Theta - 25)] \frac{\gamma_o}{\gamma_s} + K_C \sigma_r D_1 (\Theta + 273,15)^3 \frac{\gamma_s}{\gamma_o} +$$

$$+ 1,91 \cdot 10^{-4} \frac{\pi^4 \alpha_g [\gamma_g (\Theta + 273,15)]^2 g \cdot \nabla(\Theta + 273,15) \cdot c_p (\Theta + 273,15) \cdot D_1^4 \gamma_s^4}{[\eta_g (\Theta + 273,15)] \cdot \gamma_o^4}, \quad (1)$$

где λ - теплопроводность стекловолокнистого изделия, Вт/(м°С); λ_{cdg} - кондукционная составляющая теплопроводности изделия, значение которой определяется теплопроводностью газа

в порах, Вт/(м°C); λ_{cds} - кондукционная составляющая теплопроводности изделия, значение которой определяется теплопроводностью его матрицы, Вт/(м°C); λ_r — радиационная составляющая теплопроводности изделия, Вт/(м°C); λ_{cv} — конвекционная составляющая теплопроводности газа в порах изделия, Вт/(м°C); γ_0 — плотность изделия, кг/м³; γ_s — плотность матрицы изделия, кг/м³; γ_g — плотность газа в порах изделия, кг/м³; f_{eg} и f_{es} — температурные коэффициенты теплопроводности газа и матрицы, 1/°C; D_l — диаметр волокон, м; Θ — температура, °C; $\nabla(\Theta + 273,15)$ — градиент температуры, К/м; λ_{g25} и λ_{s25} — теплопроводность газа и матрицы при температуре +25°C, Вт/(м°C); p — давление газа в порах, Па; d — диаметр молекулы газа, м; c_p — удельная теплоёмкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг°C); α_g — температурный коэффициент объёмного расширения газа, К⁻¹; η_g — вязкость газа, Па·с; K_B и K_C — безразмерные эмпирические константы; $g = 9,807$ м/с² — ускорение свободного падения; $R = 8,314 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К) — универсальная газовая постоянная; $N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹ — число Авогадро; $\sigma_r = 5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана – Больцмана.

Необходимые для проведения расчётов теплопроводности λ по формуле (1) значения плотности γ_g , теплопроводности λ_{g25} , температурного коэффициента f_{eg} теплопроводности, диаметра d молекул, температурного коэффициента α_g объёмного расширения и вязкости η_g воздуха в порах материалов, а также значения плотности γ_s , теплопроводности λ_{s25} , температурного коэффициента f_{es} теплопроводности матрицы материалов (плавленого кварца) приведены в справочной литературе.

Значения коэффициентов K_B и K_C исследованных стекловолоконистых изделий были определены методом регрессивного анализа результатов измерения их теплопроводности. Для изделий из плавленого кварца $K_B = 0,0776$, $K_C = 14,0$.

Четвёртое слагаемое в правой части формулы (1) равняется конвекционной λ_{cv} составляющей теплопроводности газа в порах стекловолоконистых изделий. Выполненные расчёты показывают, что для стекловолоконистых теплоизоляционных материалов доля конвекционной составляющей в общем тепловом потоке через эти материалы пренебрежимо мала: для материалов малой плотности она составляет $(2 - 3) \cdot 10^{-3} \%$, а для материалов большой плотности — $(2 - 5) \cdot 10^{-5} \%$. Следовательно, при расчёте теплопроводности λ этих материалов можно пренебречь её конвекционной λ_{cv} составляющей.

2. Расчёт радиационного теплопереноса через стекловолоконистые изделия

В таблице 1 приведены результаты расчёта зависимости от плотности стекловолоконистых изделий доли ζ_r радиационного потока в общем тепловом потоке через изделия из плавленого кварца с диаметром D_l волокон характерным для этих изделий и равным 4 мкм для пяти значений температуры: -20, -10, 0, +10 и +25°C.

Значение доли ζ_r равно:

$$\zeta_r = \frac{q_r}{q_\Sigma} = \frac{\lambda_r}{\lambda}, \quad (2)$$

где q_r — плотность радиационного теплового потока, Вт/м²;

q_Σ — плотность суммарного теплового потока, Вт/м².

Расчёты выполнены по формулам (1) и (2).

Таблица 1 - Зависимость теплопроводности λ , её радиационной λ_r составляющей и доли ζ_r радиационного теплового потока в общем тепловом потоке через стекловолоконистые изделия от плотности γ_0 и температуры Θ

Температура, Θ , °C	Характеристика	Теплопроводность λ , её радиационная составляющая λ_r , 10^{-3} Вт/(м·°C) и доля радиационного теплового потока ζ_r , %, при плотности γ_0 , кг/м ³								
		25	35	40	50	60	75,3	100	125	150
-20	λ_r , 10^{-3} Вт/(м·°C)	7,21	5,15	4,51	3,61	3,01	2,39	1,80	1,44	1,20
	λ , 10^{-3} Вт/(м·°C)	31,1	29,5	29,1	28,7	28,6	28,7	29,4	30,3	31,3
	ζ_r , %	23	18	16	13	11	8,3	6,1	4,8	3,8
-10	λ_r , 10^{-3} Вт/(м·°C)	8,10	5,79	5,06	4,10	3,38	2,69	2,03	1,62	1,35
	λ , 10^{-3} Вт/(м·°C)	32,8	30,9	30,5	30,0	29,8	29,9	30,4	31,3	32,3
	ζ_r , %	25	19	17	14	11	9,0	6,7	5,2	4,2
0	λ_r , 10^{-3} Вт/(м·°C)	9,06	6,47	5,66	4,53	3,78	3,01	2,27	1,81	1,51
	λ , 10^{-3} Вт/(м·°C)	34,4	32,4	31,8	31,2	30,9	30,9	31,4	32,3	33,2
	ζ_r , %	26	20	18	15	12	9,7	7,2	5,6	4,6
+10	λ_r , 10^{-3} Вт/(м·°C)	10,1	7,21	6,31	5,05	4,21	3,35	2,52	2,02	1,68
	λ , 10^{-3} Вт/(м·°C)	36,3	33,9	33,3	32,5	32,2	32,1	32,5	33,3	34,3
	ζ_r , %	28	21	19	16	13	10	7,8	6,1	4,9
+25	λ_r , 10^{-3} Вт/(м·°C)	11,8	8,42	7,36	5,89	4,91	3,91	2,95	2,36	1,94
	λ , 10^{-3} Вт/(м·°C)	39,2	36,3	35,5	34,6	34,1	33,9	34,2	35,0	35,9
	ζ_r , %	30	23	21	17	14	12	8,6	6,7	5,5

Закключение

Зависимость теплопроводности стекловолоконистых изделий от температуры практически линейна и уменьшается с увеличением плотности изделий;

Доля радиационного потока ζ_r в общем тепловом потоке существенна только при малых плотностях материала и уменьшается с увеличением его плотности, наиболее быстро доля ζ_r уменьшается при малых значениях плотности материала;

Доля радиационного потока ζ_r в общем тепловом потоке уменьшается с уменьшением температуры, но даже при температуре +25°C она существенна только при малых плотностях материала.

Доля конвекционной составляющей в общем тепловом потоке через стекловолоконистые изделия пренебрежимо мала: для материалов малой плотности она составляет $(2 - 3) \cdot 10^{-3} \%$, а для материалов большой плотности — $(2 - 5) \cdot 10^{-5} \%$. При расчёте теплопроводности этих материалов можно пренебречь её конвекционной составляющей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2017. №6. С. 28-31.
2. Желдаков Д.Ю., Фролов А.А. Сегментный метод расчета распределения температуры по сечению ограждающей конструкции здания // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 36-39.
3. Бутовский И.Н., Веселовацкая Е.В. Особенности оценки качества энергетической эффективности тепловой защиты проектов зданий. // БСТ. №6. 2017. С.50-53.

4. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергоосберегающих мероприятий // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 7-9.
5. Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 152-155.
6. Умнякова Н.П., Бутовский И.Н., Чеботарёв А.Г. Развитие методов нормирования теплозащиты энергоэффективных зданий // Жилищное строительство. 2014. № 7. С. 19-21.
7. Пастушков П.П., Павленко Н.В., Коркина Е.В. Использование расчетного определения эксплуатационной влажности теплоизоляционных материалов // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 168-172.
8. Киселёв И.Я. Влияние зависимости теплопроводности строительных материалов от температуры на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. Выпуск 31 (50), ч 2., Строительные науки. С. 42-45.

Киселёв Игорь Яковлевич

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

Доктор технических наук, учёный секретарь.

E-mail: ikiselyov@bk.ru

KISELYOV I.Y.

**RADIATION HEAT TRANSFER THROUGH THE FIBERGLASS
PRODUCTS OF DENSITY FROM 10 TO 125 KG/M³ IN THE RANGE
OF TEMPERATURE FROM –20 TO +25°C**

Heat flow through the fiberglass products is the sum of four summands: the conductive flow through the gas in the pores of material, the conductive flow through the matrix of material, radiation flow through the gas in the pores of material and convection flow through the gas in the pores of material. The calculations of the general and radiation heat flows for the fiberglass articles made for the fused quartz by the density from 10 to 125 of kg/m³ in the range of temperature from –20 to +25°C are executed. The calculations permit to make the following conclusions:

— *the portion of radiation flow in the general heat flow is essential only with the low densities of material and decreases with an increase of its density, most rapidly portion decreases by the low values of material density;*

— *the portion radiation flow in the general heat flow it decreases with the decrease of temperature, but even at a temperature of +25°C it is essential only to the low densities of material.*

Keywords: fiberglass products, radiation heat transfer, density range from 10 to 125 kg/m³, temperature range from –20 to +25°C

REFERENCES

1. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Izmeneniye vo vremeni teploprovodnosti gazonapolnennykh polimer-nykh teploizolyatsionnykh materialov [Change in the time of thermal conductivity of gas-filled polymer insulating materials]. *Stroitel'nyye materialy*. 2017. No 6. Pp: 28-31. (rus)
2. Zheldakov D.YU., Frolov A.A. Segmentnyy metod rascheta raspredeleniya temperatury po secheniyu ogra-zhdayushchey konstruktsii zdaniya [Segment method for calculating the temperature distribution along the section of the enclosing building structure]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2017. No 6. Pp: 36-39. (rus)
3. Butovskiy I.N., Veselovatskaya Ye.V. Osobennosti otsenki kachestva energeticheskoy effektivnosti teplovoy zashchity proyektov zdaniy [Features of an estimation of quality of power efficiency of thermal protection of projects of buildings]. *BST*. No 6. 2017. Pp: 50-53. (rus)
4. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Kolichestvennaya otsenka energoeffektivnosti energoosberegayushchikh meropriyatiy [Quantitative assessment of energy efficiency of energy-saving measures]. *Stroitel'nyye materialy*. 2013. No 3. Pp: 7-9. (rus)
5. Gagarin V.G., Pastushkov P.P., Reutova N.A. K voprosu o naznachenii raschetnoy vlazhnosti stroi-tel'nykh materialov po izotermе sorbtzii [To the question of the designation of design moisture of building materials for the sorp-tion isotherm]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. No 4 (60). Pp: 152-155. (rus)

6. Umnyakova N.P., Butovskiy I.N., Chebotarov A.G. Razvitiye metodov normirovaniya teplozashchity energoэффективnykh zdaniy [Development of methods for rationing thermal protection of energy-efficient buildings] *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2014. No 7. Pp: 19-21. (rus)

7. Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Korkina Ye.V. Ispol'zovaniye raschetnogo opredeleniya ekspluatatsi-onnoy vlazhnosti teploizolyatsionnykh materialov [Use of the calculated definition of the operational humidity of heat-insulating materials]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. No 4 (60). Pp: 168-172. (rus)

8. Kiselov I.YA. Vliyaniye zavisimosti teploprovodnosti stroitel'nykh materialov ot temperatury na soprotivleniye teploperedache ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy [Influence of the dependence of the thermal conductivity of building materials on the temperature on the resistance to heat transfer of the enclosing structures of buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhiturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013. Vol. 31 (50). Pp: 42-45. (rus)

Kiselyov Igor Y.

Research institute of building physics of Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Scientific secretary,
E-mail: ikiselyov@bk.ru

УДК 697.922

СИДОРИНА А.В., ЖОГОЛЕВА О.А., МАТВЕЕВА И.В.

РАСЧЕТ ШУМА В ГАЗОВОЗДУШНЫХ КАНАЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ФУНКЦИИ ИСТОЧНИКА

Для проектирования защиты окружающей среды от шумового воздействия крупногабаритных газовоздушных каналов энергетических объектов необходимо иметь методы расчета шума внутри каналов, объективно оценивающие процессы формирования и распространения в них звуковой энергии. В статье рассматривается возможность применения для этой цели метода функции источника, реализующего статистическую энергетическую модель отраженного звукового поля в замкнутых воздушных объемах. Показаны результаты экспериментальной оценки точности метода функции источника и указаны границы его применения для расчетов шума в крупногабаритных газовоздушных каналах. Установлено, что метод функции источника, реализующий статистическую энергетическую модель отраженного шумового поля, образующегося в канале, дает достаточную точность в случае одинаковых коэффициентов звукопоглощения на всех внутренних ограждениях канала с характером отражения звука от них, близким к диффузному отражению. В случае, если на отдельных поверхностях канала будут неравномерно размещаться звукопоглощающие облицовки, для расчетов шума следует использовать численный статистический энергетический метод, учитывающий конкретное размещение звукопоглощения в канале.

Ключевые слова: газовоздушный канал; защита от шума канала; расчет шума; метод расчета шума.

На больших по мощности энергетических объектах, располагаемых в городской застройке, имеются крупногабаритные газовоздушные каналы. Шум, распространяющийся внутри каналов, излучается через их стенки и устья в окружающую среду. В результате этого происходит значительное зашумление участков, прилегающих к энергетическим объектам застройки. Для разработки мероприятий по снижению шума, излучаемого каналами, необходимо иметь метод расчета шума, распространяющегося внутри канала [1]. На основании результатов расчетов определяется требуемое снижение шума и подбирается комплекс шумозащитных мер по уменьшению излучения шума стенками и устьями каналов [2,3,4].

В статье рассматривается возможность применения для расчета шума в крупногабаритных газовоздушных каналах метода функции источника и приводятся результаты его экспериментальной проверки.

Крупногабаритные газовоздушные каналы по условиям формирования в них звуковых полей относятся к длинным помещениям, в которых распространение отраженной составляющей шума имеет ярко выраженные особенности. Проведенные экспериментальные исследования [5,6] показали, что в поперечных сечениях каналов отраженная звуковая энергия распределяется достаточно равномерно. В то же время при удалении от источника шума наблюдается постоянный спад уровней звукового давления. Два данных обстоятельства позволяют считать, что формирующееся отраженное шумовое поле в канале является одномерным.

В процессе исследований формирования отраженных шумовых полей было установлено, что в каналах без звукопоглощающих облицовок образуются квазидиффузные звуковые поля. Для расчета энергетических характеристик таких полей можно использовать статистические энергетические методы [7].

Анализ разработанных статистических энергетических методов расчета шума в замкнутых объемах показал, что для расчетов шума в крупногабаритных газовоздушных каналах

наиболее приемлемым является метод функции источника, основные положения которого изложены в [7]. Выбор данного метода обусловлен тем, что все внутренние поверхности крупногабаритных каналов при отсутствии на них звукопоглощающих облицовок имеют примерно равные коэффициенты звукопоглощения, которые соответственно, равны среднему коэффициенту звукопоглощения в канале.

Такое условие позволяет произвести замену поглощения звуковой энергии, происходящего на ограждениях канала, на эквивалентное пространственное поглощение энергии m_3 в воздушной среде канала [7,8]. Учитывая, что при отсутствии источников дивергенция потока отраженной энергии есть результирующий поток энергии, определяемый проходящими через поверхность единичного объема элементарными потоками и поглощением отраженной звуковой энергии в среде этого объема, согласно [7] имеем

$$\operatorname{div} \bar{q} = c m_3 \varepsilon_{\text{отр}} \quad (1)$$

где c – скорость звука в воздухе;

$\varepsilon_{\text{отр}}$ – плотность отраженной звуковой энергии;

m_3 – эквивалентный пространственный коэффициент затухания звуковой энергии, заменяющий ее поглощение на ограждениях канала поглощением в его воздушной среде [8], определяемый в данном случае по формуле

$$m_3 = m_6 - \sum_{i=1}^K S_i \ln(1 - \alpha_i) / S \cdot l_{\text{cp}}; \quad (2)$$

m_6 – коэффициент затухания звука в воздухе;

S – общая площадь ограждений канала;

S_i, α_i – площадь и коэффициент звукопоглощения i -ого участка ограждения канала;

l_{cp} – средняя длина пробега отраженных звуковых лучей в канале;

\bar{q} – поток отраженной звуковой энергии в квазидиффузном звуковом поле в замкнутых воздушных объемах, определяемый согласно [7] выражением

$$\bar{q} = -0.5c l_{\text{cp}} \operatorname{grad} \varepsilon_{\text{отр}} \quad (3)$$

При подстановке выражений (2) и (3) в (1) можно получить дифференциальное уравнение, описывающее отраженную звуковую энергию, распространяющуюся в канале, в виде

$$\nabla^2 \varepsilon_{\text{отр}} - \gamma^2 \varepsilon_{\text{отр}} = 0, \quad (4)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа;

$$\gamma^2 = \frac{c m_3}{0.5c l_{\text{cp}}} = - \frac{\sum_{i=1}^K S_i \ln(1 - \alpha_i)}{0.5S l_{\text{cp}}^2} + \frac{m_6}{0.5l_{\text{cp}}}; \quad (5)$$

Уравнение (4) является дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка, при решении которого в этом случае можно использовать нулевые граничные условия второго рода

$$\left. \frac{\partial \varepsilon_{\text{отр}}}{\partial n} \right|_S = 0. \quad (6)$$

Использованный прием переноса поглощения отраженной звуковой энергии с ограждений канала в его воздушную среду согласно [7] возможен в условиях формирования квазидиффузного поля при большом количестве возбужденных мод замкнутого воздушного объема. Данное условие может выполняться в каналах при излучении в канал звуковой энергии широкополосными источниками шума и при последующем расчете энергетических характеристик шума в октавных полосах частот [9]. Также условия всегда выполняются при практических расчетах шума в крупногабаритных каналах.

Для решения уравнения (4) с граничными условиями (5) может быть использован известный метод функции источника. В [10] рассмотрено решение подобного уравнения при нулевых граничных условиях второго рода с применением метода электростатических изображений. При его применении для определения плотности отраженной звуковой энергии в канале можно использовать выражение (7)

$$\varepsilon_{\text{отр.}i} = \frac{W(1 - \bar{\alpha})}{\Omega 0.5cl_{\text{cp}}} G_i, \quad (7)$$

где W - мощность источника шума;

$\bar{\alpha}$ - средний коэффициент звукопоглощения в канале;

Ω - пространственный угол излучения звуковой энергии источником шума в канале;

G_i - функция, влияющая объемно-планировочных и акустических параметров помещения на величину отраженной энергии в i -ой точке канала.

Так как каналы относятся к длинным помещениям, у которых длина существенно больше поперечных размеров, а влияние торцевых стенок каналов и их открытых устьев на формирование шумового поля в каналах минимально, каналы можно рассматривать как бесконечно длинные. В этом случае для канала с прямоугольным поперечным сечением при $z \rightarrow \infty$ функция G имеет вид

$$G_{\text{дл}} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\gamma_{\text{дл}} r_{mn})}{r_{mn}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \gamma_{\text{дл}} = \sqrt{-\frac{l_x(\ln \beta_1 + \ln \beta_2) + l_y(\ln \beta_3 + \ln \beta_4)}{(l_x + l_y)l_{\text{cp}}^2} + \frac{2m_6}{l_{\text{cp}}}}; \quad (9)$$

$\beta_1 = (1 - \alpha_1) \div \beta_4 = (1 - \alpha_4)$ - коэффициенты отражения ограждений канала, имеющие координаты $x_1 = 0, x_2 = l_x, y_3 = 0, y_4 = l_y$;

r_{mn} - расстояния от расчетной точки до изображения;

m, n - комбинации целых чисел, кроме $m=n=0$.

Величины r_{mn} вычисляются по формуле

$$r_{mn} = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_0 - z)^2}; \quad (10)$$

где x_m, y_n - координаты изображений, вычисляемые при четных m и n по формулам

$$x_m = ml_x + x_0; \quad y_n = nl_y + y_0, \quad (11)$$

а при нечетных m и n по формулам

$$x_m = (m+1)l_x - x_0; \quad y_n = (n+1)l_y - y_0; \quad (12)$$

x_0, y_0, z_0 – координаты источника шума; l_x, l_y – поперечные размеры сечения канала.

В канале кроме отраженной энергии распространяется и прямая энергия звука. В этом случае суммарная плотность звуковой энергии в канале с учетом плотности прямой звуковой энергии будет определяться по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{сум}} = \mathcal{E}_{\text{пр}} + \mathcal{E}_{\text{отр}}. \quad (13)$$

Соответственно, расчет уровней звукового давления в канале будет производиться по формуле

$$L = L_w + \lg \left[\frac{\exp(-m_i r_i)}{\Omega r_i^2} + \frac{2(1-\bar{\alpha})}{\Omega l_{\text{ср}}} G_i \right], \quad (14)$$

где r_i – расстояние от источника шума до i -ой расчетной точки.

Важное значение при расчетах шума в каналах рассмотренным методом является учет суммированных членов ряда в выражение (8) при заданной точности определения уровней звукового давления в расчетных точках канала. При сравнении экспериментальных и расчетных данных установлено, что для обеспечения требуемой точности при практических расчетах достаточно ограничиваться 8-10 порядками учитываемых членов ряда функции G во всем диапазоне возможных изменений коэффициентов звукопоглощения необлицованных ограждений каналов.

Для оценки возможности использования рассмотренного метода в практике расчетов шума в крупногабаритных каналах произведены экспериментальные исследования шума в длинных помещениях - аналогах каналов [5,6]. Ниже, в качестве примера, приведены результаты расчетов шума, выполненные нами в длинных помещениях, имеющих объемно-планировочные и акустические характеристики, аналогичные характеристикам каналов. Характеристики помещений, экспериментальные и расчетные данные уровней звукового давления, полученные в них при работе точечных источников шума, приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 2 даны расчетные данные, полученные методом функции источника, а также методами мнимых источников и методом диффузного поля.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых длинных помещений – аналогов крупногабаритных каналов

№ помещения	Размеры помещения, м L x B x H	Влажность % / температура воздуха, °C	Координаты источника, м X ₀ x Y ₀ x Z ₀	Среднегеометрические частоты полосы анализа, Гц	Акустическая мощность источника, дБ	Средний коэффициент звукопоглощения помещения
1	2	3	4	5	6	7
1	45x2x3,3	55 / 18	15x1x 1,5	1000 4000	86 93	0,04 0,04
2	20,3x1,6x3,3	55 / 18	2x10,8x1,5	1000 4000	95 98	0,05 0,05
3	44,4x2,6x3,1	55 / 18	4x1,3x1,5	2000 4000	80 107	0,05 0,05

Таблица 2 – Результаты экспериментов и расчетов уровней звукового давления в длинных помещениях – аналогов крупногабаритных каналов

№ по-меще-ния	Среднегеомет-рическая частота полосы анализа, Гц	Метод расчета	Уровни звукового давления L , дБ, на расстоянии от источника, м / разница расчетных и экспериментальных данных в расчетной точке ΔL , дБ							$\bar{\Delta L}_2$
			4	5	6	7	8	9	10	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	расстояние от источника		2	4	6	8	10	12	14	
	1000	Эксперимент. данные	84	81	80	79	77	75	74	
		Метод изображений	<u>81,9</u> -2,1	<u>80,8</u> -0,2	<u>79,7</u> -0,3	<u>78,7</u> -0,3	<u>77,6</u> 0,6	<u>76,6</u> 1,6	<u>75,6</u> 1,6	1,19
		Метод мнимых источников	<u>79,7</u> -4,3	<u>78,8</u> -2,2	<u>78,2</u> -1,8	<u>77,8</u> -1,2	<u>77,5</u> 0,5	<u>77,3</u> 2,3	<u>77,2</u> 3,2	2,45
		Метод диффузного поля	<u>79,1</u> -4,9	<u>78,7</u> -2,3	<u>78,7</u> -1,3	<u>78,6</u> -0,4	<u>78,6</u> 1,6	<u>78,6</u> 3,6	<u>78,6</u> 4,6	3,13
	4000	Эксперимент. данные	90	88	86	85	84	82	81	
		Метод изображений	<u>88,1</u> -1,9	<u>86,9</u> -1,1	<u>85,7</u> -0,3	<u>84,5</u> -0,5	<u>83,3</u> -0,7	<u>82,1</u> 0,1	<u>80,8</u> -0,2	0,61
		Метод мнимых источников	<u>86,2</u> -3,8	<u>85,1</u> -2,9	<u>84,4</u> -1,6	<u>83,9</u> -1,1	<u>83,5</u> -0,5	<u>83,3</u> 1,3	<u>83,2</u> 2,2	2,01
		Метод диффузного поля	<u>84,9</u> -5,1	<u>84,5</u> -3,5	<u>84,4</u> -1,6	<u>84,4</u> -0,6	<u>84,4</u> 0,4	<u>84,4</u> 2,4	<u>84,3</u> 3,3	2,79
2	расстояние от источника		1,5	4	7	9	13	15	17	
	1000	Эксперимент. данные	93	91	89	88	87	86	86	
		Метод изображений	<u>93,2</u> 0,2	<u>91,4</u> 0,4	<u>89,4</u> 0,4	<u>88,1</u> 0,1	<u>85,8</u> -1,2	<u>84,9</u> -1,1	<u>84,4</u> -1,6	0,79
		Метод мнимых источников	<u>91,4</u> -1,6	<u>90,1</u> -0,9	<u>89,2</u> 0,2	<u>88,8</u> 0,8	<u>88,2</u> 1,2	<u>88,1</u> 2,1	<u>87,9</u> 1,9	1,29
		Метод диффузного поля	<u>90,8</u> -2,2	<u>90,5</u> -0,5	<u>90,4</u> 1,4	<u>90,4</u> 2,4	<u>90,4</u> 3,4	<u>90,4</u> 4,4	<u>90,4</u> 4,4	2,33
	4000	Эксперимент. данные	96	94	90	89	86	84	84	
		Метод изображений	<u>95,6</u> -0,4	<u>93,6</u> -0,4	<u>91,3</u> 1,3	<u>89,9</u> 0,9	<u>87,3</u> 1,3	<u>86,4</u> 2,3	<u>85,7</u> 1,7	0,94
		Метод мнимых источников	<u>93,9</u> -2,1	<u>92,4</u> -1,6	<u>91,4</u> 1,4	<u>90,9</u> 1,9	<u>90,2</u> 4,2	<u>90,0</u> 6	<u>89,9</u> 5,9	3,09
		Метод диффузного поля	<u>92,9</u> -3,1	<u>92,5</u> -1,5	<u>92,5</u> 2,5	<u>92,5</u> 3,5	<u>92,5</u> 6,5	<u>92,5</u> 8,5	<u>92,5</u> 8,5	4,25
3	расстояние от источника		0,5	1	2	4	7	16	32	
	2000	Эксперимент. данные	82	80	79	77,5	77	70	62	
		Метод изображений	<u>78,5</u> -3,5	<u>76,6</u> -3,4	<u>75,7</u> -3,3	<u>74,5</u> -3,0	<u>72,4</u> -4,6	<u>68,1</u> -1,9	<u>59,9</u> -2,1	0,84
		Метод мнимых источников	<u>80,9</u> -1,1	<u>77,9</u> -2,1	<u>76,3</u> -2,7	<u>75,0</u> -2,5	<u>73,4</u> -3,6	<u>71,3</u> 1,3	<u>69,2</u> 7,2	3,45
		Метод диффузного поля	<u>79,9</u> -2,1	<u>75,8</u> -4,2	<u>73,6</u> -5,4	<u>72,9</u> -4,6	<u>72,6</u> -4,4	<u>72,6</u> 2,6	<u>72,6</u> 10,6	5,37
	4000	Эксперимент. данные	105	101	97,5	96	94	88	79	
		Метод изображений	<u>105,2</u> 0,2	<u>103,1</u> 2,1	<u>102,0</u> 2,5	<u>100,8</u> 4,8	<u>98,4</u> 4,4	<u>93,7</u> 5,7	<u>84,6</u> 5,6	1,84
		Метод мнимых источников	<u>103,7</u> -1,3	<u>100,5</u> -0,5	<u>98,8</u> 1,3	<u>97,2</u> 1,2	<u>95,2</u> 1,2	<u>92,4</u> 4,4	<u>88,9</u> 9,9	3,52
		Метод диффузного поля	<u>102,7</u> -2,3	<u>98,3</u> -2,7	<u>95,7</u> -1,8	<u>94,7</u> -1,3	<u>94,4</u> 0,4	<u>94,4</u> 6,4	<u>94,3</u> 15,3	6,16

При оценке соответствия расчетных и экспериментальных данных использованы статистические показатели:

- среднее расхождение результатов

$$\Delta \bar{L} = \sum_{i=1}^N \Delta L / N ; \quad (15)$$

- среднее квадратичное отклонение

$$\Delta \bar{L}_2 = \sqrt{\sum (\Delta L - \Delta \bar{L})^2 / N} , \quad (16)$$

где N – количество расчетных точек; ΔL – разница расчетных и экспериментальных данных в расчетной точке.

В данном случае важное значение имеет величина $\Delta \bar{L}_2$. Она показывает степень соответствия форм расчетных графиков экспериментальным данным.

Анализ результатов расчетов показывает, что из трех методов наиболее близкие по форме к экспериментальным данным графики получены методом функции источника. Расхождения между экспериментальными данными и графиками, полученными методом мнимых источников, связаны с использованием в методе зеркальной модели отражения, не соответствующей реальному характеру отражения звука от ограждений канала. Расхождения результатов, полученных методом диффузного поля, и экспериментальных данных объясняются неучетом в методе квазидиффузного характера формирования отраженного звукового поля.

Таким образом, выполненные исследования возможности применения метода функции источника для расчета шума в крупногабаритных каналах показывают следующее.

Метод функции источника, реализующий статистическую энергетическую модель отраженного шумового поля, образующегося в канале, дает достаточную точность в случае одинаковых коэффициентов звукопоглощения на всех внутренних ограждениях канала с характером отражения звука от них, близким к диффузному отражению.

В случае, если на отдельных поверхностях канала будут неравномерно размещаться звукопоглощающие облицовки, для расчетов шума следует использовать численный статистический энергетический метод, учитывающий конкретное размещение звукопоглощения в канале [11].

При отражении звука от ограждений канала, соответствующей зеркально-диффузной модели отражения, расчет шума в канале следует производить комбинированным методом, позволяющим отдельно оценивать зеркальную и диффузную составляющие энергии отраженного звукового поля [12]. Подробные сведения о комбинированном методе приведены в работах [13,14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.П. Акустический расчет как основа для проектирования малозумной системы вентиляции (кондиционирования) // АВОК, 2006. №6. С. 60-66.
2. Гусев В.П., Леденев В.И. Проектирование оптимальной защиты от шумового воздействия систем ОВК в административных зданиях предприятий текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 4 (364). С. 146-152.
3. Гусев В.П., Леденев В.И., Шубин И.Л. Оптимальная защита окружающей среды от шумового воздействия оборудования систем ОВК // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. № 3 (7). С. 32-42.
4. Гусев В.П., Сидорина А.В., Антонов А.И., Леденев В.И. Проектирование звукоизоляции крупногабаритных вентиляционных каналов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2 (368). С. 254-260.
5. Гусев В.П., Солодова М.А. К вопросу о распространении шума в крупногабаритных газозвуковых каналах

каналах // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №5. С. 211-219.

6. Солодова М.А., Соломатин Е.О. Экспериментальные исследования шума в аналоге крупногабаритных воздушных каналов // Вестник МГСУ. 2011. №3-1. С.97-102.

7. Леденев В.И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. 156 с.

8. Леденев В.И., Макаров А.М., Матвеева И.В., Соломатин Е.О. Эквивалентные коэффициенты затухания звуковой энергии в помещениях и их использование при расчетах шума в производственных зданиях // Приволжский научный журнал. 2018. № 1 (45). С. 25-32.

9. Леденев В.И., Соломатин Е.О., Гусев В.П. Оценка точности и границ применимости статистических энергетических методов при расчетах шума в производственных помещениях энергетических объектов // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 237-240.

10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.

11. Гусев В.П., Леденев В.И., Соломатин Е.О. Энергетический метод оценки распространения шума в газозвуковых трактах // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 230-233.

12. Гусев В.П., Леденев В.И., Солодова М.А., Соломатин Е.О. Комбинированный метод расчета уровней шума в крупногабаритных газозвуковых каналах // Вестник МГСУ. 2011. № 3-1. С. 33-38.

13. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // Procedia Engineering. 2017. № 176. С. 218.

14. Гиясов Б.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Метод расчета шума при зеркально-рассеянном отражении // Инженерно-строительный журнал. 2018. №1 (77). С. 13-22.

Сидорина Анна Владимировна

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

Инженер «Лаборатории защиты от шума вентиляционного и инженерно-технологического оборудования»

E-mail: asidorina@k-flex.ru

Жоголева Ольга Александровна

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", г. Тамбов, Россия,

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Матвеева Ирина Владимировна

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", г. Тамбов, Россия,

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

SIDORINA A.V., ZHOGOLEVA O.A., MATVEEVA I.V.

CALCULATION OF NOISE IN GAS-AIR CHANNELS OF POWER OBJECTS BY THE SOURCE FUNCTION METHOD

To design environmental protection from the noise effect of large-sized gas-air channels of power objects, it is necessary to have methods for calculating the noise inside channels, objectively assessing the processes of formation and propagation of sound energy in them. The article considers the possibility of applying for this purpose the method of the source function realizing the statistical energy model of the reflected sound field in closed air volumes. The results of an experimental estimate of the accuracy of the source function method are shown and the limits of its application for the calculation of noise in large-size gas-air channels are indicated. It is established that the source function method that realizes the statistical energy model of the reflected noise field generated in the channel gives sufficient accuracy in the case of identical sound absorption coefficients on all internal channel fences with the nature of reflection of sound from them close to diffuse reflection. In the event that sound-absorbing linings are unevenly placed on separate surfaces of the channel, a statistical energy method that takes into account the concrete placement of sound absorption in the channel should be used for noise calculations.

Keywords: gas-air channel; protection from channel noise; calculation of noise; noise calculation method.

REFERENCES

1. Gusev V.P. Akusticheskiy raschet kak osnova dlya proyektirovaniya maloshumnoy sistemy ventilyatsii (konditsionirovaniya) [Acoustic calculation as a basis for designing a low-noise ventilation (air conditioning) system]. *AVOK*. 2006. No 6. Pp: 60-66. (rus)
2. Gusev V.P., Ledenev V.I. Proyektirovaniye optimal'noy zashchity ot shumovogo vozdeystviya sistem OVK v administrativnykh zdaniyakh predpriyatiy tekstil'noy i legkoy promyshlennosti [Designing the Optimal Protection Against the Noise Impact of HVAC Systems in the Administrative Buildings of Textile and Light Industry Enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2016. No 4 (364). Pp: 146-152. (rus)
3. Gusev V.P., Ledenev V.I., Shubin I.L. Optimal'naya zashchita okruzhayushchey sredy ot shumovogo vozdeystviya oborudovaniya sistem OVK [Optimal protection of the environment from the noise effect of HVAC equipment]. *Biosferaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2014. No 3 (7). Pp: 32-42. (rus)
4. Gusev V.P., Sidorina A.V., Antonov A.I., Ledenev V.I. Proyektirovaniye zvukoizolyatsii krupnogabaritnykh ventilyatsionnykh kanalov [Design of soundproofing large-sized ventilation ducts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2017. No 2 (368). Pp: 254-260. (rus)
5. Gusev V.P., Solodova M.A. K voprosu o rasprostraneni shuma v krupnogabaritnykh gazovozdushnykh kanalakh [On the issue of the propagation of noise in large-sized gas-air channels]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No 5. Pp: 211-219. (rus)
6. Solodova M.A., Solomatin Ye.O. Eksperimental'nyye issledovaniya shuma v analoge krupnogabaritnykh vozdushnykh kanalov [Experimental studies of noise in the analog of large air channels]. *Vestnik MGSU*. 2011. No 3-1. Pp: 97-102. (rus)
7. Ledenev V.I. Statisticheskiye energeticheskiye metody rascheta shumovykh poley pri proyektirovanii proizvodstvennykh zdaniy [Statistical energy methods for calculating noise fields in the design of industrial buildings]. Tambov: Publ. of Tambov State Tech. Univ., 2000. 156 p. (rus)
8. Ledenev V.I., Makarov A.M., Matveyeva I.V., Solomatin Ye.O. Ekvivalentnyye koeffitsiyenty zatukha-niya zvukovoy energii v pomeshcheniyakh i ikh ispol'zovaniye pri raschetakh shuma v proizvodstvennykh zdaniyakh [Equivalent coefficients of attenuation of sound energy in the premises and their use in the calculation of noise in industrial buildings]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2018. No 1 (45). Pp: 25-32. (rus)
9. Ledenev V.I., Solomatin Ye.O., Gusev V.P. Otsenka tochnosti i granits primenimosti statisticheskikh energeticheskikh metodov pri raschetakh shuma v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh energeticheskikh ob'yektov [Estimation of the accuracy and limits of the applicability of statistical energy methods in the calculation of noise in industrial premises of power objects]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No 3. Pp: 237-240. (rus)
10. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1977. 736 p. (rus)
11. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solomatin Ye.O. Energeticheskiy metod otsenki rasprostraneniya shuma v gazovozdushnykh traktakh [Energy method for estimating the propagation of noise in gas-air paths]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No 3. Pp: 230-233. (rus)
12. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solodova M.A., Solomatin Ye.O. Kombinirovanny metod rascheta urov-ney shuma v krupnogabaritnykh gazovozdushnykh kanalakh [Combined method for calculating the noise levels in large-sized gas-air channels] *Vestnik MGSU*. 2011. No 3-1. Pp: 33-38. (rus)
13. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection. *Procedia Engineering*. 2017. No 176. Pp: 218.
14. Giyasov B.I., Ledenev V.I., Matveyeva I.V. Metod rascheta shuma pri zerkal'no-rasseyanom otazhe-nii [A method for calculating noise in a mirror-scattered reflection]. *Magazine of civil engineering*. 2018. No 1 (77). Pp: 13-22. (rus)

Sidorina Anna V.

Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
 Moscow, Russia,
 Engineer of "Laboratory of protection against noise of ventilation and engineering equipment",
 E-mail: asidorina@k-flex.ru

Zhogoleva Olga A.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
 Candidate of technical Sciences, associate professor of "Urban construction and roads" department,
 E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Matveeva Irina V.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
 Candidate of technical Sciences, associate professor, associate professor of "Urban construction and roads" department,
 E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

УДК 625 85

СОЛОМЕНЦЕВ А. Б.

ОЦЕНКА УПЛОТНЯЕМОСТИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ДОБАВКАМИ

В статье проведено сопоставление уплотняемости асфальтобетонных смесей с низкотемпературными добавками зарубежного и российского производства по предложенному автором коэффициенту уплотняемости. Оценена уплотняемость щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси ЩМАС-15 с различными добавками при температуре 80°C по увеличению средней плотности образцов асфальтобетона. Определен коэффициент уплотняемости асфальтовязящего при совместном использовании низкотемпературных добавок и добавки на основе резинового порошка, а также для асфальтовязящего с различными полимерными добавками. Определен коэффициент уплотняемости асфальтовязящего с жидкими, содержащими поверхностно-активные вещества, низкотемпературными добавками российского производства. Установлено, что выраженный технологический эффект улучшения уплотняемости в лабораторных условиях при пониженных температурах наблюдается при расходе низкотемпературных добавок 1-2% от массы вяжущего.

Ключевые слова: асфальтобетон, асфальтовязящее, уплотняемость асфальтобетонных смесей и асфальтовязящего, низкотемпературные добавки, оценка уплотняемости, коэффициент уплотняемости.

Процессы уплотнения асфальтобетонных смесей и их уплотняемость детально исследовались в работах И.В. Королева [1]. В основу оценки уплотняемости по методу Королева И.В. положен процесс деформирования изготавливаемого асфальтобетонного образца с его циклическим нагружением. Критерием оценки являлись оптимальный коэффициент пористости и соответствующие ему средние плотности. Автором получены зависимости средней плотности от температуры уплотнения [1]. В работе [2] отмечается, что поверхностно-активные вещества, вводимые в асфальтобетонную смесь, улучшают ее уплотняемость.

Как известно, уплотняемость асфальтобетонных смесей — это способность асфальтобетонной смеси к уплотнению. Уплотняемость, т.е. работа уплотнения асфальтобетонной смеси, зависит от количества битума в смеси, гранулометрического состава минеральной части, ее температуры, наличия в битуме или в смеси добавок различного функционального назначения. Целью исследования в данной статье является оценка технологической и технической эффективности использования низкотемпературных добавок в горячих асфальтобетонных смесях. За критерий эффективности по основному эффекту — улучшение уплотняемости — принимаем увеличение коэффициентов уплотняемости асфальтобетонных смесей и асфальтовязящего при условии неухудшения физико-механических свойств асфальтобетона и асфальтовязящего с определением предельно допустимой температуры уплотнения.

Под добавкой для теплых асфальтобетонных смесей понимается компонент, добавляемый в горячие асфальтобетонные смеси, в том числе литые и щебеночно-мастичные, для снижения на 20-30°C температуры приготовления, укладки и уплотнения, улучшения удобоукладываемости и экологических показателей производства. Добавки для теплого асфальтобетона удобнее называть низкотемпературными по аналогии с другим названием теплого асфальтобетона — низкотемпературный, принятым в европейских странах [3].

В таблице 1 автором собраны сведения по уплотняемости горячих асфальтобетонных

смесей, полученными из отчетов о научно-исследовательских работах и статьи [4-7]. На основе значений средней плотности асфальтобетонных образцов, отформованных (уплотненных) при стандартной ($\rho_{ст}$) и минимальной ($\rho_{мин}$) температурах получили значения коэффициента уплотняемости:

$$K_{упл} = \frac{\rho_{мин}}{\rho_{ст}}.$$

Таблица 1 – Уплотняемость асфальтобетонных смесей с низкотемпературными добавками по данным источников [4-7]

№ п/п	Название добавки, ссылки на источники информации	Тип или вид асфальтобетона	Расход добавки, % от массы битума	Средняя плотность образцов асфальтобетона, г/см ³ при температуре формования, °С							Коэффициент уплотняемости: отношение $\rho_{мин}/\rho_{ст}$
				165	155	150	100	90-100	80-100	80-90	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Cesabase RT 945 [4]	А, МІ	Без добавки			2,56	2,52				0,98
			0,3			2,55	2,52				0,99
			0,5			2,54	2,52				0,99
2	Evotherm J1 [5]	ЩМА-15	Без добавки	2,380							
			0,4	2,392				2,363			0,99
		А, МІ	Без добавки			2,389					
			0,4			2,992			2,392		1,00
3	Адгезол 3-ТС [6]	А, МІ	Без добавки		2,398						
			?		2,401					2,386	0,99
4	ДАД ТА-1 [7]	Б	Без добавки	2,37			2,32				0,98
			0,6	2,37			2,33				0,98
			0,8	2,38			2,34				0,98
			1,0	2,38			2,35				0,99

Как видно из таблицы, асфальтобетонная смесь типа А с добавкой Cesabase RT 945 с расходом 0,3 и 0,5 % от массы битума увеличивает уплотняемость на 1% по сравнению со смесью без добавки. Для щебеночно-мастичной смеси ЩМАС-15 с добавкой Evotherm J1 при расходе 0,4% от массы битума достигается коэффициент уплотняемости 0,99, а для типа А $K_{упл}=1,00$. Добавка Адгезол-3-ТС с неизвестным расходом для смеси типа А позволяет достичь коэффициент уплотняемости 0,99 при температуре уплотнения 80-90°С. Добавка ДАД ТА-1 при расходе 1,0% от массы битума увеличивает коэффициент уплотняемости на 1% по сравнению с асфальтобетоном без добавки. По данным авторов [4-6] наблюдается некоторое снижение физико-механических показателей свойств асфальтобетона, но в пределах, допустимых ГОСТ 9128-2009 и 9128-2013, а при использовании добавки ДАД ТА-1 [7] при уплотнении при температуре 130°С и 100°С незначительно улучшается.

Автором работы [8] для оценки уплотняемости были использованы значения средней плотности, полученной после уплотнения при температуре 100°C на гираторе-компакторе после 100 оборотов. Использование добавки Rediset WMX 1,5% от массы полимер-битумного вяжущего (ПБВ) для асфальтобетонной смеси из отсеков дробления на ПБВ 60 позволило увеличить среднюю плотность асфальтобетона на 1,3%, добавки Evotherm J1 в количестве 0,5% - на 1,0%, использование добавок Warmmix L при расходе 0,5% снизило плотность на 1,0%, а использование добавки Sasobit при ее расходе 2,0% от массы ПБВ снизило плотность на 1,3%. Для ЩМАС-20 на ПБВ60 использование добавки Rediset WMX с расходом 1,5% от массы ПБВ позволило увеличить среднюю плотность образцов на 0,7%, а использование добавки Evotherm J1 при расходе 0,5% от массы ПБВ увеличило плотность асфальтобетона на 0,5%.

Авторами была оценена уплотняемость щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси ЩМАС-15 с измененными параметрами формования (уплотнения) асфальтобетонных образцов: нагрузку на образец при формовании снизили с 16 до 10 тонн, а время уплотнения с 3 минут до 1,5 минут, температура формования составляла 80°C [9]. Уплотняемость щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси оценивалась по увеличению значений средней плотности асфальтобетона с низкотемпературными добавками по сравнению с асфальтобетоном без добавок. Как видно из таблицы 2, введение в смесь адгезионной добавки Амдор-10 не улучшает уплотняемость ЩМАС-15, введение добавки Ворммикс Л при расходе 1 и 2% улучшает уплотняемость на 0,4 и 0,8% соответственно, введение добавки Секабаз РТ 945 при расходе 1 и 2% улучшает уплотняемость на 0,4 и 1,3% соответственно, а введение добавки Evotherm J1 при расходе 1 и 2% улучшило уплотнение на 0,8 и 0,4% соответственно.

Уплотняемость щебеночно-мастичной и других асфальтобетонных смесей определяется состоянием и свойствами битумной прослойки между зернами щебня и песка. В битумной прослойке битум с минеральным порошком образуют асфальтовяжущее, которое характеризует микроструктуру асфальтобетона, в том числе и щебеночно-мастичного. Поверхность минерального порошка составляет большую часть общей поверхности минеральной части асфальтобетонной смеси. Таким образом, на частицы минерального порошка приходится большая часть поверхностных взаимодействий с битумом. Это обстоятельство становится особенно существенным при пониженных температурах уплотнения. По изменению физико-механических показателей асфальтовяжущего при уплотнении в разных режимах можно оценивать влияние низкотемпературных добавок на уплотняемость асфальтовяжущего и асфальтобетонной смеси.

Для оценки технологической и технической эффективности низкотемпературных добавок в асфальтобетоне авторами разработана методика оценки уплотняемости асфальтовяжущего с низкотемпературными добавками [10,11]. Для выявления влияния введенных добавок на уплотняемость асфальтовяжущего были приняты следующие параметры: нагрузка на образец составляла 4 тонны, а время уплотнения - 1,5 минуты при оптимальном количестве битума в смеси. Добавки Секабаз РТ 945 и Ворммикс Л вводились в смесь в количестве 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0% от массы битума. Содержание битума в смеси — 13%. Количество добавки на основе резинового порошка УНИРЕМ-001 во всех партиях испытуемых образцов не менялось и составляло 1,5% от массы минерального порошка. Изготовление образцов асфальтовяжущего проводилось при температурах от 60 до 140°C.

Коэффициент уплотняемости определяли, как отношение средней плотности асфальтовяжущего с добавкой при данной температуре уплотнения к средней плотности асфальтовяжущего без добавок при температуре уплотнения 140°C:

$$K_{\text{упт}}^{\text{a/b}} = \frac{\rho_n}{\rho_{140}}.$$

Значения коэффициента уплотняемости асфальтовяжущего при различном расходе низкотемпературных добавок и различных температурах приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Уплотняемость ШМАС-15 с различными добавками при температуре формования 80°С

№ п/п	Название добавки	Расход добавки, % от массы битума	Средняя плотность а/б образцов, г/см ³	Увеличение средней плотности, %	Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов R _с , МПа при 20°С
1	без добавок	-	2,37	-	2,74
2	Амдор-10	1	2,37	0	2,44
		2	2,37	0	2,26
3	Ворммикс Л	1	2,38	0,4	2,10
		2	2,39	0,8	1,99
4	Секабаз РТ 945	1	2,38	0,4	2,35
		2	2,40	1,3	2,29
5	Evotherm J1	1	2,39	0,8	3,05
		2	2,38	0,4	3,07

Таблица 3 – Значения коэффициента уплотняемости асфальто вяжущего с низкотемпературными добавками и добавкой УНИРЕМ-001

№ п/п	Температура уплотнения образцов, Т, °С	Коэффициент уплотняемости асфальто вяжущего при различном количестве низкотемпературных добавок, %, от массы битума							
		Секабаз РТ 945					Ворммикс Л		
		0,0	0,5	1,0	2,0	3,0	0,5	1,0	2,0
1	140	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,02
2	120	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,02
3	100	0,99	0,99	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	1,02
4	80	0,97	0,97	1,01	0,99	0,98	1,00	0,99	1,01
5	60	0,97	0,97	1,01	0,98	0,97	0,98	0,98	1,01

Из таблицы 3 видно, что введение низкотемпературных добавок позволяет достичь коэффициента уплотняемости больше 1 при температурах уплотнения 60–140°С при различном содержании добавок в асфальто вяжущем. Таким образом, введение добавок улучшает уплотняемость не только при пониженных температурах, но и при температурах уплотнения 100–140°С. При расходе добавок 1-2% в асфальто вяжущем и температурах уплотнения 80-140°С прочность образцов асфальто вяжущего на сжатие при 20°С в водонасыщенном состоянии изменяется незначительно в пределах 10-11 МПа [10].

Авторами была оценена уплотняемость полимерных добавок в асфальто вяжущем [11]. Для выявления влияния введенных добавок на уплотняемость асфальто вяжущего нагрузка на образец была снижена до 3 тонн, а время уплотнения до одной минуты при оптимальном количестве битума в асфальто вяжущем, равном 12% от массы битума. Коэффициент уплотняемости определяли, как отношение средней плотности образцов асфальто вяжущего

при температуре уплотнения 50°C к средней плотности образцов при температуре уплотнения 140°C.

В таблице 4 приведены сведения по уплотняемости и физико-механическим показателям асфальто вяжущего при температурах уплотнения 140°C и 50°C. На рисунке 1 приведены значения коэффициента уплотняемости асфальто вяжущего, а на рисунке 2 – значения водонасыщения.

Таблица 4 – Уплотняемость и физико-механические показатели асфальто вяжущего при пониженных температурах с различными полимерными добавками

№ п/п	Наименование и количество добавки в асфальто вяжущем, % от массы битума	Температура уплотнения, Т, °С	Средняя плотность, ρ , г/см ³	Коэффициент уплотняемости, $(K_{упл}=\rho_{50}/\rho_{140})$	Водонасыщение, W, %	Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов R_b , МПа, при 20°C	Предел прочности при сжатии при 50°C, R_{50} , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1	БНД 60/90 без добавок	140	2,28	0,98	0,36	6,20	2,29
		50	2,24		3,93	5,05	1,36
2	Honeywell Titan 7686 - 1,5	140	2,29	0,99	0,77	8,11	3,17
		50	2,27		1,80	6,10	1,85
3	Rediset WMX - 1,5	140	2,30	0,99	0,70	5,99	2,44
		50	2,28		1,90	4,79	1,63
4	Palmowax - 1,5	140	2,28	0,99	1,90	6,95	2,70
		50	2,25		3,90	5,25	1,62
5	РТЭП - 5,5	140	2,25	0,97	3,80	7,28	3,18
		50	2,19		7,00	4,93	2,15
6	Superplast - 5,0	140	2,19	0,97	6,10	6,28	2,97
		50	2,13		9,20	4,91	1,69
7	ДСТ 30-01 - 3,5	140	2,28	0,97	0,80	8,38	3,55
		50	2,21		5,50	5,53	1,99
8	Kibiton PB-5301- 3,5	140	2,29	0,98	0,11	7,56	3,67
		50	2,24		2,29	6,41	2,10

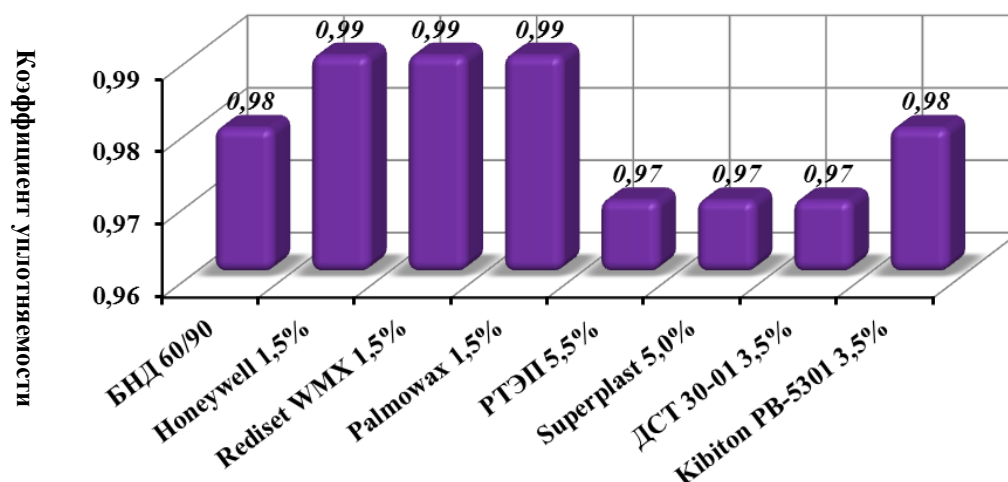


Рисунок 1 – Значения коэффициента уплотняемости асфальтовяжущего с различными полимерными добавками

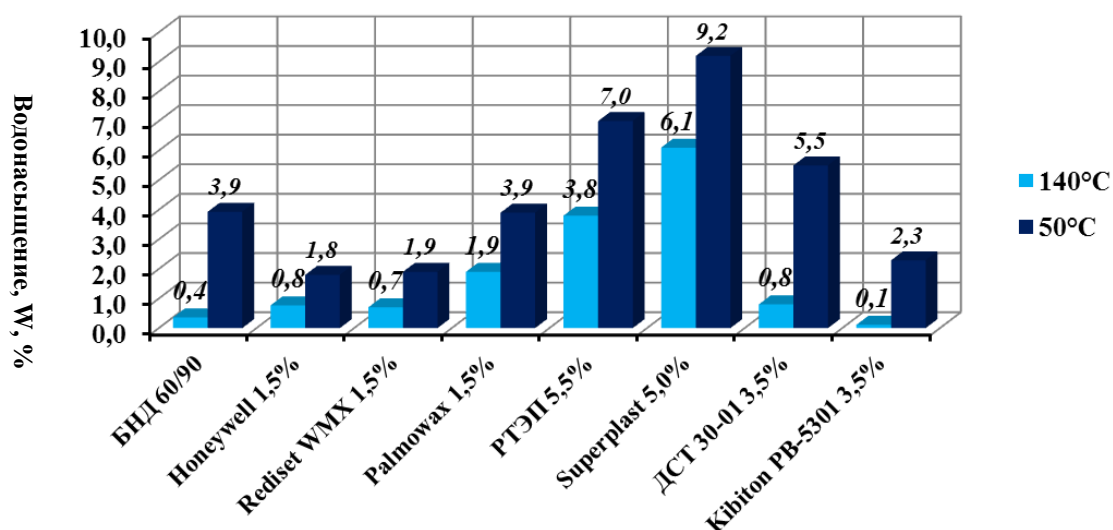


Рисунок 2 – Показатели водонасыщения W асфальтовяжущего с различными полимерными добавками, %

Из таблицы 4 и рисунков 1 и 2 видно, что все три добавки на основе синтетических восков — Honeywell Titan7686, Rediset WMX, Palmowax — улучшают уплотняемость асфальтовяжущего при температуре 50°C. При этом Honeywell Titan7686 и Rediset WMX снижают водонасыщение асфальтовяжущего почти вдвое по сравнению с асфальтовяжущим без добавок, Palmowax не снижает водонасыщения. Использование добавок РТЭП и Superplast класса термопластов ухудшает уплотняемость асфальтовяжущего при 50°C, а водонасыщение увеличивается с 4 до 7-9%. Добавки термоэластопластов ДСТ-30-01 и Kibiton PB-5301 по-разному влияют на уплотняемость. Введение ДСТ-30-01 ухудшает уплотняемость асфальтобетона незначительно и водонасыщение увеличивается на 1,5%. Введение добавки Kibiton PB-5301 не изменяет уплотняемость, уменьшая водонасыщение на 2%.

Результаты оценки уплотняемости асфальтовяжущего с жидкими, содержащими поверхностно-активные вещества, низкотемпературными добавками российского производства приведены в таблице 5. Как видно из таблицы 5, средняя плотность асфальтовяжущего при температуре уплотнения 50°C равна 2,24 г/см³, а коэффициент уплотняемости асфальтовяжущего без добавок составляет 0,98. Введение добавки Дорос-АП-Т

с расходом 0,5–2,0% и добавок Азол 1007 и ДАД-ТА-1 с расходом 1,0-2,0% повышает коэффициент уплотняемости асфальто вяжущего до 1,00. Добавки Амдор-ТС-1 и Адгезол-3-ТД незначительно увеличивают среднюю плотность асфальто вяжущего при температуре уплотнения 50°С (на 0,01-0,02 г/см³), коэффициент уплотняемости составляет 0,98-0,99.

Таблица 5 – Значения коэффициента уплотняемости и водонасыщения асфальто вяжущего с низкотемпературными добавками российского производства

№ п/п	Наименование добавки	Расход добавки в асфальто вяжущем, % от массы битума	Температура уплотнения, Т, °С	Средняя плотность, ρ, г/см ³	Коэффициент уплотняемости	Водонасыщение, W, %	Предел прочности при сжатии, МПа	
							при 20°С, R20	при 50°С, R50
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	БНД 60/90 без добавок	0,0	140	2,28	0,98	0,4	11,3	1,9
			50	2,24		3,9	12,4	1,3
2	Дорос-АП-Т	0,3	140	2,28	1,00	0,78	9,0	2,1
			50	2,27		2,13	8,1	1,3
		0,5	140	2,28	1,00	0,53	10,6	1,6
			50	2,27		1,35	9,9	1,7
		1,0	140	2,29	1,00	0,25	9,0	1,7
			50	2,28		0,77	8,7	1,09
		2,0	140	2,28	1,00	0,26	8,1	1,7
			50	2,28		0,57	9,1	1,4
		0,5	140	2,27	0,98	1,09	9,0	2,2
			50	2,24		4,20	8,3	1,1
3	Амдор-ТС-1	1,0	140	2,28	0,99	0,52	11,0	2,0
			50	2,26		1,56	9,7	1,2
		2,0	140	2,28	0,99	0,35	10,4	1,8
			50	2,26		1,51	9,6	1,2
		0,5	140	2,28	0,99	0,9	13,3	2,0
			50	2,26		2,0	12,0	1,3
4	Азол 1007	1,0	140	2,29	1,00	0,25	13,8	1,9
			50	2,27		0,4	12,0	1,3
		2,0	140	2,29	1,00	0,2	10,2	1,3
			50	2,28		0,34	9,4	0,9
		0,5	140	2,27	1,00	0,4	11,5	1,7
			50	2,26		1,0	10,4	1,1
5	Адгезол-3-ТД	1,0	140	2,26	0,98	2,1	14,3	2,1
			50	2,24		2,6	12,3	1,3
		2,0	140	2,28	0,99	0,7	12,9	2,1
			50	2,25		3,5	11,5	1,1
		0,5	140	2,28	0,99	0,2	10,3	1,7
			50	2,26		1,11	7,2	1,2
6	ДАД-ТА-1	1,0	140	2,29	0,99	0,3	10,4	2,0
			50	2,27		0,7	5,8	1,1
		2,0	140	2,30	1,00	0,1	10,3	1,5
			50	2,29		0,4	9,8	1,0
		0,5	140	2,28	0,99	0,2	10,3	1,7
			50	2,26		1,11	7,2	1,2

Следует обратить внимание на то, что для асфальтовяжущего, отформованного при 50°C, с увеличением расхода добавки Дорос-АП-Т от 0,3 до 0,5% средняя плотность образцов асфальтовяжущего остается неизменной, а водонасыщение снижается на 37%; с увеличением расхода с 1 до 2% средняя плотность образцов асфальтовяжущего остается неизменной, а водонасыщение снижается на 26% (таблица 5). Такое изменение физических свойств асфальтовяжущего можно объяснить тем, что в асфальтовяжущем с добавкой Дорос-АП-Т больше замкнутых, а не открытых пор [12], а также тем, что при водонасыщении образцов битумные прослойки более устойчивы к отслаивающему действию воды, чем в асфальтовяжущем без добавок.

На рисунке 3 показаны значения водонасыщения асфальтовяжущего при температуре уплотнения 50°C с различными добавками. Как видно из графика, введение добавок Дорос-АП-Т, Азол 1007 и ДАД-ТА-1 снижают водонасыщение образцов асфальтовяжущего, уплотненных при температуре 50°C, в два и более раза. С увеличением расхода добавок водонасыщение снижается. Добавка Амдор-ТС-1 при расходе 0,5% от массы битума практически не влияет на водонасыщение (повышает на 0,3%). При увеличении расхода добавки Амдор-ТС-1 водонасыщение снижается в 2,5 раза. Водонасыщение образцов асфальтовяжущего с добавкой Адгезол-3-ТД снижается в 4 раза при расходе добавки 0,5% от массы битума, в 1,5 раза – при расходе 1% и практически не изменяется при расходе 2%.

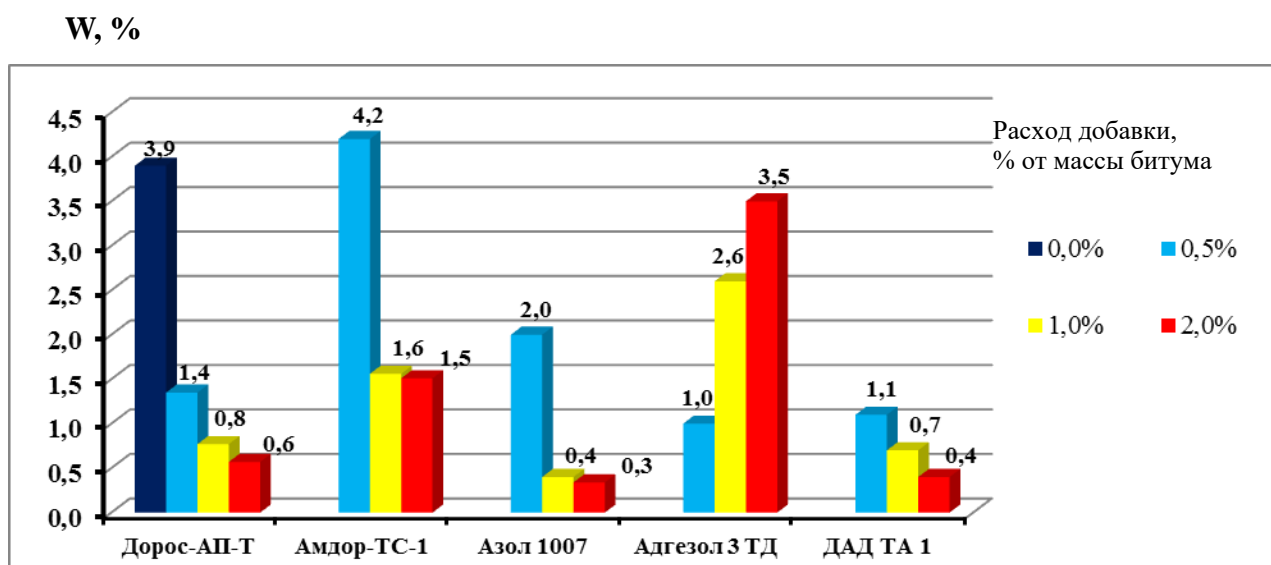


Рисунок 3 – Водонасыщение асфальтовяжущего W при температуре уплотнения 50°C с различными добавками

При использовании низкотемпературных добавок в технологии устройства асфальтобетонных покрытий [13] расход добавок составил 0,5-0,7% от массы битума, что было достаточно для уплотнения асфальтобетонных слоев при пониженных температурах воздуха. Как видно из вышеприведенных данных, выраженный технологический эффект улучшения уплотняемости как для асфальтовяжущего, так и для асфальтобетонных смесей, отмечается при расходе добавок 1-2% от массы вяжущего, что объясняется сложностью моделирования и обеспечения при лабораторном изготовлении образцов режимов уплотнения и температурных условий, имеющихся в реальных условиях укладки и уплотнения асфальтобетонных слоев.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. На основе исследований разных авторов показано, что введение жидких низкотемпературных добавок при стандартных условиях лабораторного уплотнения позволяет улучшить уплотняемость асфальтобетонных смесей типов А, Б и ЦМАС-15 при 80-100°C,

характеризующуюся коэффициентом уплотняемости 0,98 – 1,00. При этом наблюдается некоторое снижение физико-механических показателей, но в пределах допустимых ГОСТ 9128-2009 и 9128-2013, а с добавкой ДАД-ТА-1 показатели незначительно улучшаются.

2. Введение в битум жидких низкотемпературных добавок и уплотнении ЦМАС-15 в измененных условиях при сниженной нагрузки формования 10 т, уменьшенном времени формования 1,5 минуты и температуре формования 80°C улучшает уплотняемость смеси на 0,4 – 1,3 %. При этом прочность в водонасыщенном состоянии при 20°C образцов ЦМА-15 с добавкой Evotherm J1 незначительно увеличивается по сравнению с образцами ЦМА-15 без добавок, с добавкой Секабаз РТ 945 незначительно снижается, с добавкой Вормикс Л снижается на 23,4 %.

3. Введение низкотемпературных добавок Секабаз РТ 945 и Вормикс Л в асфальто вяжущее с добавкой УНИРЕМ-001 на основе активного резинового порошка позволяет достичь значения коэффициента уплотняемости асфальто вяжущего больше 1,0 при температурах уплотнения 140-60°C при различном содержании добавок в асфальто вяжущем. При расходе добавок 1-2 % в асфальто вяжущем и при температурах 140-80°C прочность образцов асфальто вяжущего в водонасыщенном состоянии изменяется незначительно в пределах 10-11 МПа.

4. Низкотемпературные полимерные добавки на основе синтетических восков Honeywell Titan 7686, Rediset WMX, Palmowax – незначительно улучшают уплотняемость асфальто вяжущего при 50°C. При этом снижается прочность водонасыщенных образцов при 20°C и прочность при 50°C. Использование добавок класса термопластов и термоэластопластов, не относящихся к низкотемпературным, ухудшает уплотняемость асфальто вяжущего при 50°C, а добавка Kibiton PB-5301 не изменяет уплотняемость.

5. Низкотемпературные жидкие добавки российского производства, содержащие поверхностно-активные вещества, улучшает уплотняемость асфальто вяжущего в рассмотренном диапазоне дозировок от 0,3 до 2 % при пониженных температурах. При расходе добавки Дорос-АП-Т 0,5 % с понижением температуры уплотнения до 50°C прочность при 50°C не изменяется, а при 20°C изменяется незначительно. Для асфальто вяжущего с другими низкотемпературными добавками при температуре уплотнения 50°C наблюдается уменьшение прочности при 50°C примерно на 30-50 % и незначительное уменьшение прочности при 20°C по сравнению с уплотнением при 140°C.

6. Наибольшую эффективность, выражающуюся в улучшении уплотняемости при пониженных температурах, проявляют жидкие низкотемпературные добавки, содержащие поверхностно-активные вещества.

7. Предложенные режимы лабораторного уплотнения асфальтобетонных смесей и асфальто вяжущего и оценка уплотняемости по коэффициентам уплотняемости позволяют дать оценку эффективности низкотемпературных добавок. Пониженные температурные диапазоны уплотнения асфальтобетонных смесей при использовании низкотемпературных добавок необходимо определять на основе предельно допустимой температуры уплотнения, при которой не происходит ухудшения физико-механических показателей свойств асфальтобетона.

8. Для предварительной оценки эффективности и определения возможностей низкотемпературных добавок предлагается проводить оценку уплотняемости асфальто вяжущего, далее оценить уплотняемость асфальтобетонной смеси и проверить полученные дозировки добавок и значения пониженных температурных диапазонов уплотнения в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев И.В., Агеева Е.Н., Головкин В.А., Фоменко Г.Р. Дорожный теплый асфальтобетон. Киев: Вища школа, 1975. 156с.
2. Королев И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. - М.: Транспорт, 1986. 149с.
3. Temperaturabgesenkte Aspalte. Ratschläge aus der Praxis für die Praxis. Bonn: Deutscher Asphaltverband

е.В., 2009. 47 р.

4. Использование добавок SECABASE RT BiO и SECABASE RT 945 для снижения температуры уплотнения асфальтобетона : отчет о НИР/ ОАО «Омский СоюздорНИИ»; зав.лаб. Некрасова О.С., В.И. Зубкова; исполн.: Микодина М.Ф. и др. - Омск, 2008.-32с.

5. Лабораторные испытания асфальтобетонных смесей: ЦМА, горячая мелкозернистая плотная тип А, I марки, пористая крупнозернистая I марки, приготовленных с применением органических вяжущих веществ и добавки «Evotherm J-1»: отчет / ООО «ДорТрансНИИ»; ответств. исполн. Мардиросова И.В., Чернов С.А. - Ростов-на-Дону, 2011.- 28с.

6. Лабораторные испытания горячей мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси типа А, I марки приготовленной с применением битума нефтяного дорожного марки БНД 60/90 и добавки «Адгезол 3-ТД»/ ООО «Доринжсервис»; руковод. Чернов С.А., исполн.: Мардиросова И.В. и др. - Ростов-на-Дону, 2015.-17с.

7. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Холопов В.С., Траумвайн А.И. Добавка в асфальтобетонные смеси для продления сезона дорожного строительства // Фундаментальные исследования. 2014. №11. С. 2395-2399.

8. Колесник Д.А. Выбор модификатора асфальтобетона для расширения строительного сезона // Мир дорог. 2013. №71. С.47-49.

9. Соломенцев А.Б., Куликова А.В. Уплотняемость щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с различными добавками при пониженных температурах // Строительство и реконструкция. 2012. №6. С.102-107.

10. Соломенцев А.Б., Куликова А.В. Уплотняемость асфальтовяжущего с добавками для теплого асфальтобетона и добавкой УНИРЕМ-001 // Строительство и реконструкция. 2013. №5. С.73-78.

11. Соломенцев А.Б., Куликова А.В., Бухтияров С.В. Сравнительная оценка некоторых свойств дорожного битума с различными полимерными добавками и асфальтовяжущего на его основе // Строительство и реконструкция. 2014. №2. С.69-78.

12. Соломенцев А.Б., Шестопапов А.А. Пути повышения однородности распределения пор в асфальтобетоне // Пути совершенствования технологии производства и повышения качества дорожно-строительных материалов. Труды МАДИ. М.: МАДИ, 1987. С. 129-134.

13. Соломенцев А.Б. Опыт использования жидких добавок для теплого асфальтобетона российского производства при устройстве нижних слоев покрытий на федеральных автодорогах // «Применение разновидностей дорожного асфальтобетона в России». Материалы III международной конференции, 1-2 декабря 2016 года. М.: MAX Conference, 2016. С. 18-25.

Соломенцев Александр Борисович

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел, Россия,

доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»,

E-mail: absolomentsev@mail.ru

SOLOMENTSEV A.B.

EVALUATING COMPACTIBILITY OF ASPHALT MIXTURES AND MASTIC LAYER WITH LOW-TEMPERATURE ADDITIVES

Based on the analysis of literary sources and data of various authors assessed the compactibility of asphalt mixtures at low temperature with additives of foreign and Russian production proposed by the author, the coefficient of compactibility. Estimated compactibility of stone mastic asphalt mix XMAS-15 with various additives at a temperature of 80°C to increase the average density of asphalt samples. Determined coefficient of compactibility of asphalt binders when used together, the low-temperature additives and additives based on rubber powder, and also for asphalt binders with different polymer additives. Determined coefficient of compactibility of asphalt binder with liquid containing surface-active substances, low-temperature additives of Russian production. It is established that expressed the technological effect of improving compactibility in the laboratory at low temperatures is observed in the low-temperature flow additives 1-2% by weight of the binder.

Key words: asphalt concrete, asphalt binder, the compactibility of asphalt mixtures and asphalt binders, the low temperature additives, the assessment of compactibility the compactibility factor.

REFERENCES

1. Korolev I.V., Ageyeva Ye.N., Golovko V.A., Fomenko G.R. Dorozhnyy tepleyy asfal'tobeton [Road warm

- asphalt concrete]. Kiyev: Vishcha shkola, 1975. 156 p. (rus)
2. Korolev I.V. Puti ekonomii bituma v dorozhnom stroitel'stve [Ways to save bitumen in road construction]. Moscow:Transport, 1986. 149 p. (rus)
 3. Temperaturabgesenkte Aspalte. Ratschläge aus der Praxis für die Praxis.- Bonn: Deutscher Asphaltverband e.V., 2009.- 47 p.
 4. Ispol'zovaniye dobavok SECABASE RT BiO i SECABASE RT 945 dlya snizheniya temperatury uplotneniya asfal'tobetona : otchet o NIR/ OAO «Omskiy SoyuzdorNII»; zav.lab. Nekrasova O.S., V.I. Zubkova; ispoln.: Mikodina M.F. i dr [Use of SECABASE RT BiO and SECABASE RT 945 additives to reduce the asphalt compacting temperature: report on R & D / JSC "Omsk SoyuzdorNII"; Head of laboratory. Nekrasova OS, V.I. Zubkov; Exec .: Mikodina M.F. and others]. - Omsk, 2008.-32p. (rus)
 5. Laboratornyye ispytaniya asfal'tobetonnykh smesey: SHCHMA, goryachaya melkozernistaya plotnaya tip A, I marki, poristaya krupnozernistaya I marki, prigotovlennykh s primeneniym organicheskikh vyazhushchikh veshchestv i dobavki «Evotherm J-1»: otchet / OOO «DorTransNII»; otvetstv. ispoln. Mardirosova I.V., Chernov S.A. [Laboratory tests of asphalt-concrete mixtures: SCHM, hot fine-grained dense type A, I grades, porous coarse-grained I grades, prepared with the use of organic binders and additive "Evotherm J-1": report / LLC "DorTransNII"; Responsibilities. executed. Mardirosova IV, Chernov SA] - Rostov-na-Donu, 2011.- 28p. (rus)
 6. Laboratornyye ispytaniya goryachey melkozernistoy plotnoy asfal'tobetonnoy smesi tipa A, I marki prigotovlennoy s primeneniym bituma neftyanogo dorozhnogo marki BND 60/90 i dobavki «Adgezol 3-TD»/ OOO «Dorinzhservis»; rukovod. Chernov S.A., ispoln.: Mardirosova I.V. i dr. [Laboratory tests of a hot fine-grained dense asphalt-concrete mixture of type A, I brand produced with the use of bitumen of oil road mark BND 60/90 and additives "Adgezol 3-TD" / LLC "Dorinzhservis"; leadership. Chernov SA, executive director: Mardirosova I.V. and others] - Rostov-na-Donu, 2015.- 17p. (rus)
 7. Yadykina V.V., Gridchin A.M., Kholopov V.S., Traumvain A.I. Dobavka v asfal'tobetonnyye smesi dlya prodleniya sezona dorozhnogo stroitel'stva [Additive to asphalt mixes to extend the season of road construction]. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2014. No 11. Pp: 2395-2399. (rus)
 8. Kolesnik D.A. Vybory modifikatora asfal'tobetona dlya rasshireniya stroitel'nogo sezona [The choice of asphalt concrete modifier for the expansion of the construction season]. *Mir dorog*. 2013. No 71. Pp: 47-49. (rus)
 9. Solomentsev A.B., Kulikova A.V. Uplotnyayemost' shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonnykh smesey s razlichnymi dobavkami pri ponizhennykh temperaturakh [Sealability of macadam-mastic asphalt-concrete mixtures with various additives at low temperatures]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2012. No 6. Pp: 102-107. (rus)
 10. Solomentsev A.B., Kulikova A.V. Uplotnyayemost' asfal'tovyazhushchego s dobavkami dlya teplogo asfal'tobetona i dobavkoy UNIREM-001 [Asphalt sealability with additives for warm asphalt concrete and UNIREM-001 additive]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2013. No 5. Pp: 73-78. (rus)
 11. Solomentsev A.B., Kulikova A.V., Bukhtiyarov S.V. Sravnitel'naya otsenka nekotorykh svoystv dorozhnogo bituma s razlichnymi polimernymi dobavkami i asfal'tovyazhushchego na yego osnove [Comparative evaluation of some properties of road bitumen with various polymer additives and asphalt on its basis]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2014. No 2. Pp: 69-78. (rus)
 12. Solomentsev A.B., Shestopalov A.A. Puti povysheniya odnorodnosti raspredeleniya por v asfal'tobeton [Ways to increase the uniformity of pore distribution in asphalt concrete]. Puti sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i povysheniya kachestva dorozhno-stroitel'nykh materialov. Trudy MADI [Ways to improve the technology of production and improving the quality of road building materials. Proceedings of MADI]. Moscow: MADI, 1987. Pp: 129-134. (rus)
 13. Solomentsev A.B. Opyt ispol'zovaniya zhidkikh dobavok dlya teplogo asfal'tobetona rossiyskogo proizvodstva pri ustroystve nizhnikh sloyev pokrytiy na federal'nykh avtodorogakh [Experience in the use of liquid additives for warm asphalt concrete of the Russian production at the device of the lower layers of coatings on federal highways] *Primeneniye raznovidnostey dorozhnogo asfal'tobetona v Rossii*. Materialy III mezhdunarodnoy konferentsii, 1-2 dekabrya 2016 goda ["Application of varieties of road asphalt in Russia". Proceedings of the III International Conference, December 1-2, 2016]. Moscow: MAX Conference, 2016. Pp: 18-25. (rus)

Solomentsev Alexander Borisovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
 associate professor of the department "Construction of highways",
 E-mail: absolomentsev@mail.ru

ЩЕПОЧКИНА Ю.А., БЫКОВ И.А.

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН С ВКЛЮЧЕНИЕМ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Большое количество отходов поливинилхлорида (в виде обрезков), требующих утилизации, образуется при массовом производстве и замене водопроводных труб. Проведена оценка возможностей использования в составе мелкозернистого бетона отходов поливинилхлорида в виде измельченных обрезков водопроводных труб. Показано влияние формы частиц поливинилхлорида на прочность мелкозернистого бетона.

Проведенные исследования подтверждают, что введение в состав мелкозернистого бетона измельченных обрезков поливинилхлоридных труб приводит к повышению его прочности на изгиб и сжатие, при этом рациональным количеством вводимого отхода является 1-2 мас.%. Показано, что для увеличения прочности на изгиб мелкозернистого бетона целесообразно использовать полученные при измельчении обрезков труб целые кольца и полукольца, на сжатие – четверти колец. Выявлено, что с увеличением количества введенного поливинилхлорида (независимо от формы его частиц) плотность мелкозернистого бетона снижается.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, поливинилхлорид, обрезки труб

Мелкозернистый бетон находит в строительстве все большее применение. Повсеместное его использование обусловлено отсутствием крупного заполнителя, что упрощает приготовление, транспортировку, укладку. Но, как и у бетона на крупном заполнителе, для мелкозернистого бетона прочность является одним из важнейших свойств. Для обеспечения прочности мелкозернистого бетона с 70-х годов прошлого века широко используются различные армирующие добавки [1, 2], в том числе измельченные пластмассы. В последние годы мелкозернистые бетоны, модифицированные добавками измельченных пластмасс [3-9], получили новое развитие. Это особенно актуально, если учитывать, что ежегодно в современном мире накапливается до 20 млн. т отходов пластмасс, из них 15-30 % подвергается дальнейшей переработке, 20-40 % сжигается, а остальные 35-70 % складываются на полигонах, свалках или закапываются в землю [10]. Самым распространенным полимерным материалом является поливинилхлорид [11]. Большое количество отходов поливинилхлорида (в виде обрезков), требующих утилизации, образуется при массовом производстве и замене водопроводных труб (с наружным диаметром 22 мм и толщиной стенки 4 мм) и их замене.

Целью данного исследования была оценка возможности использования в составе мелкозернистого бетона измельченных обрезков поливинилхлоридных водопроводных труб, а также изучение влияния формы частиц поливинилхлорида на прочность конечного продукта.

Перед введением в бетонную смесь обрезки труб нарезали кольцами, полукольцами, четвертями кольцами толщиной 3-4 мм, рис. 1, 2.



Рисунок 1 – Нарезанные кольцами обрезки поливинилхлоридных труб

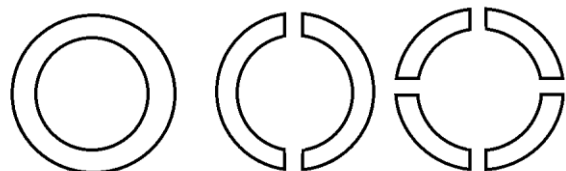


Рисунок 2 – Формы частиц измельченного поливинилхлорида

Составы бетонных смесей с включением частиц измельченного поливинилхлорида в виде целых колец, полуколец и четвертей колец, полученных из обрезков поливинилхлоридных труб, приведены в табл. 1-3.

Таблица 1 – Составы бетонной смеси с включением целых колец

Компоненты	Содержание , мас %						
	1	2	3	4	5	6	7
Портландцемент М500	25	25	25	25	25	25	25
Песок кварцевый	75	74,5	74	73	72	71	70
Целые кольца		0,5	1	2	3	4	5
Водоцементное отношение	0,5						

Таблица 2 – Составы бетонной смеси с включением полуколец

Компоненты	Содержание , мас %						
	8	9	10	11	12	13	14
Портландцемент М500	25	25	25	25	25	25	25
Песок кварцевый	75	74,5	74	73	72	71	70
Полукольца		0,5	1	2	3	4	5
Водоцементное отношение	0,5						

Таблица 3 – Составы бетонной смеси с включением четвертей колец

Компоненты	Содержание , мас %						
	15	16	17	18	19	20	21
Портландцемент М500	25	25	25	25	25	25	25
Песок кварцевый	75	74,5	74	73	72	71	70
Четверти колец		0,5	1	2	3	4	5
Водоцементное отношение	0,5						

Из приготовленных бетонных смесей (осадка конуса 1-2 см) были изготовлены стандартные образцы-балочки размером 160×40×40 мм. Исследование прочности мелкозернистого бетона проводилось в возрасте 28 сут. Результаты испытаний представлены на рис. 3-5.

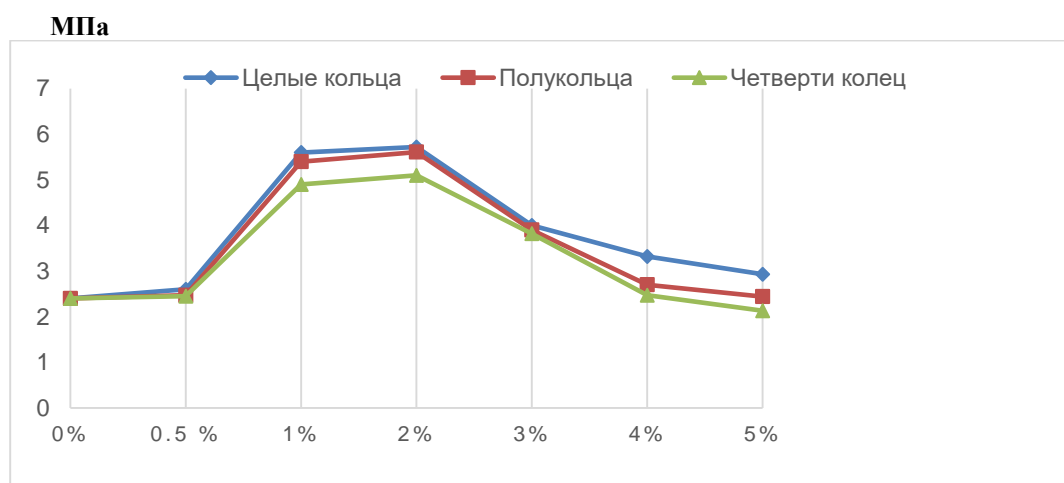


Рисунок 3 – Прочность на изгиб мелкозернистого бетона с включением частиц измельченного поливинилхлорида

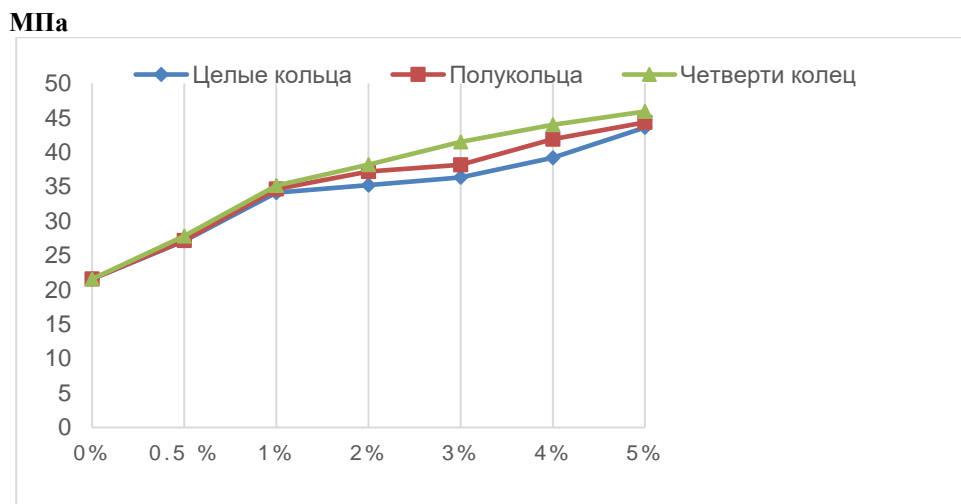


Рисунок 4 – Прочность на сжатие мелкозернистого бетона с включением частиц измельченного поливинилхлорида

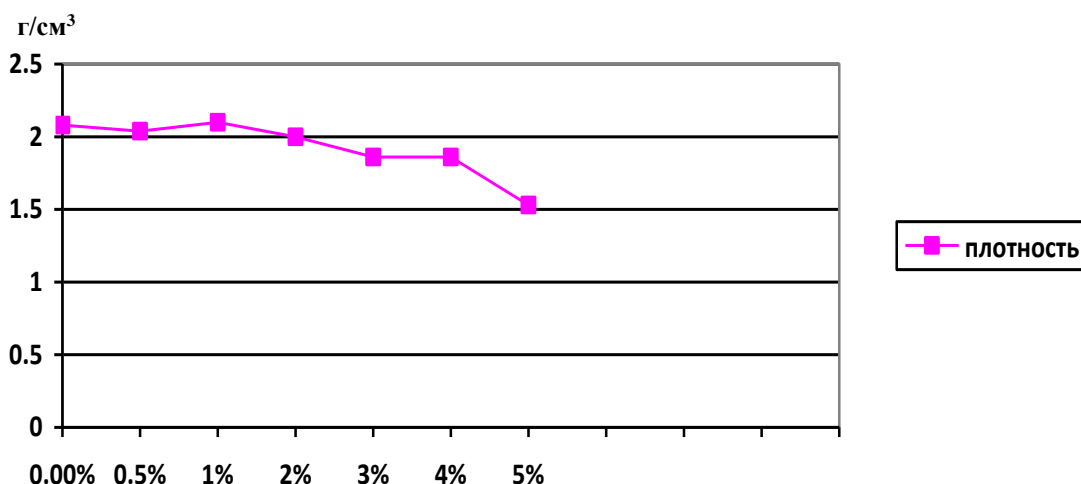


Рисунок 5 – Плотность мелкозернистого бетона с включением частиц измельченного поливинилхлорида

Как видно из результатов испытаний, представленных на рис. 3 и 4, введение в состав мелкозернистого бетона измельченных обрезков поливинилхлоридных труб приводит к повышению его прочности на изгиб и сжатие, при этом рациональным количеством вводимого отхода является 1-2 мас.%. Отметим, что для увеличения прочности на изгиб мелкозернистого бетона целесообразно использовать целые кольца и полукольца, на сжатие – четверти колец. При этом выявлено, что с увеличением количества введенного поливинилхлорида (независимо от формы его частиц) плотность мелкозернистого бетона снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов Б.А. Фибробетон и перспективы его применения в строительстве // Фибробетон и его применение в строительстве / Сб. науч. тр. под ред. Б.А. Крылова, К.М. Королева. М.: НИИЖБ, 1979. С. 4-11.
2. Дисперсно-армированный бетон и изделия из него. Тематическая подборка. Рига: ЛатНИИТИ, 1979. 44 с.
3. Майорова Л.С. Модифицирование мелкозернистых цементных бетонов минерально-полимерными отходами: дисс. канд. техн. наук. Волгоград, 2007. 188 с.

4. Langier B., Werner K., Baranowski W. Modyfikacje betonu dodatkiem rozdrobnionego polipropylenu // *Przetwórstwo tworzyw*. 2014. No 4. Ss: 299-304.
5. Щепочкина Ю.А., Быков И.А. Модификация мелкозернистого бетона добавками измельченной пластмассы // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4. С. 129-132.
6. Jongcheng Ji, Jial J. Kim. Effect of sulfuric acid on durability characteristics of CFRP composite sheets // *Journal of materials in civil engineering*. October 2017. Vol. 29, issue 10-04017159-1...0401715911.
7. Mahmoud K., Ghazy A. Bassuoni M.J., El-Salakawy E. Properties of nanomodified fiber-reinforced cementitious composites // *Journal of materials in civil engineering*. October 2017. Vol. 29, issue 10-04017173-1...04017173-12.
8. Гусев Б.В. Ин Иен-лян С., Кузнецова Т.В. Цементы и бетоны – тенденции развития. М.: Научный мир, 2012. 136 с.
9. Jarabo R., Fuente E., Savastano H., Negro C. Effect of sepiolite on mechanical and physical properties of fiber cement // *ACI materials journal*. July-august 2014. Vol. 111. No. 4. Pp. 355-362.
10. Корчагина В.И., Андреева С.А. Анализ экологических проблем использования полимерных строительных материалов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2010. № 6. С. 22-23.
11. Юхневский П.И., Широкий Г.Т. Строительные материалы и изделия. Минск: УП «Технопринт», 2004. 476 с.

Щепочкина Юлия Алексеевна

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Россия,

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы»

E-mail: julia2004ivanovo@yandex.ru.

Быков Игорь Алексеевич

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Россия,

Аспирант кафедры «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы»

E-mail: yakuba_i@mail.ru

SHCHEPOCHKINA J.A., BYKOV I.A.

**FINE CONCRETE WITH THE INCLUSION
OF CRUSHED POLYVINYLCHLORIDE**

It is noted that a particularly large amount of waste of polyvinyl chloride (in the form of scraps), requiring recycling, is formed by mass production and replacement of water pipes. An assessment of the capacity of use in the fine aggregate concrete waste polyvinyl chloride in the form of ground scraps of water pipes. The influence of polyvinyl chloride particle shape on the strength of fine-grained concrete is shown.

The conducted researches confirm that introduction in structure of fine-grained concrete of the crushed scraps of polyvinyl chloride pipes leads to increase of its durability on a bend and compression, thus the rational quantity of the entered waste is 1-2 mas. %. It is shown that to increase the bending strength of fine – grained concrete, it is advisable to use the whole rings and half rings obtained by grinding the pipe scraps, and to compress them into quarters of rings. It is revealed that with the increase in the amount of polyvinyl chloride introduced (regardless of the shape of its particles), the density of fine-grained concrete decreases.

Keywords: *fine-grained concrete, polyvinyl chloride, pipe trimming*

REFERENCES

1. Krylov B.A. Fibrobeton i perspektivy ego primeneniya v stroitelstve [Fibre-concrete and prospects of its use in construction] // *Fibrobeton i ego primeneniye v stroitelstve* [Fibro-concrete and its application in construction]. Proceedings, edited by B.A. Krylova, K.M. Koroleva. Moscow: NIIB, 1979. Pp: 4-11. (rus)

2. Dispersno-armirovannyi beton i izdeliya iz nego. Tematicheskaya podborka [Dispersion-reinforced concrete and articles thereof. Thematic selection]. Riga: LatNIINTI, 1979. 44 p. (rus)
3. Majorova L.S. Modificirovanie melkozernistyykh cementnykh betonov mineralno-polimernymi otkhodami: [Modification of fine-grained cement concretes with mineral-polymeric waste]. Diss. Cand. Tech. Sc. Volgograd, 2007. 188 p. (rus)
4. Langier B., Werner K., Baranowski W. Modyfikacje betonu dodatkiem rozdrobnionego polipropylenu. *Przetwórstwo tworzyw*. 2014. No 4. Pp: 299-304.
5. Shchepochkina Ju. A., Bykov I.A. Modifikaciya melkozernistogo betona dobavkami izmelchennoi plast-massy [Modification of fine-grained concrete with additives of crushed plastic]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 4. – Pp: 129-132. (rus)
6. Jongcheng Ji, Jail J. Kim. Effect of sulfuric acid on durability characteristics of CFRP composite sheets // *Journal of materials in civil engineering*. October 2017. Vol. 29, issue 10-04017159-1...0401715911.
7. Mahmoud K., Ghazy A. Bassuoni M.J., El-Salakawy E. Properties of nanomodified fiber-reinforced cementitious composites // *Journal of materials in civil engineering*. October 2017. Vol. 29, issue 04017173-1...04017173-12.
8. Gusev B.V.. In Jen-lyan C., Kuznetsova T.V. *Cementy i betony – tendencii razvitiya*. M.: Nauchnyi mir, 2012. 136 p. (rus)
9. Jarabo R., Fuente E., Savastano H., Negro C. Effect of sepiolite on mechanical and physical properties of fiber cement // *ACI materials journal*. July-august 2014. Vol. 111. No. 4. Pp. 355-362
10. Korchagina V.I., Andreeva S.A. Analiz ekologicheskikh problem ispolzovaniya polimernykh stroitelnykh materialov [Analysis of environmental problems in the use of polymer building materials]. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, technologii XXI veka*. 2010. No 6. Pp: 22-23. (rus)
11. Yukhnovsky V.I., Shirokyi G.T. *Stroitelnye materialy i izdeliya* [Building materials and products]. Minsk: UP «Technoprint», 2004. 476 p. (rus)

Shchepochkina Julia A.

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia,

Doctor of technical science, professor of department «Building materials science, special technologies and technological complexes»

E-mail: julia2004ivanovo@yandex.ru

Bykov Igor A.

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia,

Post-graduate of department «Building materials science, special technologies and technological complexes»

E-mail: yakuba_i@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит **от 4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый объем – не менее 100 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте www.build.oreluniver.ru

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 777-318

www.oreluniver.ru

E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.
+7 (4862) 73-43-49

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор С.Ю. Савин
Компьютерная верстка С.Ю. Савин

Подписано в печать 14.08.2018 г.
Дата выхода в свет 21.08.2018 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 6,43.
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №_____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической
базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.