

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.
Желтjikова И.В. канд. филос. наук, доц.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук., проф.
Зомитева 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)
Римшин 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

Бузало Н.А., Канунников А.В. Определение коэффициента значимости строительных конструкций при оценке технического состояния зданий ...	3
Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции ...	12
Селяев В. П., Селяев П. В., Сорокин Е.В., Алимов М. Ф. Аналитическое описание диаграмм деформирования бетона для расчета прогибов пластин из нелинейно деформируемого материала	22
Шапиро Г.И., Шапиро А.Г., Логинов Б.А. К вопросу о фрактурграфии бетона	31

Безопасность зданий и сооружений

Бакаева Н.В., Калайдо А.В. Обеспечение радиационно-экологической безопасности объектов строительства	39
Горин В.А., Клименко В.В., Пороженко М.А. Исследование звукоизоляции многослойных междуэтажных перекрытий	46

Архитектура и градостроительство

Алексеенко В.Н., Михеева Ю.Л. Влияние различных систем климатизации на формирование микроклимата реставрируемых объектов культурного наследия в Крыму	52
Козлов В.В. Вопросы точности расчета приведенного сопротивления теплопередаче и температурных полей	62
Неклюдюв А.Ю. Развитие современного расчета потребления энергии на отопление и вентиляцию	75
Шубин И.Л., Антонов А.И., Яровая Т.С. О возможности расчета шума в децибелах «А» в местах массового пребывания людей	83

Строительные материалы и технологии

Езерский В.А., Кузнецова Н.В., Бессонов И.В., Селезнев А.Д. Многокритериальный сравнительный анализ при оценке качества цементных композитов с использованием отходов ЦСП	89
Степанов М.В., Моисеенко Г.А. Развитие экспериментального подхода к определению меры ползучести мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при рациональном содержании фибры	98
Умнякова Н.П., Потапова Г.А., Потапова Е.Д., Султыгова П.С. Исследование теплозащитных качеств сталефибробетона	105

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)*
Sergeyчук 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 technology and mass communications

The certificate of registration:
ПН №ФС 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

- Buzalo N. A., Kanunnikov A.V.** *Determination of the coefficient of significance of building structures in assessing the technical condition of buildings* 3
Krishan A.L., Rimshin V. I., Astafeva M.A. *Strength of centrally compressed pipe elements of improved design* 12
Selyaev V. P., Selyaev P. V., Alimov M. F., Sorokin E. V. *Analytical description of concrete deformation diagrams for the calculation of plastic surfaces from nonlinearly deformable material* 22
Shapiro G. I., Shapiro A. G., Loginov B. A. *To the question fractography of the concrete* 31

Building and structure safety

- Bakaeva N.V., Kalaydo A.V.** *Ensuring the radiation-ecological safety of constructions* 39
Gorin V.A., Klimenko B.B., Porozhenko M.A. *Research of sound insulation of multilayered interfloor overlappings* 46

Architecture and town-planning

- Alekseenko V.N., Mikheyeva Y.L.** *Influence of various climatic systems on formation of microclimate of restored objects of cultural heritage to Crimea* 52
Kozlov V.V. *Accuracy of calculation of the resistant resistance of heat transfer and temperature fields* 62
Neklyudov A. Yu. *Development of modern calculation of consumption energy for heating and ventilation* 75
Shubin I.L., Antonov A.I., Yarovaya T.S. *On the possibility of calculation of noise in decibels "A" in places of mass stay of people* 83

Construction materials and technologies

- Ezerskiy V.A., Kuznetsova N.V., Seleznev A.D.** *Multi-criteria comparative analysis with the estimate of the quality of cement composites with the use of CBPB waste* 89
Stepanov M.V., Moiseenko G.A. *Elaboration of the experimental approach to determination of measure of the creep of fine-grained high-strength concrete and high-strength steel fiber concrete with a rational fiber content* 98
Umnyakova N.P., Potapova G.A., Potapova E.D., Sulygova P.S. *Investigation of thermal protective quality of steel-fibrobeton* 105

УДК 69.059

БУЗАЛО Н.А., КАНУННИКОВ А.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗНАЧИМОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ

Обследование эксплуатируемых зданий и сооружений подразумевает в качестве итога определение технического состояния объекта, которое напрямую связано с определением износа отдельных конструктивных элементов и всего сооружения в целом. При решении этой задачи необходимо установить, как влияет работоспособность отдельного конструктивного элемента здания на работоспособность здания или сооружения в целом. Для перехода от оценки износа отдельных конструктивных элементов к оценке износа всего здания вводятся коэффициенты значимости строительных конструкций. Авторы рассматривают варианты применяемых на практике способов определения коэффициента значимости конструктивных элементов, приводят их сравнение и предлагают использовать методику, основанную на определении энтропии системы. Предлагаемая методика расчета коэффициентов значимости строительных конструкций обладает рядом преимуществ по сравнению с известными методиками. Приводится пример определения коэффициентов значимости конструктивных элементов для производственного здания.

Ключевые слова: оценка технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений; коэффициенты значимости конструктивных элементов; энтропия системы.

Оценка возможности дальнейшей безаварийной эксплуатации существующих зданий и сооружений – основная задача, которая ставится заказчиком перед специалистами, выполняющими обследование. Заказчик должен получить полное заключение по итогам обследования технического состояния объекта, которое включает в себя оценку технического состояния (категорию технического состояния) и материалы, обосновывающие принятую категорию технического состояния объекта. Для оценки технического состояния эксплуатируемых зданий производится их поэлементное обследование. При этом для перехода от оценки износа отдельных конструктивных элементов к оценке износа всего здания вводятся коэффициенты значимости строительных конструкций.

Определение коэффициента значимости осуществляется с помощью различных методик, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. Для удобства рассмотрения их можно разделить на три группы.

Группа 1. Стоимостные методики, в которых за основу оценки принята доля восстановительной стоимости отдельной конструкции, элемента или системы в общей восстановительной стоимости здания. К ним относится методика, использованная в ВСН 53-86(р) «Правила оценки физического износа жилых зданий» [1]. Главным недостатком методик данного типа, по мнению авторов, является отсутствие прямой связи между стоимостью строительных конструкций и их значимостью в обеспечении несущей способности здания. Следуя такой логике, при равных параметрах здания, стена, выполненная из дорогого кирпича, будет иметь большее значение, чем аналогичная, выполненная из простого силикатного кирпича, а дорогие обои могут иметь большее значение, чем стена, на которую они наклеены. Для проведения обследования зданий, с целью определения затрат на их дальнейшую эксплуатацию, такой метод вполне обоснован, но для оценки их безопасной эксплуатации - абсолютно не применим.

Группа 2. Методики, основанные на экспертных оценках. Данная группа методик отличается большим разнообразием подходов, зачастую должным образом не обоснованных. На практике значимость конструкции принимается экспертами произвольно, исходя из собственного опыта, знаний и субъективной оценки. Коэффициенты значимости строительных конструкций, основанные на экспертных оценках, определяются в «Рекомендациях по оценке надежности конструкций зданий и сооружений по внешним признакам», разработанных ЦНИИПромзданий [2], в работе Рыкова А.В. и Боровикова А.П. [8], в работе Шутовой М.Н. [4].

В рекомендациях [2], широко применяемых на практике, предлагается использовать коэффициенты значимости конструктивных элементов α_i , указанные в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты значимости конструктивных элементов

№ п/п	Конструктивный элемент	Коэффициенты значимости, α_i
1	Плиты перекрытия и покрытия	2
2	Балки	4
3	Фермы	7
4	Колонны	8
5	Несущие стены и фундаменты	3
6	Прочие конструкции	2

Рассмотрим объективность применения таких коэффициентов. Элементы одного типа приняты равнозначными вне зависимости от габаритных размеров сооружения и расположения элементов в нем, что вызывает следующие логические противоречия:

- все фермы и колонны имеют одинаковую значимость в зданиях с разной высотой и пролетами несущих конструкций;
- одинаковую значимость имеют колонны крайнего и среднего ряда, воспринимающие разные нагрузки;
- значимость несущих стен не зависит от количества этажей в здании.

Величины коэффициентов значимости возрастают по мере увеличения нагрузок, воспринимаемых конструкциями:

$$\text{плиты (2)} \rightarrow \text{балки (4)} \rightarrow \text{фермы (7)} \rightarrow \text{колонны (8)}.$$

Логично было бы предположить продолжение данной цепочки для фундаментов:

$$\text{плиты (2)} \rightarrow \text{балки (4)} \rightarrow \text{фермы (7)} \rightarrow \text{колонны (8)} \rightarrow \text{фундаменты (9*)}.$$

Однако для фундаментов принят коэффициент $\alpha = 3$. Таким образом, получаем, что значимость фундаментов в здании более чем в 2 раза меньше колонн и ферм, которые на них опираются.

Группа 3. Вероятностные методы. В работе А.В. Перельмутера [6] значимость ξ_{xi} элемента x_i в системе $y(x_1, \dots, x_n)$ определяется как частная производная от вероятности безотказной работы системы по вероятности безотказной работы элемента.

$$\xi_{xi} = \partial P\{y(x_1, \dots, x_n) = 1\} / \partial P\{x_i = 1\}.$$

При упрощенных вычислениях важность элемента может быть определена количеством схем отказа, в которых этот элемент присутствует. Применительно к несущим конструкциям такими схемами отказа являются возможные механизмы их разрушения.

Возможен подход к определению коэффициента значимости строительных конструкций, предложенный в работах [4,5,7]. В основу данного подхода положен принцип определения коэффициента значимости строительной конструкции как отношения объема или площади возможного обрушения здания из-за ее выхода из строя к общему объему или площади здания. Расчет коэффициента значимости предлагается определять, как геометрическую вероятность события:

$$p = \frac{mesg}{mesG},$$

где $mesg$ – объем или площадь возможного обрушения, $mesG$ – объем или площадь всего здания.

Таким образом, коэффициент значимости численно приравнивается геометрической вероятности обрушения здания в целом. Применение данной методики вызывает следующие затруднения:

- при переходе от ферм к колоннам необходимо перейти от параметров площади к параметрам объема, в связи с чем, невозможно добиться единства расчета для всех элементов здания;
- необходимо проведение сложных дополнительных расчетов для определения объема обрушения, в том числе в связи с вероятностью возникновения прогрессирующего обрушения;
- с увеличением площади здания снижается значимость каждого отдельного элемента. Обрушение части здания представляет опасность само по себе независимо от его общей площади. То есть обрушение 100 м² кровли должно иметь одинаковое значение в зданиях площадью 1 000, 10 000 или 50 000 м².

Учитывая недостатки выше изложенных методик, предлагается новый подход к определению коэффициентов значимости конструктивных элементов здания, на основе определения энтропии, образуемой ими системы. Понятие «Энтропия» (количество информации) давно и успешно используется в таких областях знаний как химия (для оценки процесса протекания химических реакций), математика, физика, а с конца прошлого века и в экономике. В 80-х годах прошлого века К.К. Вальтухом была разработана информационная теория стоимости [9], позволяющая производить оценку материалов и изделий по количеству, содержащейся в них информации, получившая свое дальнейшее развитие в работах Е.Б. Колбачева [10,11].

Рассмотрим процесс обследования технического состояния здания, как процесс получения совокупности сведений об элементах некоторой физической системы. В результате обследования мы можем получить сведения о том, что элементы здания находятся в работоспособном или аварийном состоянии. Очевидно, если бы состояние физической системы было известно заранее, не было бы смысла проводить обследование. Обследование приобретает смысл только тогда, когда состояние системы заранее неизвестно, случайно. Поэтому в качестве объекта обследования, мы будем рассматривать некоторую физическую систему X , которая случайным образом может оказаться в том или ином состоянии, т. е. систему, которой заведомо присуща какая-то степень неопределенности. Очевидно, что сведения, полученные о системе, будут тем ценнее и содержательнее, чем больше была неопределенность системы до получения этих сведений («априори»). В качестве меры априорной неопределенности системы в теории информации [3] применяется специальная характеристика, называемая энтропией.

Энтропией системы называется сумма произведений вероятностей различных состояний системы на логарифмы этих вероятностей, взятая с обратным знаком

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

Таким образом, значимость системы X , то есть объекта обследования может быть определена его энтропией.

По аналогии со всем зданием энтропией может быть охарактеризована и значимость отдельных конструктивных элементов (КЭ), входящих в его состав. Для этого предположим, что каждый конструктивный элемент здания образует отдельную систему, состоящую из базового КЭ (значимость которого определяется) и КЭ формирующих область отказа (ОО). Под областью отказа будем понимать совокупность конструктивных элементов, отказ которых возникает в случае полного отказа базового КЭ. В общем случае базовый КЭ является опорой (основанием) для элементов ОО.

Так для покрытия из профилированного настила элементом, входящим в ОО будет кровля (утеплитель и кровельный материал). Для прогонов в ОО будут входить покрытие из профилированного настила и кровля. ОО для фермы включает прогоны, связи, профилированный настил и кровлю и т.п.

Для обеспечения сопоставимости КЭ, имеющих разные габаритные размеры, разобьём все КЭ на условные элементы (УЭ):

- для линейных конструктивных элементов (колонны, фермы, подкрановые балки, прогоны) - 1 п.м. конструктивного элемента;
- для плоскостных КЭ (кровля, стены, остекление) – 1 м² конструктивного элемента. При этом если в плоскостных КЭ можно четко выделить несущую и ограждающую часть их следует считать отдельными условными элементами. Так для кирпичной стены с утепленным вентилируемым фасадом условными элементами будут 1 м² кирпичной кладки и 1 м² утепленного вентилируемого фасада. Для стен из многослойных сэндвич панелей условным элементом будет только 1 м² такой стены;
- для ленточных и плитных фундаментов – 1 м² площади основания фундамента.

Предлагаемая методика расчета значимости предполагает следующие допущения для УЭ системы:

1. *Каждый УЭ системы до начала обследования может находиться в одном из двух состояний - работоспособном или не работоспособном.* На практике применяются различные способы оценки технического состояния конструкций, включающие от трех до семи [12] категорий, однако, по сути, во всех методиках выделяются несколько градаций работоспособности (исправное, работоспособное, ограниченно работоспособное и т.д.) и одна неработоспособная стадия (аварийная). Таким образом, допущение в данном случае является минимальным.

2. *Оба состояния, в которых могут находиться элементы, являются равновероятными.* В реальности можно предположить, что с ростом срока эксплуатации вероятность обнаружения неработоспособного элемента возрастает, однако данный факт компенсируется возможностью повреждения элементов на ранних сроках эксплуатации.

3. *Возникновение одного из состояний условного элемента не зависит от состояния других элементов.* Данное допущение, принято для упрощения расчета, так как исключаются те случаи, в которых условные элементы являются частью одного КЭ, а также повреждения одних конструкций вызваны дефектами и повреждениями, возникающими в других (например, трещины в стенах при осадке фундамента).

С учетом введенных допущений максимальная энтропия системы, создаваемой базовым элементом, может быть определена логарифмом числа состояний

$$H(X) = \log n$$

Для базовых элементов, не воспринимающих нагрузки от других КЭ, ОО отсутствует, и система будет состоять только из одного элемента, имеющего 2 состояния (работоспособное и не работоспособное).

$$H(X) = \log_2 2 = 1$$

Таким образом, коэффициент значимости несущих конструкций будет равен 1.

Рассмотрим определение коэффициента значимости для других конструктивных элементов на примере одноэтажного двухпролетного производственного здания (рис. 1), Колонны, фермы и прогоны (шаг прогонов 3 м) - металлические. Кровля из наплавляемых материалов с утеплителем по профилированному настилу. Стены из сэндвич панелей, стеновой фахверк в рамках данного примера не учтены; Фундаменты железобетонные, площадью основания 10 м².

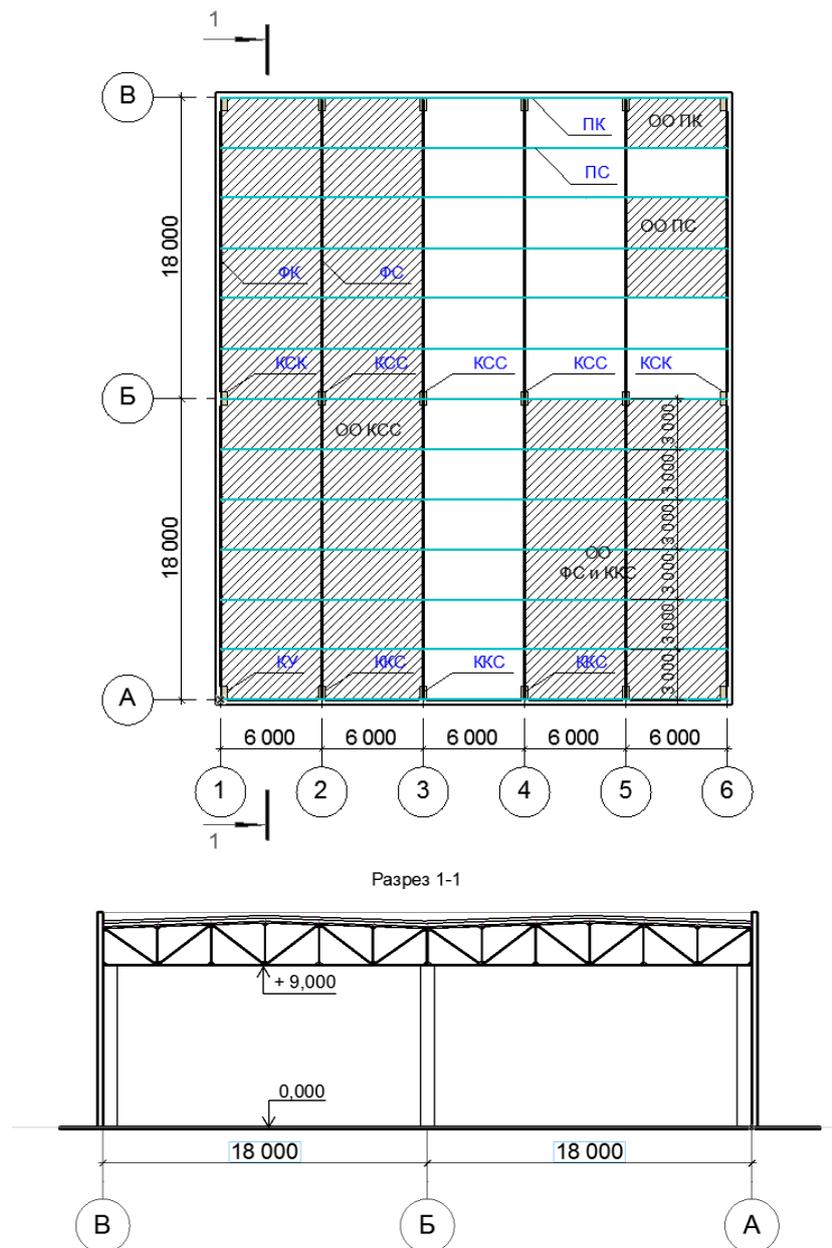


Рисунок 1 - Конструктивная схема здания

Для утеплителя и наплавляемой кровли коэффициенты значимости равны 1. Для профилированного настила система будет включать два конструктивных элемента: базовый

элемент - профилированный настил, состоящий из 3 условных элементов (3 м²). Длина участка принята по расстоянию между прогонами, ширина – 1м (для покрытия с железобетонными плитами количество условных элементов будет равно площади плиты); область отказа – кровля, состоящая из утеплителя и наплавленного материала. Таким образом, система будет иметь 12 возможных состояний (6 условных элементов каждый из которых имеет по 2 состояния $n = 6 \times 2 = 12$), а коэффициент значимости профилированного настила

$$H(X) = \log_2 12 = 3,585.$$

Результаты расчета коэффициентов значимости остальных конструктивных элементов приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Расчет коэффициентов значимости строительных конструкций производственного здания

№ п/п	Наименование элемента	Расчет количества условных элементов (УЭ)	Количество УЭ	Количество состояний системы	Коэффициент значимости
1	Прогон средний (ПС)	Площадь кровли в ОО 6х6 = 36м ²	78	156	7,2854
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 6х6 = 36м ²			
		Длина прогона - 6м			
2	Прогон крайний (ПК)	Площадь кровли в ОО 6х3 = 18м ²	42	84	6,3923
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 6х3 = 18м ²			
		Длина прогона - 6м			
3	Ферма средняя (ФС)	Площадь кровли в ОО 12х18 = 216м ²	534	1068	10,0607
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 12х18 = 216м ²			
		Общая длина прогонов в ОО 14 шт. х 6м = 84м			
		Длина фермы - 18м			
4	Ферма крайняя (ФК)	Площадь кровли в ОО 6х18 = 108м ²	276	552	9,1085
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 6х18 = 108м ²			
		Общая длина прогонов в ОО 7 шт. х 6м = 42м			
		Длина фермы - 18м			
5	Колонна угловая (КУ)	Площадь кровли в ОО 6х18 = 108м ²	429	858	9,7448
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 6х18 = 108м ²			
		Общая длина прогонов в ОО 7 шт. х 6м = 42м			
		Длина фермы в ОО - 18м			
		Высота колонны - 9м			
		Площадь стен в ОО 12м (длина) х 12м (высота) = 144м ²			

№ п/п	Наименование элемента	Расчет количества условных элементов (УЭ)	Количество УЭ	Количество состояний системы	Коэффициент значимости
6	Колонна крайнего ряда средняя (ККС)	Площадь кровли в ОО 12x18 = 216м ²	687	1374	10,4242
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 12x18 = 216м ²			
		Общая длина прогонов в ОО 14 шт. x 6м = 84м			
		Длина фермы - 18м			
		Высота колонны - 9м			
		Площадь стен в ОО 12м (длина) x 12м (высота) = 144м ²			
7	Колонна среднего ряда крайняя (КСК)	Площадь кровли в ОО 6x36 = 216м ²	699	1398	10,4491
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 6x36 = 216м ²			
		Общая длина прогонов в ОО 13 шт. x 6м = 78м			
		Длина ферм в ОО - 18+18=36м			
		Высота колонны - 9м			
		Площадь стен в ОО 12м (длина) x 12м (высота) = 144м ²			
8	Колонна среднего ряда средняя (КСС)	Площадь кровли в ОО 12x36 = 432м ²	1065	2130	11,0566
		Площадь покрытия из профлиста в ОО 12x36 = 432м ²			
		Общая длина прогонов в ОО 26 шт. x 6м = 156м			
		Длина ферм в ОО - 18+18=36м			
		Высота колонны - 9м			
9	Фундамент КУ	Количество УЭ соответствующей колонны + площадь основания фундамента	439	878	9,7781
10	Фундамент ККС		697	1394	10,4450
11	Фундамент КСК		709	1418	10,4696
12	Фундамент КСС		1075	2150	11,0701

Выводы

Предлагаемая методика расчета коэффициентов значимости строительных конструкций обладает рядом преимуществ по сравнению с методиками, рассмотренными выше:

- универсальность. Может быть использована для зданий любого размера и конфигурации. Позволяет учитывать габаритные размеры и пространственное положение строительных конструкций.
- независимость от материалов конструктивных элементов;
- простота применения. Для расчета коэффициента значимости не требуется большого объема дополнительных вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 53-86(р) Правила оценки физического износа жилых зданий. – ГОСГРАЖДАНСТРОЙ, 2001. – 43 с.
2. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам. ЦНИИ-ПРОМЗДАНИЙ. Москва, 2001.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. Для вузов. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999 – 576с.
4. Шутова М.Н. Методика определения остаточного ресурса типовых надземных объектов горно-рудной и угольной промышленности: дис. канд. техн. наук: 05.23.01/ Шутова Марина Николаевна. – Новочеркасск, 2010 – 164с.
5. Субботин А.И. Об определении физического износа зданий на основе новых подходов по расчету удельного веса видов конструкций на основе геометрического определения вероятности. / А.И. Субботин, М.Н. Шутова, С.В. Болдарев. // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений: материалы 15-ой Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 30 октября 2015 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2015. – С. 108-111.
6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Ассоциация строительных вузов, 2007.
7. Евтушенко С. И., Крахмальная М. П., Крахмальный Т. А. «К вопросу об остаточном ресурсе длительно эксплуатируемых мостов через водопроводящие каналы» - Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54) – с.166-170.
8. Рыков А.В., Боровиков А.П. Уточнение методики расчета остаточного ресурса зданий и сооружений / Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения. – Екатеринбург, 2016 – с.92-94
9. Вальтух К.К. Информационная теория стоимости и законы неравновесной экономики. – М.: Янус-К, 2001.
10. Колбачев Е.Б. Производственные системы машиностроительных предприятий и их организационно-экономическая эволюция//Проблемы машиностроения и автоматизации, 2003. - №2 – С. 12-16.
11. Колбачев Е.Б. Информационные модели производственных систем миниэкономического уровня и их стоимостные характеристики/ Девятое Друкеровские чтения «Информационная экономика: институциональные проблемы» - Москва, 2009- с. 322-329.
12. В.А. Соколов «Категории технического состояния строительных конструкций зданий при их диагностике вероятностными методами»/ Фундаментальные исследования. №6-6. 2014.

Бузало Нина Александровна

Южно-Российский государственный политехнический университет
им. М.И. Платова (г. Новочеркасск), к.т.н., профессор, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение», г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел 8 918 5374060, buzalo_n@mail.ru.

Канунников Александр Витальевич

Южно-Российский государственный политехнический университет
им. М.И. Платова (г. Новочеркасск), ассистент кафедры «Промышленное и гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение», г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

BUZALO N. A., KANUNNIKOV A.V.

**DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF SIGNIFICANCE
OF BUILDING STRUCTURES IN ASSESSING
THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDINGS**

The possibility of further trouble-free operation of existing buildings and structures is determined by their technical inspection. The task of assessing the technical condition of an object is directly related to the determination of the wear of individual structural elements and the entire structure as a whole. To solve this problem, it is necessary to establish how the operability of a particular element of a

building affects the operability of a building as a whole. This can be done by introducing the notion of the significance of individual constructive elements. The authors consider the variants of practical methods used to determine the coefficient of significance of constructive elements, compare them and propose to use a method based on the definition of the entropy of the system. An example is given of determining the significance coefficients of structural elements for an industrial building.

Keywords: *assessment of technical condition of operated buildings and structures; significance coefficients of constructive elements; entropy of the system.*

REFERENCES

1. VSN 53-86(r) Pravila otsenki fizicheskogo iznosa zhilykh zdaniy. – GOSGRAZHDANSTROY, 2001. – 43 s.
2. Rekomendatsii po otsenke nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiy po vneshnim priznakam. TSNIIPROMZDANIY. Moskva, 2001.
3. Venttsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey: Ucheb. Dlya vuzov. – 6-ye izd. ster. – M.: Vyssh. shk., 1999 – 576s.
4. Shutova M.N. Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa tipovykh nadzemnykh ob'yektov gornorudnoy i ugol'noy promyshlennosti: dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01/ Shutova Marina Nikolayevna. – Novocherkassk, 2010 – 164s.
5. Subbotin A.I. Ob opredelenii fizicheskogo iznosa zdaniy na osnove novykh podkhodov po raschetu udel'nogo vesa vidov konstruksiy na osnove geometricheskogo opredeleniya veroyatnosti. / A.I. Subbotin, M.N. Shutova, S.V. Boldarev. // Informatsionnyye tekhnologii v obsledovanii ekspluatiruyemykh zdaniy i sooruzheniy: materialy 15-oy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Novocherkassk, 30 oktyabrya 2015 g. / Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet (NPI) imeni M.I. Platova. – Novocherkassk: YURGPU(NPI), 2015. – S. 108-111.
6. Perel'muter A.V. Izbrannyye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstruksiy. Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 2007.
7. Yevtushenko S. I., Krakhmal'naya M. P., Krakhmal'nyy T. A. «K voprosu ob ostatochnom resurse dlitel'no ekspluatiruyemykh mostov cherez vodoprovodyashchiye kanaly» - Vestnik VolgGASU. Ser.: Str-vo i arkhitekt. 2014. Vyp. 35(54) – s.166-170.
8. Rykov A.V., Borovikov A.P. Utochneniye metodiki rascheta ostatochnogo resursa zdaniy i sooruzheniy / Voprosy sovremennykh tekhnicheskikh nauk: svezhiy vzglyad i novyye resheniya. – Yekaterinburg, 2016 – s.92-94
9. Val'tukh K.K. Informatsionnaya teoriya stoimosti i zakony neravnovesnoy ekonomiki. – M.: Yanus-K, 2001.
10. Kolbachev Ye.B. Proizvodstvennyye sistemy mashinostroitel'nykh predpriyatiy i ikh organizatsionno-ekonomicheskaya evolyutsiya//Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii, 2003. - №2 – S. 12-16.
11. Kolbachev Ye.B. Informatsionnyye modeli proizvodstvennykh sistem miniekonomicheskogo urovnya i ikh stoimostnyye kharakteristiki/ Devyatyye Drukerovskiye chteniya «Informatsionnaya ekonomika: institutsional'nyye problemy» - Moskva, 2009- s. 322-329.
12. V.A. Sokolov «Kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksiy zdaniy pri ikh diagnostike veroyatnostnyimi metodami»/ Fundamental'nyye issledovaniya. №6-6. 2014.

Buzalo Nina

Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk

Ph.D. in Engineering, Professor of Department “Industrial and Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering”

E-mail: buzalo_n@mail.ru

Kanunnikov Alexander

Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk

КРИШАН А.Л., РИМШИН В.И., АСТАФЬЕВА М.А.

ПРОЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Цель данной работы состояла в исследовании основных особенностей силового сопротивления центрально сжатых коротких сталетрубобетонных элементов усовершенствованной конструкции для разработки методики расчета прочности их нормальных сечений. Для повышения эффективности предложено изготавливать сталетрубобетонные элементы с предварительно обжатым бетоном, в котором размещена высокопрочная продольная арматура. Проведены экспериментальные исследования прочности при сжатии 10 серий опытных образцов таких элементов. Выявлено, что за счет предварительного обжатия бетонного ядра и размещения в нем высокопрочной продольной арматуры удалось существенно повысить прочность исследованных образцов. Прочность усовершенствованных образцов по сравнению с трубобетонными образцами классической конструкции увеличилась на 30÷50%. Предложенные расчетные зависимости позволяют учесть основные особенности силового сопротивления сжатых трубобетонных конструкций, в том числе наличие в них предварительного обжатия бетона и высокопрочной арматуры. Приведенные формулы применимы для расчета прочности как предварительно обжатых, так и необжатых трубобетонных элементов.

Ключевые слова: сжатые трубобетонные элементы, предварительное обжатие, высокопрочная арматура, прочность, деформативность.

Введение

Параллельно с бурным развитием человеческой цивилизации стремительно развивается и строительная отрасль. Сегодня уже мало кого удивит возведением высотных зданий или большепролетных мостов. В этой связи все более жесткие требования предъявляются к современным строительным конструкциям. Два из этих требований особенно важны и актуальны - экономичность и безопасность.

Таким требованиям соответствуют сталетрубобетонные элементы (СТЭ), в которых стальные трубы одновременно выполняют роль опалубки и арматуры. Особенно эффективно их использовать в качестве сжатых элементов, воспринимающих большие нагрузки с малыми эксцентриситетами [1].

В сжатых СТЭ бетон работает в условиях объемного напряженного состояния. При объемном сжатии бетон способен воспринимать напряжения, значительно превышающие его призмную прочность. Поэтому при относительно малых поперечных сечениях такие конструкции могут выдерживать значительные нагрузки [2-6]. Это обеспечивает существенную экономию материалов.

Другой важной особенностью сжатых СТЭ является их высокая деформативность [7-9]. Это свойство, в совокупности со значительной прочностью, предполагает затрачивать большое количество энергии на их разрушение. В результате данные конструкции отличаются очень высокой живучестью, что значительно повышает безопасность построенных из них зданий.

Более широкое применение СТЭ в строительстве несколько сдерживается наличием в них одного конструктивного недостатка. При относительно небольших уровнях напряжений в бетоне, из-за разницы между коэффициентами Пуассона бетона и стали, возможно отсутствие эффекта обоймы. Этот недостаток становится особенно существенным для конструкций большой гибкости или подвергнутых циклическому действию внешней нагрузки.

В этой связи разработка более эффективной конструкции СТЭ и всесторонние ее исследования являются актуальными. Цель данной работы состоит в исследовании основных

особенностей силового сопротивления центрально сжатых коротких СТЭ усовершенствованной конструкции для разработки методики расчета прочности их нормальных сечений.

2 Экспериментальные исследования

Для преодоления отмеченного выше недостатка СТЭ учеными Магнитогорского государственного технического университета предложено изготавливать их с предварительным обжатием бетонного ядра. Этого можно достигнуть за счет длительного прессования бетонной смеси или использования напрягающего бетона [10]. Было разработано три метода предварительного обжатия бетонного ядра:

- прессование бетона с помощью пустотообразователя;
- прессование за счет вдавливания в бетонную смесь металлических трубок;
- применение напрягающего бетона.

Выполненные эксперименты показали, что самым эффективным оказался второй метод. Он реализуется за счет последовательного вдавливания в бетонную смесь вдоль направляющего стержня нескольких стальных трубок, имеющих постепенно увеличивающиеся диаметры. Последнюю вдавливаемую трубку оставляют внутри образца в качестве стального сердечника, исключая возможность распрессовки бетона. В результате получают конструкцию трубобетонного элемента с кольцевым сечением и внутренним стальным сердечником.

Для дальнейшего повышения прочности СТЭ с предварительно обжатым бетонным ядром предлагается применить армирование бетона высокопрочной продольной арматурой. Для традиционных железобетонных конструкций расчетное сопротивление арматуры сжатию ограничивается значениями $400 \div 500$ МПа, что обусловлено предельной деформативностью сжатого бетона (порядка $0,2 \div 0,25\%$). Проведенные ранее экспериментальные исследования показали, что бетон, заключенный в обойму, может иметь деформации, существенно превышающие предельное укорочение одноосно сжатого бетона. Следовательно, в элементах, имеющих обойму в виде стальной трубы, появляется возможность эффективного использования высокопрочной арматуры при ее работе на сжатие.

Экспериментально-теоретических исследований подобных конструкций ранее не выполнялось, поэтому вопросы расчета и конструирования эффективных трубобетонных элементов с армированным предварительно обжатым ядром остаются недостаточно изученными.

Для решения поставленных в работе задач было изготовлено 10 серий опытных образцов трубобетонных колонн со стержневым армированием бетонного ядра по 3 образца в каждой. Из них пять серий без предварительного обжатия бетонного ядра:

Н.П – с оболочкой из трубы 159×6 мм и Н.П.В – аналогичные образцы с каркасом из 8 проволок диаметром 5 мм класса В1400; Н.П.В – с аналогичным каркасом и оболочкой из трубы 153×3 мм и Н.П.В – с такой же оболочкой, но без каркаса; Н.П.А – с каркасом из 4 стержней диаметром 10 мм класса А800 и оболочкой из трубы 159×6 мм. Для выявления эффективности предварительного обжатия были изготовлены образцы следующих серий: О.П.В – образцы, изготовленные с длительным прессованием бетона, с каркасом из 8 проволок арматуры класса В1400 и оболочкой из трубы 159×6 мм; О.П.В – аналогичные образцы с оболочкой из трубы 153×3 мм; О.П.А – аналогичные образцы с каркасом из 4 стержней арматуры А800 и оболочкой из трубы 159×6 мм; OS_p1.П.В – образцы с каркасом из 8 проволок, обжатие бетонного ядра которых достигалось за счет одновременного использования напрягающего бетона и длительного прессования бетонной смеси; OS_p2.П.В – аналогичные образцы, но изготовленные из высокопрочного напрягающего бетона класса В80.

Исходный класс бетона для образцов всех серий, за исключением OS_p2.П.В, принят равным В40. Для изготовления этих образцов использовалась самоуплотняющаяся бетонная смесь. Для изготовления образцов серии OS_p2.П.В использовалась высокоподвижная бетонная смесь. Длительное прессование бетонной смеси осуществлялось за счет вдавливания в бетонную смесь металлических трубок. В процессе прессования бетонная смесь уплотнялась

на 4,2%, что соответствовало величине прессующего 2,5 МПа. Для образцов серий OS_p1.П.В и OS_p2.П.В применялся бетон с маркой по самоупрочению S_p1,5.

Стальная оболочка для образцов всех серий изготавливалась из трубы 159×6 с пределом текучести 305 МПа. Для образцов серий Н.П, Н.П.В и О.П.В стенки этой трубы предварительно растачивались на токарном станке до толщины 3 мм.

Все лабораторные образцы имели длину 640 мм. Они испытывались на осевое сжатие. При этом передача нагрузки производилась на все поперечное сечение образцов. Испытания проводились в возрасте 28 суток на 500-тонном гидравлическом прессе 2ПГ-500 по стандартной методике. Для измерения деформаций бетона, стали и арматуры применялись следующие приборы:

- электротензорезисторы с базой 5 мм на продольной арматуре;
- электротензорезисторы с базой 20 мм на трубе-оболочке;
- индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм и базой 500 мм;
- механические тензометры Аистова с ценой деления 0,001 мм и базой 100 мм.

Регистрация показаний электротензорезисторов осуществлялась при помощи универсального переносного многоканального измерительно-вычислительного комплекса МИС-036.

Общий вид образцов при подготовке к испытаниям представлен на рисунке 1, а.

Основные данные, полученные в ходе испытаний, сведены в таблицу 1. В таблице представлены результаты испытаний наиболее характерных образцов из каждой серии.

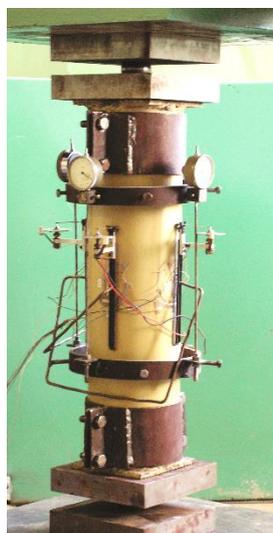
В целом, результаты выполненных экспериментов, а также другие современные исследования [11-16] подтвердили высокие прочностные свойства СТЭ. Эксперимент также показал, что совместность работы бетонного ядра, высокопрочной арматуры и стальной оболочки исследованных трубобетонных элементов всех серий не нарушается вплоть до стадии разрушения. Характер разрушения лабораторных образцов колонн для всех исследованных серий был пластичным и не зави-

сел от используемого продольного армирования и способа изготовления бетонного ядра. Разрушение армированных трубобетонных образцов сопровождалось образованием гофров в стенках стальной оболочки с дальнейшей потерей ими местной устойчивости вследствие утраты сцепления с сильно растрескивающимся бетоном в зоне гофров (рисунок 1, б).

При этом, образцы усовершенствованной конструкции всегда имели более высокую прочность по сравнению с аналогичными образцами из обычного бетона. Усиление бетона высокопрочной арматурой привело к росту прочности образцов на 10÷14%.

Предварительное обжатие дополнительно увеличило прочность на 16÷21%. В итоге образцы серии О.П.В оказались прочнее образцов серии Н.П в среднем в 1,34 раза. Самыми прочными оказались образцы серии OS_p2.П.В, изготовленные из предварительно обжатого напрягающего высокопрочного бетона. Их прочность оказалась почти в 1,5 раза выше по сравнению с СТЭ классической конструкции.

Таблица 1 - Несущая способность и деформативность исследуемых образцов



а)



б)

Рисунок 1 - Исследуемые образцы в момент испытания (а) и после испытания (б)

Серия	Призменная прочность бетона R_b , МПа	Разрушающая нагрузка, кН		$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$	Относительные деформации $\times 10^5$		$\frac{\varepsilon_{b00}^{exp}}{\varepsilon_{b00}^{th}}$
		N_u^{exp}	N_u^{th}		ε_{b00}^{exp}	ε_{b00}^{th}	
Н.І	41,2	1533	1512	1,01	900	828	1,08
Н.І.В	41,2	1867	1728	1,08	930	828	1,12
О.І.В	41,2	2000	2085	0,96	750	624	1,20
Н.ІІ	45,3	2400	2287	1,05	900	1090	0,82
Н.ІІ.В	45,3	2767	2517	1,10	925	1090	0,85
О.ІІ.В	45,3	3067	3059	1,00	1000	834	1,20
Н.ІІ.А	43,2	2700	2463	1,10	1150	1080	1,06
О.ІІ.А	43,2	3033	2858	1,06	950	826	1,15
ОС _p 1.ІІ.В	42,4	3167	2913	1,09	800	843	0,95
ОС _p 2.ІІ.В	82,7	3200	3323	0,96	620	518	1,20

Проведенные эксперименты показали, что предельная деформативность бетонного ядра исследованных образцов заметно выше по сравнению с деформативностью одноосно сжатого бетона. На графике (рисунок 2) показаны относительные продольные и поперечные деформации обжатых трубобетонных образцов при кратковременном осевом сжатии. Подобные графики для необжатых образцов имеют идентичный характер.

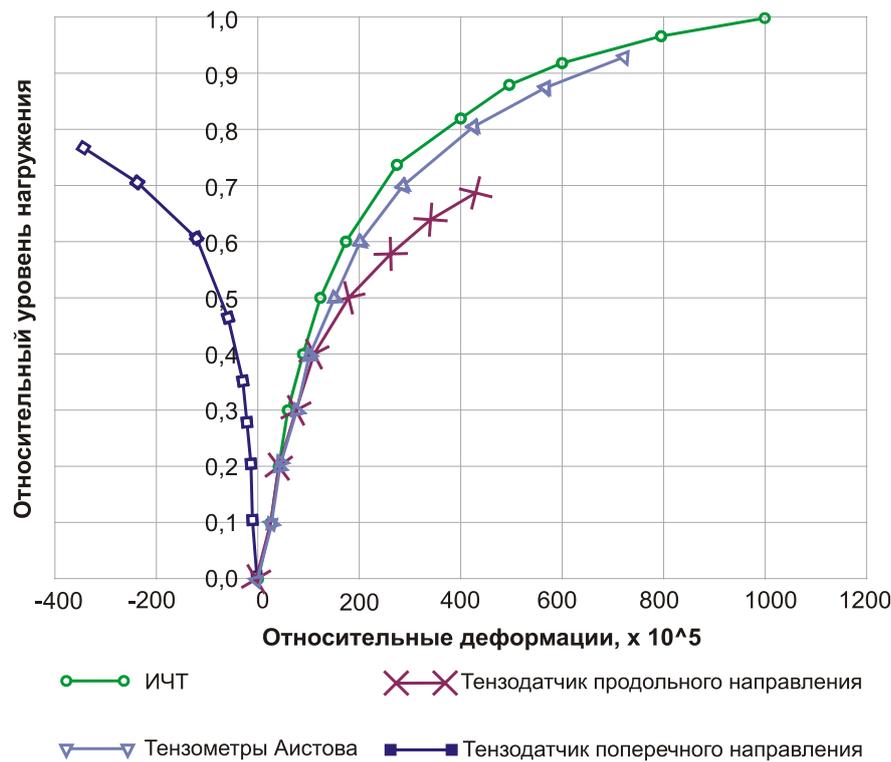


Рисунок 2 - Относительные продольные и поперечные деформации предварительно обжатого образца серии О.ІІ.В

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность сжатых СТЭ усовершенствованной конструкции. За счет предварительного обжатия бетонного ядра удалось существенно повысить их прочность. Высокая деформативность исследованных образцов позволила практически полностью использовать прочностные свойства не

только арматуры А800, но даже и В1400. Это также внесло заметный вклад в рост прочности СТЭ.

3 Расчет несущей способности

В соответствии с действующими нормами проектирования (СП 63.13330), учитывая характер армирования СТЭ, расчет их прочности следует выполнять на основе нелинейной деформационной модели. Это наглядно показано в работах [17-19]. Нормы по проектированию сталежелезобетонных конструкций (СП 266.1325800) допускают выполнять упрощенный расчет прочности нормальных сечений, основанный на методе предельных усилий. Однако эти нормы не содержат указаний по расчету предварительно обжатых конструкций.

Приведем основные зависимости необходимые для выполнения прочностного расчета СТЭ усовершенствованной конструкции. Для определения разрушающей нагрузки короткого центрально сжатого трубобетонного элемента с продольной арматурой, изготовленного по технологии длительного прессования бетонного ядра, предлагается использовать формулу

$$N_u = R_{b3}A + \sigma_{pz}A_p + \sigma_{su}A_s, \quad (1)$$

в которой R_{b3} – прочность объемно-сжатого бетонного ядра; σ_{pz} и σ_{su} – сжимающие напряжения в стальной оболочке и продольной арматуре в стадии разрушения конструкции; A , A_p и A_s – площади поперечных сечений бетонного ядра, стальной трубы-оболочки и спиральной арматуры.

Прочность объемно-сжатого бетонного ядра предлагается определять по формуле

$$R_{b3} = \alpha_c R_{bp}; \quad (2)$$

$$\alpha_c = 1 + 0,5\bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma} - 2}{4}\right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}}; \quad (3)$$

R_{bp} – прочность бетона, твердеющего под давлением.

В соответствии с предложениями работы [10] прочность опрессованного бетона, твердеющего под давлением, можно определить по формуле

$$R_{bp} = R_b (1 + 0,3\beta\sqrt{P}), \quad (4)$$

где R_b – предел прочности бетона при осевом сжатии (для трубобетонных элементов, изготовленных по традиционной технологии, $R_{bp} = R_b$);

$\beta \leq 1$ – коэффициент, зависящий от состава бетонной смеси;

P – величина эффективного прессующего давления, вычисляемого по формуле

$$P = \Delta f \cdot \sigma_{br0}; \quad (5)$$

σ_{br0} – принятое по технологии прессующее давление;

Δf – поправочный коэффициент на прочность исходного бетона

$$\Delta f = 4,4 / \sqrt{R_b}. \quad (6)$$

В формуле (3) $\bar{\sigma}$ – относительная величина бокового давления на бетонное ядро со стороны стальной оболочки к моменту исчерпания прочности СТЭ. По результатам теоретических исследований [17] его величина рассчитывается по формуле

$$\bar{\sigma} = 0,4e^{-(a+b)} \xi^{0,8}, \quad (7)$$

в которой a, b – коэффициенты материала [20], устанавливаемые на основании опытов (для тяжелого бетона $b=0,118$ и $a=0,5b$); ξ – конструктивный коэффициент, вычисляемый по формуле

$$\xi = \frac{\sigma_{yp} A_p}{R_b A}, \quad (8)$$

где σ_{yp} – предел текучести стали трубы-оболочки.

Сжимающее напряжение в стальной оболочке определяется по формуле, полученной из условия текучести Генки-Мизеса

$$\sigma_{pz} = R_{bp} \left(\sqrt{\xi^2 - 3\sigma^2} - \sigma \right) \frac{A}{A_p}. \quad (9)$$

Предельное сжимающее напряжение в продольной арматуре σ_{su} определяется с учетом её совместной работы с бетонным ядром. Для определения относительной деформации укорочения трехосно сжатого бетона в вершине диаграммы его деформирования получена следующая формула

$$\varepsilon_{b00} = \left(\frac{R_{b3}}{R_{bp}} \right)^{2,5} \left\{ \varepsilon_{b0} - \frac{R_{bp}}{E_{bp}} \left[1 - \left(\frac{R_{b3}}{R_b} \right)^{-1,5} \right] \right\}, \quad (10)$$

где ε_{b0} – деформация укорочения одноосно сжатого бетона при максимальном напряжении;

E_{bp} – начальный модуль упругости опресованного бетона, ГПа [10]

$$E_{bp} = 56 - \frac{108}{\sqrt{R_{bp}}}. \quad (11)$$

Принимается, что предельная деформация в арматуре $\varepsilon_{su} = \varepsilon_{b00}$. Тогда, при трехлинейной диаграмме деформирования арматуры (согласно рекомендации СП 63.13330.2013) формула для расчета напряжения σ_{su} имеет следующий вид:

- при $\varepsilon_{b00} \leq \varepsilon_{s1}$

$$\sigma_{su} = \varepsilon_{b00} \cdot E_s; \quad (12)$$

- при $\varepsilon_{b00} > \varepsilon_{s1}$

$$\sigma_{su} = \left(0,1 \frac{\varepsilon_{b00} - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{s1}} + 0,9 \right) \sigma_{ys} \leq \sigma_{ys}, \quad (13)$$

где σ_{ys} – предел текучести продольной арматуры;

ε_{s1} и ε_{s0} – деформации в параметрических точках диаграммы арматуры ($\varepsilon_{s1} = 0,45 \cdot 10^{-5} \sigma_{ys}$, а $\varepsilon_{s0} = 0,015$).

Результаты сопоставления опытных значений прочности N_u^{exp} и осевых деформаций $\varepsilon_u^{\text{exp}} = \varepsilon_{b00}^{\text{exp}}$ исследованных образцов с их расчетными значениями N_u^{th} и $\varepsilon_{b00}^{\text{th}}$ свидетельствуют о том, что предложенные зависимости позволяют адекватно оценить силовое сопротивление предварительно обжатых СТЭ, в том числе имеющих высокопрочную продольную арматуру. Результаты расчетов прочности имели расхождения с экспериментальными данными

+9% /-4% при коэффициенте вариации 0,07. Такие расхождения следует признать очень незначительными. Для предельных деформаций аналогичные расхождения получились заметно большими - +20% /-15% при коэффициенте вариации 0,16. Однако и данный результат следует признать вполне удовлетворительным.

Следует особо подчеркнуть, что предложенные зависимости являются универсальными. Они применимы как для предварительно обжатых, так и необжатых СТЭ.

4 Выводы

Полученные экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о высокой эффективности усовершенствованных СТЭ. За счет предварительного обжатия бетонного ядра и размещения в нем высокопрочной продольной арматуры удалось существенно повысить прочность трубобетонных образцов. Прочность исследованных усовершенствованных образцов по сравнению с трубобетонными образцами классической конструкции увеличилась на 30÷50%.

Предложенные расчетные зависимости позволяют учесть основные особенности силового сопротивления сжатых трубобетонных конструкций, в том числе наличие в них предварительного обжатия бетона и высокопрочной арматуры.

Благодарности. Статья написана на основании результатов исследований, поддержанных грантом РААСН № 7.4.11.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кришан А.Л., Кришан М.А., Сабиров Р.Р. Перспективы применения трубобетонных колонн на строительных объектах России // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. Магнитогорск. 2014. № 1 (45). С. 137-140.
2. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects. Doctor Diss. (Philosophy). Kansas. 2012. 399 p. (In USA)
3. Han L-H., He S.H., and Liao F.Y. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. Vol. 67. № 11, pp. 1699-1709.
4. Ramdane K.E., Watanabe F., Nishiyama M. and Assa B. Experimental and Analytical Work on Confined HSC, *Proceedings of the 5th International Symposium on Utilization of HS/HP Concrete*. Norway: Sandefjord. 1999. Vol. 1, pp. 566-577.
5. Subramanian N. Design of confinement reinforcement for RC columns. *The Indian Concrete Journal*. 2011. Vol.85, № 6, pp. 19-29.
6. Waton S., Zahn F.A., Park R. Confining Reinforcement for Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering*. 1994 Vol. 120, № 6, pp. 1798-1824.
7. Lai M., Ho J. Confinement effect of ring-confined concrete-filled-steel-tube columns under uni-axial load. *Journal Engineering Structures*. 2014. Vol. 67, pp. 123-141.
8. Liang, Q.Q., Fragomeni, S.S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. Vol. 66, pp.159-169.
9. Mугурума, Н., Watanabe, S., Katsuta, S., Tanaka, S. A stress-strain model of confined concrete. *JCA Cement and Concrete*. Japan: Tokyo. 1980. Vol. 34, pp. 429-432.
10. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны с предварительно обжатым ядром: Монография. Ростов-на-Дону: Рост. гос. строит. ун-т, 2011. 372 с.
11. Hamidian M.R., Jumaat M.Z., Alengaram U.J., Ramil Sulong N.H., Shafiq P. Pitch spacing effect on the axial compressive behavior of spirally reinforced concrete-filled steel tube (SRCFT). *Journal Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 100, pp. 212-223.
12. Han L-H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. № 100, pp. 211-228.
13. Jayasooriya R., Thambiratnam D.P., Perera N.J. Blast response and safety evaluation of a composite column for use as key element in structural systems. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 61, № 1, pp. 31-43.
- Krishan A.L., Krishan M.A., 2014. Strength of axially loaded concrete-filled steel tubular columns with circular cross-section. *Electronic magazine "Advances of Environmental Biology"*. 2014. Vol. 8, № 6, pp. 1991-1994, <http://www.aensiweb.com/old/aeb/2014/1991-1994.pdf> (дата обращения 07.05.18).

14. Uy B., Tao Z., Han L.H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. *J Constr Steel Res.* 2011. Vol. 67, № 3, pp. 360–378.
15. Xiamuxi A., Hasegawa A. A study on axial compressive behaviors of reinforced concrete filled tubular steel columns. *Journal of Constructional Steel Research.* 2012. Vol.76, pp.144-154.
16. Кришан А.Л., Астафьева М.А., Сабиров Р.Р. Расчет и конструирование трубобетонных колонн. Монография. Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2016. 261 с.
17. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Sabirov R.R. On Deformation Charting for Concrete Filled Steel Tube Columns Concrete Core and Steel Shell. *Applied Mechanics and Materials.* Yonsei University in Seoul, South. 2017. <https://www.scientific.net/AMM> (дата обращения 07.05.18).
18. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Sabirov R.R. The Bearing Capacity of the Pre-Compressed Concrete Filled Steel Tube Columns. *Defect and Diffusion Forum.* Japan: Kokushikan University, Tokio. 2018. Vol. 382, pp. 261-266. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.382.261>. (дата обращения 07.05.18).
19. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М: Стройиздат, 1996. 416 с.
20. Кришан А.Л., Астафьева М.А., Римшин В.И. Предельные относительные деформации центрально-сжатых железобетонных элементов. *Естественные и технические науки.* 2014. № 9-10 (77). С. 370-372.
21. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Диссипативная теория силового сопротивления железо-бетона. Москва, 2015.
22. Krishan A.L., Troshkina E.A., Rimshin V.I., Rahmanov V.A., Kurbatov V.L. Load-bearing capacity of short concrete-filled steel tube columns of circular cross section. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences.* 2016. Т. 7. № 3. С. 2518-2529.
23. Римшин В.И., Кришан А.Л., Мухаметзянов А.И. Построение диаграммы деформирования одноосно сжатого бетона. *Вестник МГСУ.* 2015. № 6. С. 23-31.
24. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и $\sigma - \epsilon$ диаграмма бетона. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* 2014. № 6. С. 40-44.
25. Мосаков Б.С., Курбатов В.Л., Римшин В.И. Основы технологической механики тяжелых бетонов. *Минеральные Воды,* 2017.
26. Кришан А.Л., Римшин В.И., Заикин А.И. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием. В сборнике: *Бетон и железобетон - взгляд в будущее научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах.* 2014. С. 308-314.

Кришан А.Л.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск
д-р. техн. наук, профессор
E-mail: kris_al@mail.ru

Римшин В. И.

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва
чл.-корр. РААСН, д-р. техн. наук, профессор
E-mail: v.rimshin@niisf.ru

Астафьева М.А.

аспирант каф. Пром. зд. и стр. констр.
E-mail: skymanika@mail.ru

KRISHAN A.L., RIMSHIN V. I., ASTAFEVA M.A.

STRENGTH OF CENTRALLY COMPRESSED PIPE ELEMENTS OF IMPROVED DESIGN

The purpose of this work was to identify the main problems associated with their compliance. Experimental studies of the strength of such elements. It turned out that, before the compression of the concrete core and the placement of a high-strength longitudinal reinforcement in it, it was possible to obtain a breakthrough of the investigated samples. Strength of improved samples compared with pipe-type samples of the classical design increased by 30 ÷ 50%. The above formulas are applicable for calculating the strength of both pre-compressed and uncompressed pipe-concrete elements.

Keywords: *compressed pipe-concrete elements, preliminary reduction, high-strength reinforcement, strength, deformability.*

REFERENCES

1. Krishan A.L., Krishan M.A., Sabirov R.R. Perspektivy primeneniya trubobetonnykh kolonn na stroitel'nykh ob'yektakh Rossii // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. Magnitogorsk. 2014. № 1 (45). S. 137-140.
2. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects. Doctor Diss. (Philosophy). Kansas. 2012. 399 p. (In USA)
3. Han L-H., He S.H., and Liao F.Y. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension. Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. № 11, pp. 1699-1709.
4. Ramdane K.E., Watanabe F., Nishiyama M. and Assa B. Experimental and Analytical Work on Confined HSC, Proceedings of the 5th International Symposium on Utilization of HS/HP Concrete. Norway: Sandefjord. 1999. Vol. 1, pp. 566-577.
5. Subramanian N. Design of confinement reinforcement for RC columns. The Indian Concrete Journal. 2011. Vol.85, № 6, pp. 19-29.
6. Waton S., Zahn F.A., Park R. Confining Reinforcement for Concrete Columns. Journal of Structural Engineering. 1994 Vol. 120, № 6, pp. 1798-1824.
7. Lai M., Ho J. Confinement effect of ring-confined concrete-filled-steel-tube columns under uni-axial load. Journal Engineering Structures. 2014. Vol. 67, pp. 123-141.
8. Liang, Q.Q., Fragomeni, S.S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under eccentric loading. Journal of Constructional Steel Research. 2010. Vol. 66, pp.159-169.
9. Muguruma, H., Watanabe, S., Katsuta, S., Tanaka, S. A stress-strain model of confined concrete. JCA Cement and Concrete. Japan: Tokyo. 1980. Vol. 34, pp. 429-432.
10. Krishan A.L. Trubobetonnyye kolonny s predvaritel'no obzhatym yadrom: Monografiya. Rostov-na-Donu: Rost. gos. stroit. un-t, 2011. 372 s.
11. Hamidian M.R., Jumaat M.Z., Alengaram U.J., Ramil Sulong N.H., Shafiq P. Pitch spasing effect on the axial compressive behavior of spirally reinforced concrete-filled steel tube (SRCFT). Journal Thin-Walled Structures. 2016. Vol. 100, pp. 212-223.
12. Han L-H., Li W., BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures. Journal of Constructional Steel Research. 2014. № 100, pp. 211-228.
13. Jayasooriya R., Thambiratnam D.P., Perera N.J. Blast response and safety evaluation of a composite column for use as key element in structural systems. Engineering Structures. 2014. Vol. 61, № 1, pp. 31-43.
- Krishan A.L., Krishan M.A., 2014. Strength of axially loaded concrete-filled steel tubular columns with circular cross-section. Electronic magazine "Advances of Environmental Biology". 2014. Vol. 8, № 6, pp. 1991-1994, <http://www.aensiweb.com/old/aeb/2014/1991-1994.pdf> (data obrashcheniya 07.05.18).
14. Uy B., Tao Z., Han L.H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. J Constr Steel Res. 2011. Vol. 67, № 3, pp. 360–378.
15. Xiamuxi A., Hasegawa A. A study on axial compressive behaviors of reinforced concrete filled tubular steel columns. Journal of Constructional Steel Research. 2012. Vol.76, pp.144-154.
16. Krishan A.L., Astaf'yeva M.A., Sabirov R.R. Raschet i konstruirovaniye trubobetonnykh kolonn. Monografiya. Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2016. 261 s.
- Krishan A.L., Chernyshova E.P., Sabirov R.R. On Deformation Charting for Concrete Filled Steel Tube Columns Concrete Core and Steel Shell. Applied Mechanics and Materials. Yonsei University in Seoul, South. 2017. <https://www.scientific.net/AMM> (data obrashcheniya 07.05.18).
17. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Sabirov R.R. The Bearing Capacity of the Pre-Compressed Concrete Filled Steel Tube Columns. Defect and Diffusion Forum. Japan: Kokushikan University, Tokio. 2018. Vol. 382, pp. 261-266. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.382.261>. (data obrashcheniya 07.05.18).
18. Karpenko N.I. Obschiye modeli mekhaniki zhelezobetona. M: Stroyizdat, 1996. 416 s
19. Krishan A.L., Astaf'yeva M.A., Rimshin V.I. Predel'nyye odnositel'nyye deformatsii tsentral'no-szhatykh zhelezobetonnykh elementov. Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki. 2014. № 9-10 (77). S. 370-372.
20. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Dissipativnaya teoriya silovogo soprotivleniya zhelezo-betona. Moskva, 2015.
21. Krishan A.L., Troshkina E.A., Rimshin V.I., Rahmanov V.A., Kurbatov V.L. Load-bearing capacity of short concrete-filled steel tube columns of circular cross section. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. T. 7. № 3. S. 2518-2529.
22. Rimshin V.I., Krishan A.L., Mukhametzyanov A.I. Postroyeniye diagrammy deformirovaniya odnoosno szhatogo betona. Vestnik MGSU. 2015. № 6. S. 23-31.

23. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Kvazilineynyye uravneniya silovogo soprotivleniya i s - e diagramma betona. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. 2014. № 6. S. 40-44.
24. Mosakov B.S., Kurbatov V.L., Rimshin V.I. Osnovy tekhnologicheskoy mekhaniki tyazhelykh betonov. Mineral'nyye Vody, 2017.
25. Krishan A.L., Rimshin V.I., Zaikin A.I. Raschet prochnosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniyem. V sbornike: Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushcheye nauchnyye trudy III Vse-rossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu: v 7 tomakh. 2014. S. 308-314

Krishan A.L.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: kris_al@mail.ru

Rimshin V. I.

Research Institute of Building Physics of RAACS, Moscow

Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: v.rimshin@niisf.ru

As

tafeva M.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

Post-Graduate Student of the Department of Industrial and Civil Engineering

E-mail: skymanika@mail.ru

УДК 691-022.312

СЕЛЯЕВ В. П., СЕЛЯЕВ П. В., СОРОКИН Е.В., АЛИМОВ М. Ф.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОГИБОВ ПЛАСТИН ИЗ НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА

Исследовано влияние вида функциональной зависимости напряжений от деформаций на точность определения прогибов пластины из нелинейно деформируемого материала. Установлены требования, которые необходимо выполнить при выборе аналитического выражения для описания функциональной зависимости "σ – ε". Согласно экспериментальным данным установлено, что основные строительные материалы имеют нелинейно деформируемые диаграммы деформирования. Рассмотрены линейные, степенные, параболические, гиперболические, экспоненциальные, тригонометрические функции, применяемые для описания диаграмм деформирования цементных бетонов при сжатии. Графические и численные данные свидетельствуют о том, что аналитические функции с достаточной точностью описывают экспериментальную диаграмму "σ – ε". Показано, что основными физическими параметрами, определяющие физическую нелинейность диаграмм деформирования бетона являются временное сопротивление, модуль упругости и относительная деформация, соответствующая временному сопротивлению бетона.

Ключевые слова: напряжения, деформации, прогибы, зависимость, секущий модуль, касательный модуль, функциональная зависимость.

Диаграммы деформирования, определяющие соответствие между напряжениями и деформациями, наиболее полно отражают процессы, протекающие в структуре материала при нагружении. Экспериментальными исследованиями установлено, что по виду диаграмм деформирования основные строительные материалы являются нелинейно деформируемыми. Поэтому при построении нормативных методов расчета строительных конструкций большое внимание уделяется аналитическому описанию зависимости между напряжениями и деформациями при сжатии и растяжении.

Предложено несколько десятков функций для аналитического описания диаграмм деформирования: линейные, степенные, параболические, гиперболические, экспоненциальные, тригонометрические и т.д. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

По мнению Н.И. Карпенко предлагаемые аналитические функции должны отвечать ряду важных условий:

- возможность наиболее полного отражения через формулу деструктивных процессов, происходящих в структуре бетона при приложении напряжений;
- сравнительная простота аналитической зависимости и ее приведения к секущему и касательному модулям (при $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ в вершине);

- увязка с современными численными методами решения задач [11].

Эти условия хорошо зарекомендовали себя при подборе функций деформирования для цементных бетонов классов В20 ÷ В60.

Анализ свойств новых видов бетонов (полимерных, полимерцементных, цементно полимерных, высокопрочных и т.д.) показал, что для решения задачи оценки адекватности выбора функционального выражения «σ - ε» необходимо введение дополнительных условий: зависимость должна быть непрерывной дифференцируемой функцией на рассматриваемом участке; параметры функции «σ - ε» должны определяться из выполнения граничных условий с учетом нормируемых значений упруго-пластических характеристик материала; жела-

тельно, чтобы теоретическая зависимость « $\sigma - \varepsilon$ » отражала физическое представление: о составе и строении структуры материала; механизме разрушения структуры.

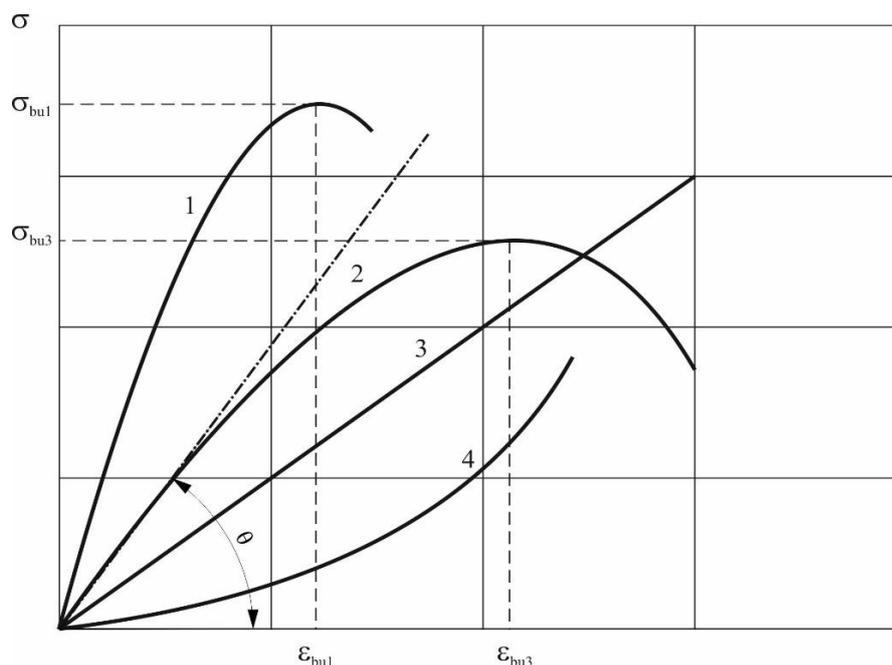


Рисунок 1 - Диаграмма деформирования: 1 – высокопрочная сталь; 2 – цементный бетон; 3 – волокнистый композит; 4 – самоупрочняющийся материал.

Влияние структуры и механизма разрушения материала на форму диаграмм деформирования показано на примере высокопрочной стали, цементного бетона, волокнистых композитов, зернистых систем вакуумированных в оболочке (на рис. 1). Принято считать, что линейная диаграмма деформирования реализуется при отрывном механизме разрушения и высоком объемном содержании в структуре материала упругих элементов. Наличие в составе пластически деформируемых частиц и реализация сдвигового механизма разрушения приводит к искривлению диаграмм [11, 12].

Сравнительная простота аналитической зависимости и хорошая аппроксимация экспериментальных значений « $\sigma - \varepsilon$ » не всегда гарантирует пригодность аналитической функции для расчета конструкций.

Для подтверждения этой гипотезы рассмотрим задачу о деформировании под нагрузкой пластичного изотропного материала, физическая нелинейность которого описывается аналитическими функциями « $\sigma - \varepsilon$ » различного вида. (см. таблица 1).

В первом случае (функция Бюлфингера Г. Б.) коэффициенты α и β определены из условий: при $\varepsilon \rightarrow 0$ модули касательный E_k и секущий E_c равны; при $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{bu}$ отношение модулей равно $\frac{E_0}{E_c} = 2$; $0.5 \leq \frac{E_c}{E_0} = \nu \leq 1.0$, тогда $\alpha = \frac{\sigma_{bu}}{\varepsilon_{bu}^{1/\nu}}$, где $E_0 = \text{tg}\Theta$ – мгновенный модуль

упругости, $E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}$. Если принять $\nu = 0.5$, то получим $\alpha = \sigma_{bu} \cdot \varepsilon_{bu}^{-2}$, $\beta = 2$ и диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » будет подобна графику 4 на рисунке 1. Предложено зависимость параметра ν от уровня напряжений и деформаций моделировать отрезком эллипса или параболы [11].

Таблица 1– Функции для описания диаграмм деформирования, полученных для бетона при сжатии

№ п/п	Вид функции «σ - ε»	Аналитическое представление	Коэффициенты	
			α	β
1	Бюльфингера Г. Б.	$\sigma = \alpha \cdot \varepsilon^\beta$	$\frac{\sigma_{bu}}{\varepsilon_{bu}^{1/\nu}}$	$\frac{\beta}{\nu}$
2/2'	Герстнера Ф. И.	$\sigma = \alpha \cdot \varepsilon - \beta \cdot \varepsilon^2$	E_0	$\frac{E_0/2\varepsilon_{bu}}{(E_0 - \varepsilon_{bu})/\varepsilon_{bu}}$
3/3'	Лукаша П. А.,	$\sigma = \alpha \cdot \varepsilon - \beta \cdot \varepsilon^3$	E_0	$\frac{E_0/3\varepsilon_{bu}^2}{(E_0 - E_{bu})/\varepsilon_{bu}^2}$
4	Тимошенко С.П.	$\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha + \beta \cdot \varepsilon}$	$\frac{1}{E_0}$	$\left(\frac{1}{E_{bu}} - \frac{1}{E_0}\right) \frac{1}{\varepsilon_{bu}}$
5	Соколовского В. В.	$\sigma = \frac{\alpha \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)^2}}$	E_0	$\frac{\varepsilon_{bu}}{\sqrt{\left(\frac{E_0}{E_{bu}}\right)^2 - 1}}$
6	Экспоненциальная	$\sigma = \alpha \cdot \varepsilon_i \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\beta}\right)$	E_0	$\varepsilon_{bu} \cdot 1.45$
7	ЕС	$\sigma = \frac{\alpha \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}}\right)^2}{1 + \beta \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}}}$	$\frac{E_0}{E_{bu}}$	$\frac{E_0}{E_{bu}} - 2$
8	Бондаренко В.М.	$\varepsilon = \frac{\sigma \left[1 + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_{bu}}\right)^\beta\right]}{E_0}$	0.9136	5.636
9	Карпенко Н.М.	$\sigma = \nu \cdot E_0 \cdot \varepsilon$ $\nu = \nu_{bu} + (\nu_0 - \nu_{bu}) \cdot \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}$	$\nu_0 = 1$ $\eta = \frac{\sigma_b}{\sigma_{bu}}$	$\omega_1 = 2 - 2.5\nu_{bu}$ $\nu_{bu} = \frac{\sigma_{bu}}{\varepsilon_{bu} \cdot E_0}$ $\omega_2 = 1 - \omega_1$
10	Зависимость Сен-Венана	$\sigma = \alpha \times \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}}\right)^\beta\right]$	24.92	2.399

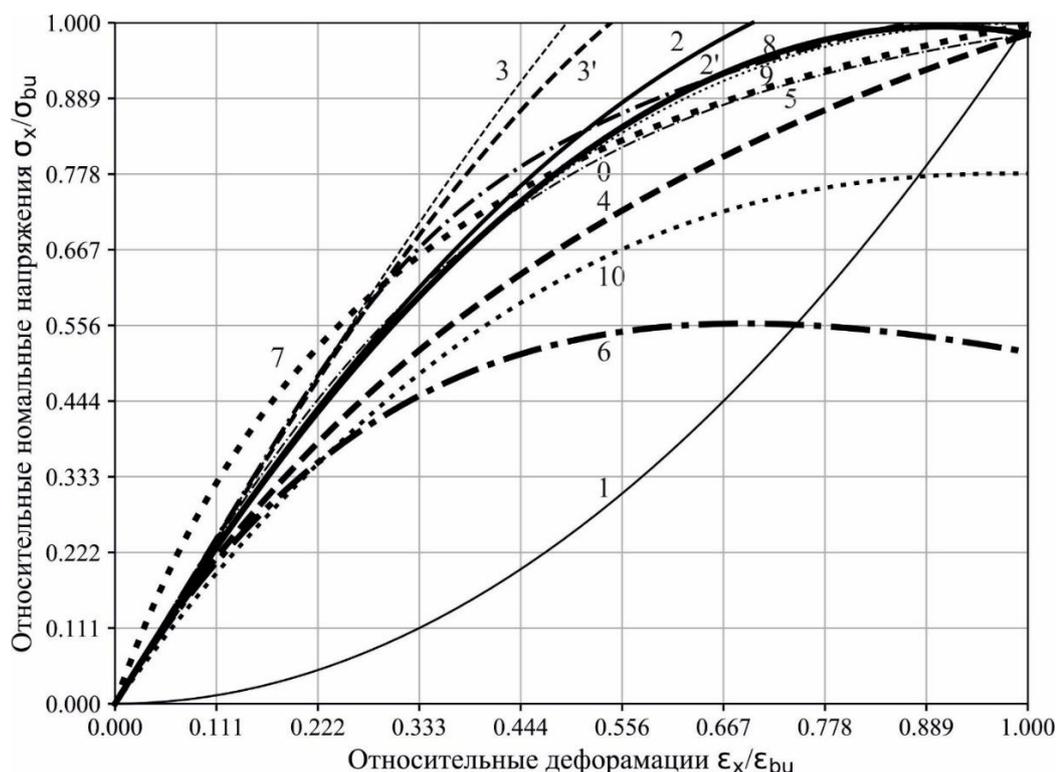


Рисунок 2 - Соответствие аналитических функций экспериментальной диаграмме « $\sigma - \varepsilon$ »: 0 - экспериментальная диаграмма; 1 - 10 - функции по таблице 1

Параметры функций Герстнера Ф.И. (2) и П.А. Лукаша (3), С.Л. Тимошенко (4), В.В. Соколовского (5), экспоненциальной (6), ЕС (7) определены из условий: $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$ и $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ при $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{bu}$ и $\sigma \rightarrow \sigma_{bu}$.

Полученные выражения для определения коэффициентов α и β приведены в таблице 1.

Параметр β для функций 2' и 3' определялся дополнительно из условия если $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$, то $\sigma = \sigma_{bu}$ (выражение для β приведены в знаменателе).

Для функций 8, 9, 10 параметры α и β определялись методом наименьших квадратов по экспериментальным данным.

Соответствие аналитических функций экспериментальной диаграмме « $\sigma - \varepsilon$ » показано на рис. 2. Расчетные данные приведены в таблице 2 с учетом экспериментальных данных, приведенных в работе Н.И. Карпенко [11] ($\sigma_{bu} = 32$ МПа, $\varepsilon_{bu} = 0.0022$, $E_0 = 32000$ МПа, $E_{bu} = 14500$ МПа, $\nu = \frac{E_{bu}}{E_0} = 0.45$).

Полученные выражения функции « $\sigma - \varepsilon$ » были применены при расчете прогибов шарнирно опертой по контуру плиты с размерами в плане 200×200 см и высотой поперечного сечения 20 см.

Плита выполнена из бетона, который имеет нижеследующие характеристики: $E_0 = 24020$ МПа; коэффициент поперечных деформаций $\nu = 0.2$; деформации ε_{bu} соответствующие

временному сопротивлению σ_{bu} равны $\epsilon_{bu} = 0.002$; предельная деформативность $\epsilon_{b,max} = 0.003$; $\sigma_{bu} = 25$ МПа.

Таблица 2

Обозначение	Значения показателя						Вид зависимости
	2	3	4	5	6	7	
1	6.0	12.0	20.0	24.0	28.0	32.0	8
σ , МПа [11]	6.0	12.0	20.0	24.0	28.0	32.0	Данные Н.И Карпенко [11]
ϵ , ‰, [11]	0.200	0.4	0.8	1.0	1.4	2.2	Данные Н.И Карпенко [11]
ϵ/ϵ_{bu} (э)	0.09	0.18	0.36	0.45	0.64	1.0	
σ/σ_{bu} (э)	0.19	0.375	0.625	0.75	0.875	1.0	Аналитические функ- ции σ/σ_{bu}
1. Бюльфингера Г. Б.	0.002	0.03	0.13	0.2	0.4	1.0	$\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right)^2$
2. Герстнера Ф. И.	0.19	0.38	0.67	0.8	1.0	1.14	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right)$
2'. Герстнера Ф. И.	0.19	0.37	0.66	0.77	0.93	1.0	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left(1 - \frac{1 - \frac{E_{bu}}{E_0}}{\epsilon_{bu}} \epsilon\right)$
3. Лукаша П. А.,	0.2	0.4	0.8	0.96	1.20	1.52	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\epsilon^2}{\epsilon_{bu}^2}\right)$
3'. Лукаша П. А.,	0.2	0.4	0.76	0.92	1.14	1.0	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left[1 - \left(1 - \frac{E_{bu}}{E_0}\right) \frac{\epsilon^2}{\epsilon_{bu}^2}\right]$
4. Тимошенко С.П.	0.18	0.33	0.56	0.65	0.8	1.0	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left[1 + \left(\frac{E_0}{E_{bu}} - 1\right) \frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right]^{-1}$
5. Соколовского В. В.	0.2	0.38	0.66	0.76	0.89	1.0	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left[1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right)^2 \left(\left(\frac{E_0}{E_{bu}}\right)^2 - 1\right)\right]^{-1}$
6. Экспоненциаль- ная	0.18	0.34	0.58	0.65	0.77	0.84	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \exp\left(-\frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right)$
7. ЕС	0.19	0.36	0.63	0.74	0.90	0.99	$\frac{\epsilon \cdot E_0}{\epsilon_{bu} \cdot E_{bu}} \left[1 - \frac{E_{bu} \cdot \epsilon_{bu}}{E_0 \cdot \epsilon} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{E_0}{E_{bu}} - 2\right) \frac{\epsilon}{\epsilon_{bu}}\right]^{-1}$

Пластина нагружена равномерно распределенной нагрузкой q .

Уравнение изгиба пластинки из нелинейно деформируемого материала имеет вид:

$$\nabla^2(D_c \nabla^2 W) - \frac{1}{2} L(D_c W) = q(x, y), \quad (3)$$

где

$$L(D_c W) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D_c \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(D_c \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) - 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(D_c \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right). \quad (4)$$

Пространственная координата жесткости определяется по формуле:

$$D_c(W(x, y)) = \frac{4}{3} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E_c(\varepsilon_i(W)) z^2 dz. \quad (5)$$

Перемещения отдельного элемента пластинки могут быть определены из уравнения:

$$D_c \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) = q(x, y) \quad (6)$$

При этом деформации отдельного элемента определяются из соотношений:

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \quad (7)$$

Физические соотношения связывающие деформации и напряжения:

$$\sigma_x = \frac{E(\varepsilon_i)}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E(\varepsilon_i)}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x), \quad \tau_{xy} = \frac{E(\varepsilon_i)}{2(1-\nu)} \gamma_{xy}. \quad (8)$$

Поставленная задача была решена методом последовательного нагружения. При этом перемещения, необходимые для определения деформаций и напряжений, находились из решения конечноразностного аналога уравнения (3) при заданных граничных условиях. На каждом этапе нагружения фиксировалась величина максимальных деформаций (7) и соответствующих напряжений (8).

Для исследования влияния переменной жесткости на работу изгибаемой пластины построены графики изменения деформаций пластины от уровня равномерно распределенной нагрузки при различных законах изменения секущего и касательного модулей упругости материала (см. рис. 3). Графические (рис. 2) и численные данные (таблица 2) свидетельствуют о том, что аналитические функции 2, 5, 7, 8, 9 (по таблице 1) с достаточной точностью описывают экспериментальную диаграмму « $\sigma - \varepsilon$ », представленную в работе [11]. Видимое расхождение диаграмм начинается после превышения нагрузкой величины 0.3 от разрушающей. Для аналитического описания диаграмм деформирования можно рекомендовать функции В. М. Бондаренко, Н.И. Карпенко, Европейскую (ЕС) и В. В. Соколовского, которые наиболее полно отвечают требованиям, сформулированным при выборе аналитических функций « $\sigma -$

ε». При нагрузке, не превышающей уровень 26.7 кН/м² практически все рассматриваемые функции с достаточной точностью описывают процесс деформирования плиты.

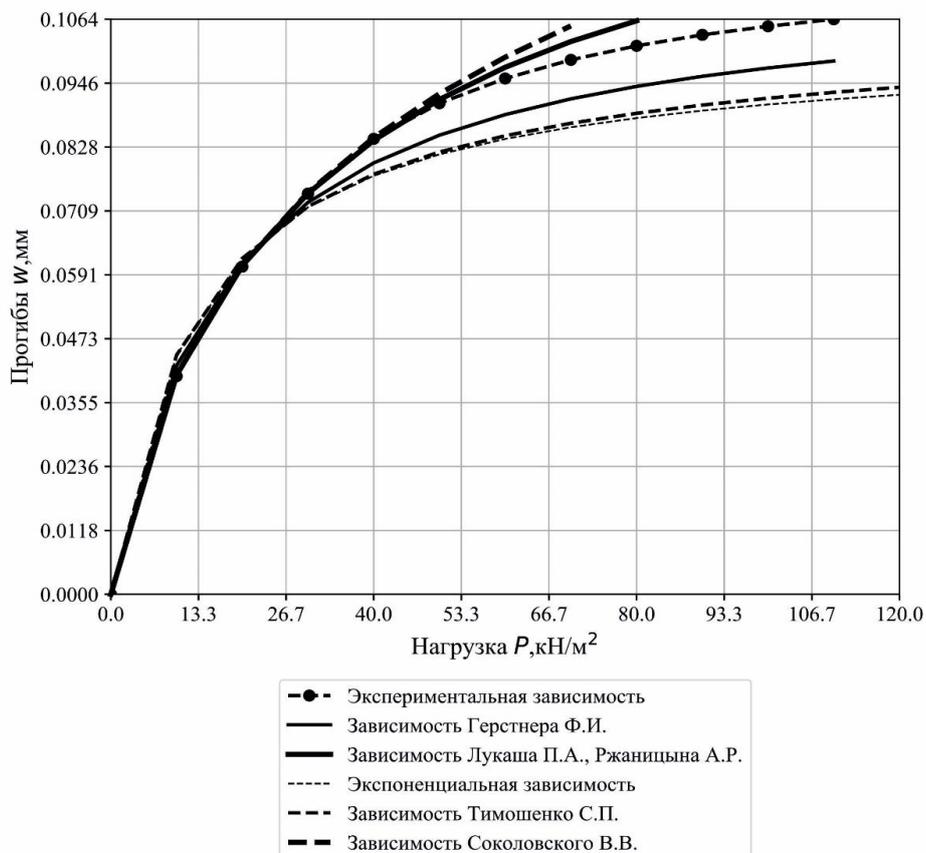


Рисунок 3 - Зависимость прогибов от интенсивности нагрузки при заданных законах изменения жесткости

Точность описания диаграмм деформирования можно повысить, используя специальные методики корректировки параметров α и β .

Выводы

Для аналитического описания диаграммы деформирования бетона предложено множество различных зависимостей: степенных, параболических, гиперболических, экспоненциальных, тригонометрических и более сложных. Анализом установлено, что при выборе аналитического выражения для описания функциональной зависимости « $\sigma - \epsilon$ » необходимо выполнение следующих критериев:

- зависимость должна быть непрерывной дифференцируемой функцией на рассматриваемом участке;
- теоретическая зависимость должна отражать физические представления о работе нелинейно деформируемого тела;
- параметры функциональной зависимости α и β должны подбираться с учетом нормируемых упругопластических характеристик материала;
- при подборе вида функции « $\sigma - \epsilon$ » необходимо проверить условия:
 первая производная $d\sigma/d\epsilon$ в точке экстремума ($\epsilon = \epsilon_{bu}$, $\sigma = \sigma_{bu}$) должна быть равна нулю; при $\epsilon \rightarrow 0$, $d\sigma/d\epsilon \rightarrow E_0$; при $\epsilon = \epsilon_{bu}$, $\sigma = \sigma_{bu}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукаш П. А. Основы нелинейной строительной механики М.: Стройиздат, 1978. – С. 202.
2. Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона М.; Л.: Гос. Изд-во строит. лит. 1941. – С. 447.
3. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет конструкций специальных сооружений М.: Стройиздат, 1990. – С. 208.
4. Байков В. Н., Горбатов С. В., Димитров З. А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей. // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. - 1977. - № 6. С. 15–18.
5. Мурашкин Г. В., Мурашкин В. Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы НДС // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. - 1997. - № 10. С. 4–6.
6. Мурашкин Г. В., Алешин А. Н., Гимадетдинов К. И. Тяжело нагруженные полы из бетона, твердеющего под давлением // Изв. вузов. Строительство – 1995, - № 12, с. 136-139.
7. Прокопович А.Д. К определению зависимости « σ - ϵ » с ниспадающим участком для бетона при сжатии железобетонных конструкций. // Куйбышев. гос. ун-т. им. А.И. Микояна. Куйбышев 1979. с. 33 – 39.
8. Smith G.M., Yound L.E. Ultimate flexural analysis based on Stress – Strein curves of cylinders. Journal of the American Concrete Institute. – 1956. – Vol. 28(53), part 1 – N6 – p. 597 – 609.
9. Гениев Г. А. Некоторые задачи расчета стержней при общей нелинейной зависимости напряжений и деформаций. – В сб. статей ЦНИИПС. М., Госстройиздат, 1954, вып. 13.
10. Бондаренко В. М., Шагин А. Л. Расчет эффективных многокомпонентных конструкций. – М.: Стройиздат, 1987. – 175 с.
11. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996.
12. Травуш В.И., Селяев В.П., Селяев П.В, Кечуткина Е.Л. О возможном квантовом характере деформаций и разрушения композитов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016 - №9, с. 94 – 100.

Селяев Владимир Павлович,

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарева"; ул. Большевистская, д. 68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005
академик РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой "Строительные конструкции"
E-mail: ntorm80@mail.ru

Селяев Павел Владимирович

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарева"; ул. Большевистская, д. 68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005
кандидат технических наук, доцент кафедры "Строительные конструкции"
E-mail: ntorm80@mail.ru

Алимов Марат Фатихович

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарева"; ул. Большевистская, д. 68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005
аспирант кафедры "Строительные конструкции"
E-mail: marat_alimov.91@mai.ru

Сорокин Евгений Вячеславович

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарева"; ул. Большевистская, д. 68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005
кандидат технических наук, доцент кафедры "Строительные конструкции"
E-mail: evssar@yandex.ru

SELYAEV V. P., SELYAEV P. V., ALIMOV M. F., SOROKIN E. V.

ANALYTICAL DESCRIPTION OF CONCRETE DEFORMATION DIAGRAMS FOR THE CALCULATION OF PLASTIC SURFACES FROM NONLINEARLY DEFORMABLE MATERIAL

The influence of the form of the functional dependence of the stresses on deformations on the accuracy of determining the deflections of a plate from a nonlinearly deformed material is investigated. The requirements that must be fulfilled when choosing an analytic expression for the description of the functional dependence " σ - ϵ " are established. According to experimental data, it is established that the basic building materials have nonlinearly deformed deformation diagrams. Linear, power, parabolic,

hyperbolic, exponential, trigonometric functions used to describe the deformation diagrams of cement concrete under compression are considered. Graphical and numerical data indicate that analytical functions describe the experimental "σ-ε" diagram with sufficient accuracy. It is shown that the basic physical parameters that determine the physical nonlinearity of the concrete deformation diagrams are the temporary resistance, the modulus of elasticity and the relative deformation corresponding to the temporary resistance of concrete.

Key words: stresses, deformations, deflections, dependence, secant module, tangent module, functional dependence.

REFERENCES

1. Lucas, P. A. The foundations of nonlinear structural mechanics, M: Stroyizdat, 1978. – P. 202.
2. Stolyarov Y. V. introduction to the theory of reinforced concrete M., L.: GOS. Publishing house building. lit. 1941. – P. 447.
3. Popov N. N., Rastorguev B. S. structural analysis of special structures, M: Stroyizdat, 1990. - P. 208.
4. Baykov V. N., Gorbatov S. V., Dimitrov, Z. A. Construction of the dependence between stresses and deformation of compressed concrete according to the system of indicators. Proc. universities. Ser.: The construction and architecture. - 1977. - No. 6. P. 15-18.
5. Murashkin G. V., Murashkin V. G. Modeling of the deformation diagram of concrete and the scheme of the stress-strain state, Proc. universities. Ser.: The construction and architecture. - 1997. - No. 10. P. 4-6.
6. Murashkin G. V., Aleshin A. N., Gimazetdinov K. I. Heavily loaded floors made of concrete hardening under pressure, Proc. universities. Construction – 1995, - No 12, P. 136-139.
7. Prokopovich A. D. To the determination of the dependence of «σ-ε» from the drop-down plot for concrete in compression concrete structures. // Kuybyshev. GOS. UN-t im. A. I. Mikoyan. Kuibyshev 1979. P. 33 – 39.
8. Smith G. M., L. E. Young Ultimate flexural analysis based on Stress – Strain curves of cylinders. Journal of the American Concrete Institute. – 1956. – Vol. 28(53), part 1 – N6 – P. 597 – 609.
9. Geniev G. A. Some problems of calculation members for General nonlinear dependence of stress and strain. – In: collection of articles, CSRIIS. M., Gosstroizdat, 1954, vol. 13.
10. Bondarenko V. M., Shahin, A. L., Calculation of effective multicomponent structures. – M.: Stroyizdat, 1987. – P. 175
11. Karpenko N.I. General models of mechanics of refractory concrete. - Moscow: Stroyizdat, 1996.
12. Travush V.I., Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L. On the possible quantum character of deformations and destruction of composites // Industrial and Civil Engineering. - 2016 - No. 9, p. 94 - 100.

Selyaev Vladimir Pavlovich,

Mordovian State University named after N.P. Ogarev; Saransk
Academician of the Russia Academy of Architectural and Construction Sciences,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the department "Building structures"
E-mail: ntorm80@mail.ru

Selyaev Pavel Vladimirovich,

Mordovian State University named after N.P. Ogarev; Saransk
Candidat of Science, Associate Professor of the department «Building structures»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Alimov Marat Fatihovich,

Mordovian State University named after N.P. Ogarev; Saransk
Postgraduate of the department "Building structures"
E-mail: marat_alimov.91@mai.ru

Sorokin Evgeniy Vyacheslavovich,

Mordovian State University named after N.P. Ogarev; Saransk
Candidat of Science, Associate Professor of the department «Building structures»
E-mail: ntorm80@mail.ru

УДК 624.012.4

ШАПИРО Г.И., ШАПИРО А.Г., ЛОГИНОВ Б.А.

К ВОПРОСУ О ФРАКТОГРАФИИ БЕТОНА

Для многих материалов существует зависимость, полученная на основании теории размерностей, связи концевой области трещины с крупностью структуры материала. При изучении поверхности разрушения была установлена связь параметров профилограммы, снятой с поверхности разрушения образцов на цементном вяжущем с внутренней структурой материала. В работе на серии экспериментов показано, что снятые с поверхности разрушения бетона, образованной от растяжения, профилограммы, обработанные клеточными методами, описываются фрактальной геометрией, причем величина фрактальной размерности профилограммы связана с градиентом растягивающих напряжений.

Ключевые слова: клеточный метод, поверхность разрушения, профилограммы, структура бетона, фрактальная размерность.

Материаловедение занимается вопросами изучения поверхности разрушения различных материалов. В [1] отражены различные аспекты фактографии связанные с разрушением металлов. Поверхность разрушения материала несет много информации, о его внутренней структуре, характере разрушения, прочности и другие вопросы. К сожалению, это направление недостаточно развито, в исследованиях связанных с бетоном.

Для многих материалов в [2,3] показано существование зависимости полученной на основании теории размерностей:

$$K \cong R_p \sqrt{a} F, \quad (1)$$

где K – характеристика трещиностойкости материала, например коэффициент интенсивности напряжений при растяжении K_{Ic} , R_p – прочность материала на растяжение, a – размер зерна структуры материала, F – независящая от a функция безразмерных отношений, составленная из механических характеристик материала.

С целью проверки справедливости соотношения (1) для бетона были проведены специальные опыты на цементном камне, растворе и бетоне. Результаты этих исследований, а также ранее опубликованные данные опытов на бетоне в [4] показали, что укрупнение структуры материала приводит к существенному увеличению его сопротивления развитию трещин (при рассмотрении фиксированного значения прочности на растяжение). При этом размер концевой области трещины d (зоны неупругого деформирования материала в конце трещины), определяемый по приближенной формуле

$$d = \frac{K^2}{4R_p^2} \quad (2)$$

существенно зависит от крупности структуры материала и изменяется для рассматриваемых материалов в широком диапазоне: от 0,06 - 0,21 см для цементного камня до 7,4 – 28,5 см для бетона. Величина d зависит не только от крупности структуры материала, но и его прочности. Величина d тем больше, чем крупнее структура и ниже прочность материала или меньше его возраст, и составляет для бетона, раствора и цементного камня при прочности на растяжение более 2,5 – 3,0 МПа в среднем соответственно 110; 17 и 1,2 мм. Различия в величинах d для названных материалов объясняет разный характер разрушения от развития трещин отрыва в образцах одного размера, если он недостаточно велик. При этом хрупкое разрушение характерно для цементного камня, пластичное – для раствора и наиболее пла-

стичное – для бетона, как это имеет место и при других видах сопротивления рассматриваемых материалов, что отмечалось А.А. Гвоздевым.

В [5,6] при изучении поверхности разрушения бетона, раствора, и цементного камня была установлена связь показателей профилограммы, снятой с поверхности разрушения с внутренней структурой материала.

Было выяснено, что по профилограммам, снятым с поверхностей разрушения, образованных трещиной отрыва, при помощи статистической обработки были получены приближенные значения размеров зерна структуры рассматриваемых материалов. Под зерном структуры понимается некоторый характерный для данного материала объем, в котором представлены все составляющие его компоненты. Оценкой сверху размера зерна A для рассматриваемых материалов является определяемое при анализе срезов максимальное расстояние между зернами заполнителя для бетона и раствора, а для цементного камня – между не до конца гидратированными частицами цементного клинкера. Учитывая малую раздвижку зерен заполнителя, величина A равна для бетона и раствора приблизительно максимальной крупности заполнителя (20 и 5 мм соответственно), а для цементного камня – 0,3 мм.

При статистической обработке для исключения тренда использован метод нахождения математического ожидания с помощью, скользящей средней. После исключения тренда определялась спектральная плотность. По наиминимейшей частоте f , соответствующей максимуму спектральной плотности и удовлетворяющей условию $f \geq 1/(2A)$, были найдены приближенные значения размера зерна материала $a = 1/(2f)$, которые оказались равными для бетона, раствора и цементного камня соответственно 14; 3,0; 0,22 мм.

Из опытов при варьировании только размера зерна материала получено, что характеристика трещиностойкости материала (K) пропорциональна $a^{1/4}$, а прочность при растяжении - $a^{-1/4}$. Отсюда следует, что характеристика K пропорциональна величине $R_p \sqrt{a}$, т.е. подтверждается соотношение (1).

В целях углубления изучения полученных результатов проведена работа по выявлению влияния на поверхность разрушения, бетонных образцов различных факторов - прочности материалов и напряженного состояния при разрушении.

Из бетона Краснопресненского завода железобетонных конструкций АО ДСК-1 г. Москвы были изготовлены образцы кубов и призм. Для изготовления этих образцов использовался бетон, идущий для изготовления изделий класса В27,5.

Состав бетона на 1м²:

- | | |
|--|---------------------|
| • Цемент – 430 кг | ПЦ 500 |
| • Песок – 780 кг | Мк= 1,5÷1,8 |
| • Щебень (гранитных пород)– 1020 кг | 5÷20 мм |
| • Вода – 120 л | |
| • Добавка «Реламикс ПК» тип 2 – 2,1 кг | осадка конуса 15 см |

Расход материалов на заводе корректируется в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, влажности материалов и нормальная густота цементного теста.

Бетонные образцы, кубы с номинальными размерами 100*100*100 мм и призмы с номинальными размерами 100*100*400 мм, изготавливались в цехе завода.

Была изготовлена партия образцов, из которой в возрасте 1 сутки, 7 сутки, 28 сутки, 51 сутки проводились испытания образцов на сжатие, раскалывание и четырехточечный изгиб в заводской лаборатории. Испытания, обработка и оценка результатов проведенных испытаний велась в соответствии с ГОСТ 10180-2012.

В таблице 1 приведены результаты проведенных испытаний: прочность бетона на сжатие (R); прочность на растяжение при раскалывании (R_{II}); прочность на растяжение при изгибе (R_{pb}); призмная прочность (R_b); начальный модуль упругости (E_b). Последние две характеристики определены по существующим методикам.

Средняя масса бетонных образцов 2350 кг/м³.

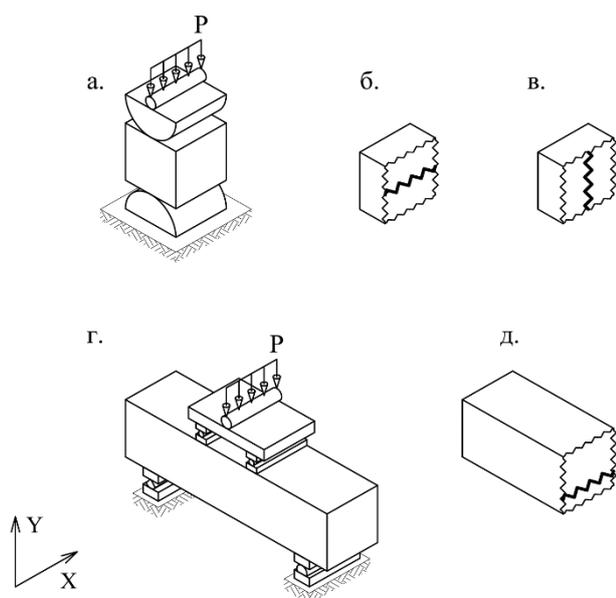
Все образцы выдерживались после испытаний несколько месяцев, чтобы не повредить поверхность разрушения при снятии профилограммы.

Профилограммы были сняты с 10 образцов после получения поверхностей разрушения, полученных после испытания кубов на раскалывание и призмы на четырехточечный изгиб (рис.1). Принята следующая маркировка образцов: цифры перед буквами *К* и *П* означают возраст образца в сутках; буква *К* - куб, испытанный на раскалывание, *П* - призма, испытанная на четырехточечный изгиб, первые восемь образцов, с которых сняты профилограммы как показано на рис.1 (б и д) и отмечены в таблице 1. Образцы *1К21*, *1К22* испытаны на раскалывание в возрасте одного дня, у которых профилограммы сняты по линии разрушения, проходящей как в растянутой зоне, так и огибающей сжатую зону (см. рис.1 в.)

Таблица 1

Возраст образцов, сутки	сжатие		раскалывание		изгиб		$\frac{\langle R_b \rangle}{\langle E_b \rangle}$ [кгс/см ²]
	R [кгс/см ²]	$\langle R \rangle$ [кгс/см ²]	R_{II} [кгс/см ²]	$\langle R_{II} \rangle$ [кгс/см ²]	R_{Ib} [кгс/см ²]	$\langle R_{Ib} \rangle$ [кгс/см ²]	
1	78,8	75,4	10,1	10,06 (8,3)*	13,6	13,7	61,4 ----- 14,9*10 ⁴
	73,7		10,0		13,8		
	73,7		-		-		
7	194,8	201,1	14,0	14,3 (16,1)*	28,1	28,1	147,3 ----- 25,6*10 ⁴
	194,8		16,0		28,1		
	213,8		12,8		-		
28	385,7	370,8	22,8	23,8 (20,5)*	42,5	43,9	209,0 ----- 35,5*10 ⁴
	397,1		20,9		45,4		
	329,6		27,9		-		
51	320,2	383,8	30,1	27,8 (21,8)*	47,0	46,1	227,0 ----- 35,8*10 ⁴
	418,0		27,6		45,2		
	413,2		25,7		-		

*Средняя прочность на растяжение при раскалывании, полученная при испытании призм на раскалывание осредненная по шести испытаниям.



- а. испытание образцов на раскалывание;
- б. снятие профилограмм вдоль линий расположенных в растянутой зоне после испытания образцов на раскалывание 1К, 7К, 28К, 51К;
- в. снятие профилограмм по линии разрушения, проходящей как в растянутой зоне, так и огибающей сжатую зону, после испытания образцов на раскалывание 1К21, 1К22;
- г. испытание образцов 1П, 7П, 28П, 51П на четырехточечный изгиб;
- д. снятие профилограмм после испытания образцов на четырехточечный изгиб.

Рисунок 1 - Схемы разрушения образцов и линии снятия профилограмм



Рисунок 2 - Специальный щуп для снятия профилограммы

Измерения профилограмм производились прибором «Контурограф модели 220» отечественного производства (Завод ПРОТОН, Москва), входящим в Государственный реестр средств измерений РФ под номером 58193-14 и имеющим свидетельство о госповерке. Он имеет возможность снимать профили длиной до 220 мм и высотой до 120 мм с шагом и точностью измерения высот до 0.1 мкм. Для измерения профилограммы с образцов поверхности бетона, отличающихся большой развитостью поверхности, содержащей легко откалывающиеся, но твердые зерна, был использован специально разработанный щуп (рис.2). Он отличается от стандартных для контурографов конических щупов тем, что имеет разные углы атаки и соскока. Угол атаки, которым он наезжает при движении по рельефу, сделан малым, около 45° к поверхности образца, для того чтобы уменьшить боковое давление щупа, которым он может скалывать зерна. Угол соскока при этом составляет стандартные 15° , что необходимо для прописывания зерен малых размеров.

На рис. 3 приведена фотография в момент снятия профилограммы с образца.

Обработку профилограмм проводилась методами фрактальной геометрии [7], которая позволяет определить размерность изучаемого объекта, в данном случае снятой профилограммы.



Рисунок 3 - Снятия профилограммы с образца

Существует несколько способов определения фрактальной размерности [7-9].

Рассмотрим широко используемый клеточный метод, который, в данном случае, заключается в следующем: линия, образуемая профилограммой, покрывается сеткой с размером ячейки δ , и определяется число клеток $N(\delta)$, «накрывающих» исследуемую линию (см. рис. 4), затем величина ячейки уменьшается (например в двое) и исследуемая линия покрывается новой сеткой $\delta_1 = \delta/2$ – определяется новое число клеток $N_1(\delta_1)$, «накрывающих» исследуемую линию. Рассматриваемый процесс повторяется многократно, на каждом шаге получается новая пара – сторона квадрата $\delta_i = \delta/2^i$ и

число клеток, покрывающих исследуемую линию, $N_i(\delta_i)$, где $i = 1, 2, \dots, n, \dots$

Полученные пары наносим на график, в котором оси построены в логарифмических значениях (в двойном логарифмическом масштабе). Через полученные точки графика проводим, с использованием метода наименьших квадратов, прямую линию, угол наклона которой определяет клеточную фрактальную размерность профилограммы.

На рис. 5 на графике в двойных логарифмических осях $L - \delta$ приведены вычисленные для образцов $K1, K7, K28, K51$ и $П1, П7, П28, П51$ указанные значения величин.

Из графика видно, что напряженно-деформированное состояние в образце перед разрушением влияет на фрактальную размерность, профилограмм. Их обработка показала, что фрактальная размерность, полученная из экспериментов на раскалывание ($D=1,061$) и меньше, чем фрактальная размерность, полученная из экспериментов на изгиб ($D=1,057$), то есть это указывает на влияние на фрактальную размерность градиента напряжений в образце перед разрушением. В среднем в проведенных экспериментах величина фрактальной размерности не велика и равна $D=1,060$. При этом, оценить влияние прочности бетона на его фрактальную размерность не удалось. Величины фрактальных размерностей в образцах *IK21* и *IK22* мало отличаются от величины фрактальных размерностей в образцах на раскалывание.

Таким образом, из экспериментов следует, что поверхность разрушения описывается методами фрактальной геометрии, и фрактальная размерность бетона зависит от напряженно-деформируемого состояния перед разрушением и подчиняется законам теории подобия и размерности (законам скайлинга) [11-12].

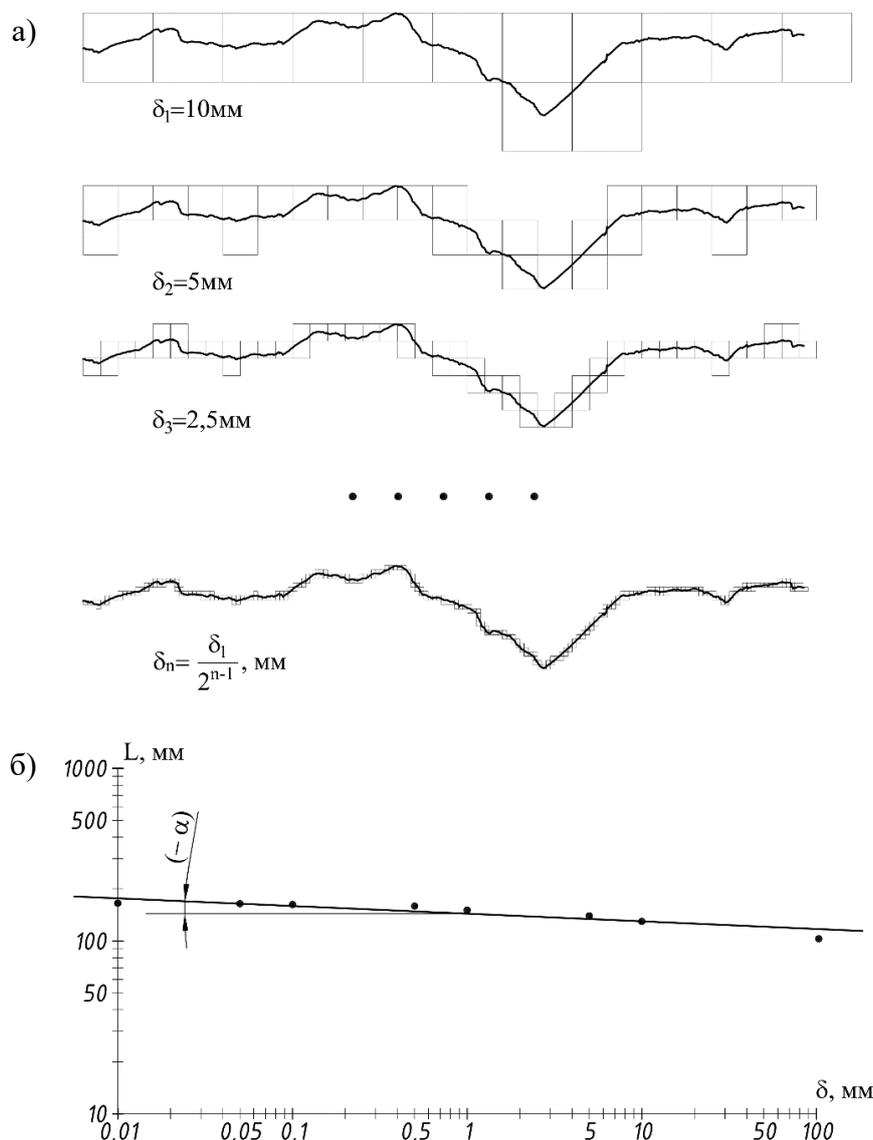


Рисунок 4 - Определение фрактальной размерности снятой профилограммы:

а. Измерение длины профилограммы образца как функция δ_n длины стороны квадратных ячеек $\delta_n \times \delta_n$, образующих покрытие профилограммы образца; *б.* График, построенный в двойном логарифмическом масштабе, соответствует зависимости $L(\delta) = \alpha \times \delta^{1-D}$, где D - фрактальная размерность, измеренной кривой профилограммы и равна $D=1 + \text{tg}(\alpha)$.

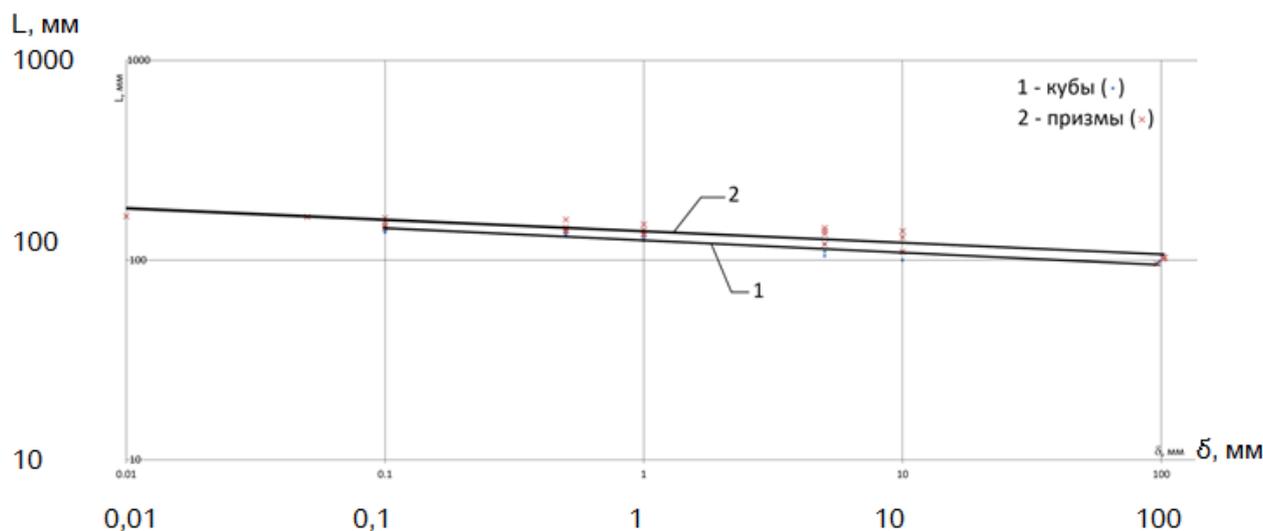


Рисунок 5 - Графики $L-\delta$, построенные в двойном логарифмическом масштабе, обработка проведена методом наименьших квадратов

Отдельно следует остановиться на сравнении данных экспериментов с данными, полученными в работе [10]. К сожалению, в упомянутой статье не приводятся никаких данных ни по прочности исследуемых бетонных образцов, ни по их составу, отсутствуют описания физико-механических характеристик материалов бетонов. Единственная характеристика бетона, указанная в статье, - максимальный размер крупного заполнителя, причем авторы статьи, судя по приведенным в статье данным, несколько завысили среднюю величину фрактальной размерности, приняв ее 1.2 вместо ~ 1.1 .

Представляется, что величина фрактальной размерности, исходя из наших экспериментов и экспериментов, описанных в [10], а так же учитывая работы использующие теорию подобия и размерности при подборе состава бетона, величину фрактальной размерности можно связать с максимальным размером крупного заполнителя и оценить следующим образом: $D \sim A^{0.01}$, где A размер крупного заполнителя.

Вывод

Поверхность разрушения бетона образованная от растяжения, описывается методами фрактальной геометрии, и величина фрактальной размерности связана с градиентом растягивающих напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман Я.Б Механические свойства металлов. Том 1. Машиностроение, М., 1974, 472 с.
2. Черепанов Г.П., Механика хрупкого разрушения. Наука. М., 1974, -640 с.
3. Ентов В.М., О роли структуры материала в механике разрушения. Известия АН СССР. Механика твердого тела, 1976 № 3, с. 110-118.
4. Ентов В.М., Ягуст В.И., Экспериментальное исследование закономерностей квазистатического развития макротрещин в бетоне. Известия АН СССР. Механика твердого тела, 1975, № 4, с. 93-103.
5. Шапиро Г.И., Ягуст В.И., Авторское свидетельство № 593146. Бюллетень изобретений № 6, 1978,- 2 с.
6. Шапиро Г.И., Ягуст В.И., Два способа увеличения сопротивления развитию трещин в бетонных и железобетонных конструкциях. ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. М., 1978,-13 с.
7. Мандельброт Б., Фрактальная геометрия природы. М.-Ижевск. 2010,- 656 с.
8. Федер Е. Фракталы. М., Мир. 1991,-260 с.
9. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001,- 528 с.

10. Saouma V.E., Barton C.C., Gamaleldin N.A. Fractal characterization of fracture surfaces in concrete. Engineering Fracture Mechanics vol.35, No. 1/2/3, pp. 47-53, 1990
11. Зельдович Я.Б., Соколов Д.Д., Фрактали, подобие, промежуточная асимптотика. Успехи математических наук. Т.145, в.3, 1985, с. 493-506.
12. Баренблатт Г.И., Автомодельные явления- анализ размерностей и скейлинг. Изд. Дом «Интеллект», 2009,-216 с.

Шапиро Г.И.

АО «МНИИТЭП», Москва
Руководитель по научно-технической работе
E-mail: g-shapiro@mail.ru

Шапиро А.Г.

ООО «Техрекон», Москва
нач. арх.-конст. отдела
E-mail: a-shapiro@mail.ru

Логинов Б.А.

завод «ПРОТОН», Москва
вед. конструктор
E-mail: b-loginov@mail.ru

SHAPIRO G. I., SHAPIRO A. G., LOGINOV B. A.

TO THE QUESTION FRACTOGRAPHY OF THE CONCRETE

For many materials there is a correlation between the area, that determines the crack growth, and the size of the material structure, obtained on the basis of the theory of dimensions. During the study of the fracture surface the connection between profilogram's parameters (taken from the sample fracture surface on a cement binder) and the material structure has been detected. Series of experiments shows, that the profilograms (taken from the fracture surface, that has been formed from stretching and processed by cellular methods) are described by fractal geometry methods. Moreover the value of the fractal dimension of the profilogram is related with the tensile stress gradient.

Keywords: *cellular method, destruction surface, profilograms, concrete structure, fractal dimension.*

REFERENCES

1. Fridman YA.B Mekhanicheskiye svoystva metallov. Tom 1. Mashinostroyeniye, M., 1974, 472 s.
2. Cherepanov G.P., Mekhanika khrupkogo razrusheniya. Nauka. M.,1974, -640 s.
3. Yentov V.M., O roli struktury materiala v mekhanike razrusheniya. Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela, 1976 № 3, s. 110-118.
4. Yentov V.M., Yagust V.I., Eksperimental'noye issledovaniye zakonmernostey kvazistaticheskogo razvitiya makrotreshchin v betone. Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela, 1975, № 4, s. 93-103.
5. Shapiro G.I., Yagust V.I., Avtorskoye svidetel'stvo № 593146. Byulleten' izobreteniy № 6, 1978,- 2 s.
6. Shapiro G.I., Yagust V.I., Dva sposoba uvelicheniya soprotivleniya razvitiyu treshchin v betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiyakh. TSNTI po grazhdanskomu stroitel'stvu i arkhitekture. M., 1978,-13 s.
7. Mandel'brot B., Fraktal'naya geometriya prirody. M.-Izhevsk. 2010,- 656 s.
8. Feder Ye. Fraktaly. M., Mir. 1991,-260 s.
9. Shreder M. Fraktaly, khaos, stepennyye zakony. Miniatyury iz beskonechnogo raya. NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2001,- 528 s.
10. Saouma V.E., Barton C.C., Gamaleldin N.A. Fractal characterization of fracture surfaces in concrete. Engineering Fracture Mechanics vol.35, No. 1/2/3, pp. 47-53, 1990

11. Zel'dovich YA.B., Sokolov D.D., Fraktali, podobiye, promezhutochnaya asimptotika. Uspekhi matematicheskikh nauk. T.145, v.3, 1985, s. 493-506.
12. Barenblatt G.I., Avtomodel'nyye yavleniya- analiz razmernostey i skeyling. Izd. Dom «Intellekt», 2009,- 216 s.

Shapiro G.

Joint-stock Company MNIITJeP, Moscow
Head scientific-technical Departement
E-mail: g-shapiro@mail.ru

Shapiro A.

Ltd "Tehrekon", Moscow
Head Archit-Konstr Departement
E-mail: a-shapiro@mail.ru

Loginov B.

fabriek «PROTON», Moscow
leading konstr.
E-mail: b-loginov@mail.ru

УДК 614.8.086.5

БАКАЕВА Н.В., КАЛАЙДО А.В.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

В настоящее время критерием радоноопасности участка строительства является величина плотности потока радона с поверхности грунта. Однако определение данной величины на стадии инженерно-экологических изысканий не предоставляет исходных данных для проектирования радоновой защиты зданий. В таких условиях необходима принципиально новая методика обеспечения радонобезопасности зданий на стадии проектирования, основанная на рассмотрении единой системы сред «грунт-атмосфера-здание». В статье предложен подход к определению требуемых радонозащитных свойств объекта строительства на основании анализа свойств грунта и конструкции подземной части здания. Данный подход не только учитывает радиационно-геологические характеристики участка строительства, но и позволяет осуществлять выбор оптимальных проектных решений подземных ограждающих конструкций. Его использование позволит сократить затраты на инженерно-экологические изыскания и избежать введения в эксплуатацию зданий с избыточными или недостаточными радонозащитными свойствами.

Ключевые слова: радон, грунт, эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА), диффузия, ограждающие конструкции

Проблема обеспечения радиационной безопасности объектов строительства сравнительно нова, начало системных исследований в данной области относится ко второй половине XX века. Именно тогда дома с экстремально высокими концентрациями радона в воздухе помещений (десятки – сотни тысяч Бк/м³) были выявлены в Скандинавских странах. Позднее высокие уровни внутреннего радона были отмечены в ряде районной США, Канады, Великобритании, а также стран Западной Европы. Причина радиационных аномалий была найдена в повышенном содержании урана и радия в грунтах указанных территорий. Поскольку удаление богатого естественными радионуклидами (ЕРН) грунта приводило к нормализации радоновой обстановки в зданиях, в научных кругах на какое-то время утвердилась диффузионная модель поступления радона из грунтового основания в воздух помещений.

Увеличение объема экспериментальных данных в последующие десятилетия поставило под сомнение диффузионную модель поступления. Дома с объемными активностями радона 500 Бк/м³ и более были выявлены на грунтах со средним и низким содержанием ЕРН, а сами уровни радона испытывали серьезные суточные и сезонные вариации. Для объяснения данных фактов была разработана конвективная модель переноса, согласно которой поступление радона в здание осуществляется через неплотности в его подземной части, а в категорию радоноопасных были включены территории, образованные грунтами с высокой воздухопроницаемостью (10^{-8} - 10^{-12} м²).

Полемика относительно доминирующего механизма переноса радона в грунте утвердила точку зрения, что радоноопасность участка застройки может быть оценена исключительно по характеристикам грунта. Как следствие, в РФ санитарными правилами ОСПОРБ-99/2010 установлено, что при плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта не более 80 мБк/(м²·с) участок под строительство классифицируется как нерадоноопасный. Нецелесообразность использования величины ППР на стадии инженерно-экологических изысканий наиболее полно отражена в работах Гулабянца и Микляева [1-3], ее законодательное закрепление привело к застою в развитии методов расчета поступления радона в здания. В настоя-

щее время очевидна необходимость в разработке принципиально нового подхода к обеспечению радоновой безопасности зданий в рамках исследования единой системы сред «грунт-атмосфера-здание».

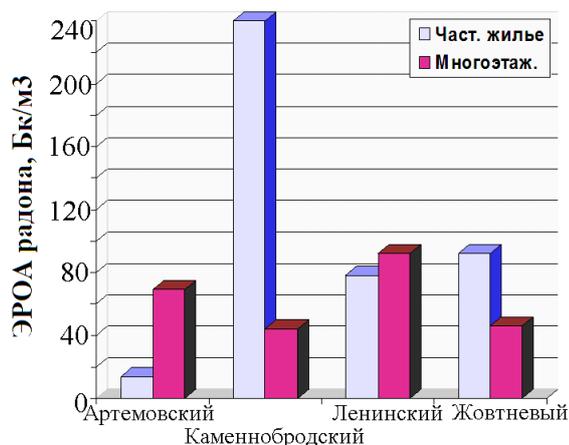


Рисунок 1 – Результаты радиационного мониторинга застройки Луганска

На данный момент все еще отсутствует единая точка зрения относительно доминирующего механизма поступления радона в здания. Довольно распространены случаи, когда на участках с высоким содержанием радия активности радона в помещениях незначительны, и наоборот. Аналогично, не отмечено повсеместного превышения установленных уровней радона в зданиях на проницаемых гравийных грунтах. Таким образом, и высокая воздухопроницаемость грунта, и повышенное содержание радия в нем являются одними из целого ряда признаков потенциальной радоноопасности зданий данной территории. Недостаточно знать количество радона, образующееся в грунтовом основании, необходимо еще уметь оценить его количество, поступающее в само здание.

Исследования уровней радона на данный момент проведены в большинстве субъектов Российской Федерации, по числу выполненных измерений РФ входит в первую пятерку стран мира. Однако подавляющее их большинство ограничивается оценкой среднегодовой ЭРОА в воздухе помещений определенной территории, не рассматривая противорадоновые мероприятия, которые в данных условиях и при минимальных экономических затратах приведут к максимальному снижению дозы облучения населения данной территории радонном.

С целью определения факторов, оказывающих наибольшее влияние на формирование радоновой обстановки в зданиях равнинных территорий, был проведен радиационный мониторинг застройки Луганска. Соотношение частного жилья и многоэтажных зданий соответствует структуре жилищного фонда каждого из районов города, результаты измерений представлены на рис. 1.

Гамма-спектрометрический анализ грунтов с территории объектов исследования каждого района города показал среднее содержание в них радия (29,3 – 35,0 Бк/кг). Повышенная радоноопасность Каменнобродского района объясняется структурой жилищного фонда – более 90% составляют частные домостроения без монолитного фундамента, построенные более полувека назад. Таким образом, именно конструкция пола здания является главным фактором, определяющим величину поступления радона из почвенного воздуха в воздух помещений. Аналогичные выводы сделаны британскими учеными, исследовавшими поступление радона в дома с подвалами [4; 5].

Для обеспечения радоновой безопасности зданий следует ограничивать величину поступления радона из грунта в здание a_{cp} , которая прямо пропорциональна радоновой нагрузке на подземные ограждающие конструкции N_{cp} и обратно пропорциональна общему сопротивлению радонопроницанию конструкции пола R_{Σ} . В общем случае удельное поступление радона из грунта можно выразить формулой

$$a_{cp} = \frac{N_{cp}}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{S_{пол}}{V}, \quad (1)$$

где $S_{пол}$ – площадь пола, м²; V – объем помещения, м³.

Также необходимо учесть постоянное по величине поступление радона из материалов ограждающих конструкций здания, которое в условиях радиационного контроля сырья доста-

точно невелико. Величина потока радона с поверхности стен и потолка $q_{см}$ не превышает 3-5 мБк/(м²·с) [6; 7], поэтому поступление радона от внутренних поверхностей ограждающих конструкций можно принять равным

$$a_{см} = q_{см} \cdot \frac{S_{оэп}}{V} = 5 \cdot \frac{2S_{пол} + S_{ст}}{V}. \quad (2)$$

Предельное допустимое поступление радона из грунта может быть найдено из решения уравнения радонового баланса помещения. Накоплению радона в помещении способствует его поступление из грунта и материалов ограждающих конструкций способствует увеличению его концентрации, а снижению концентрации – радиоактивный распад и воздухообмен

$$\frac{dq}{dt} = a_{эп} + a_{см} - (\lambda + n) \cdot q, \quad (3)$$

где q – объемная активность радона в помещении, Бк/м³; n – кратность воздухообмена, с⁻¹.

Уравнение (3) после разделения переменных имеет вид

$$\frac{dq}{a_{эп} + a_{см} - (\lambda + n) \cdot q} = dt \quad \text{или} \quad -\frac{1}{\lambda + n} \cdot \int_0^q \frac{d(a_{эп} + a_{см} - (\lambda + n) \cdot q)}{a_{эп} + a_{см} - (\lambda + n) \cdot q} = \int_0^t dt.$$

Интегрируя полученное уравнение, получаем

$$\ln \frac{q \cdot (\lambda + n) - a_{эп} - a_{см}}{a_{эп} + a_{см}} = -(\lambda + n) \cdot t.$$

Потенцируя обе части уравнения, получаем

$$\frac{q \cdot (\lambda + n) - a_{эп} - a_{см}}{a_{эп} + a_{см}} = e^{-(\lambda + n) \cdot t}.$$

Равновесную объемную активность радона q в помещении находим из условия

$$\frac{q \cdot (\lambda + n) - a_{эп} - a_{см}}{a_{эп} + a_{см}} = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\lambda + n) \cdot t} = 0 \quad \Rightarrow \quad q \cdot (\lambda + n) = a_{эп} + a_{см}.$$

Эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в помещении связана с объемной активностью q коэффициентом сдвига радиоактивного равновесия F

$$\text{ЭРОА} = q \cdot F,$$

поэтому допустимое поступление радона из грунта может быть выражено через ЭРОА

$$a_{эп}^{\text{доп}} = \frac{\text{ЭРОА}_{\text{доп}} \cdot (\lambda + n)}{F} - a_{см}. \quad (4)$$

Величина $a_{эп}^{\text{доп}}$ определяется требуемым значением ЭРОА радона в проектируемом здании. На данный момент для строящихся и реконструируемых зданий максимальное допустимое значение ЭРОА составляет 100 Бк/м³. Однако уровни, которые считаются обоснованно низкими на данный момент, вряд ли будут таковыми в обозримом будущем. Поэтому для проектируемых зданий целесообразно установить допустимое значение ЭРОА радона в помещении в пределах 50...60 Бк/м³ ($q \approx 150$ Бк/м³).

Уравнение (4) позволяет перейти к определению требуемого сопротивления радонопроницанию R_{mp} конструкции пола

$$\frac{N_{ср}}{R_{mp}} \cdot \frac{S_{пол}}{V} = \frac{\text{ЭРОА}_{\text{доп}} \cdot (\lambda + n)}{F} - a_{см}. \quad (5)$$

Для этого необходимо предварительно определить радоновую нагрузку на подземные ограждающие конструкции. В лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИ Строительной физики РААСН была разработана математическая модель, описывающая радоновую обстановку в системе сред «грунт-атмосфера-здание». В ее основе система двухмерных стационарных уравнений диффузионного переноса

$$D_i \left(\frac{\partial^2 q_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_i}{\partial y^2} \right) - (\lambda + n) \cdot q_i + G_i = 0, \quad i = 0, 1, 2, \quad (6)$$

где D_i – коэффициенты диффузии радона в воздухе, материале конструкции и грунте, соответственно, $\text{м}^2/\text{с}$; q_i – объемные активности радона в воздухе помещения, материале конструкции и почвенном воздухе, соответственно, $\text{Бк}/\text{м}^3$; G_i – скорость генерации радона в воздухе помещения, материале конструкции и почвенном воздухе, соответственно, $\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Для рассматриваемой системы граничные условия представляют собой равенство потоков на границах сред «грунт-атмосфера-здание», условия воздухообмена на границе «грунт-атмосфера» и «ограждающая конструкция - воздух в помещении», а также отсутствие потоков радона на внешних границах рассматриваемых областей. В процессе моделирования здание предполагалось симметричным и не имеющим подвала.

Описанная математическая модель переноса радона позволяет определить зависимость радоновой нагрузки N_{cp} от характеристик грунта и конструктивных особенностей здания. Из рис. 2, а видно, что радоновая нагрузка на подземные горизонтальные ограждающие конструкции несколько меньше радонового потенциала грунта, причем разница уменьшается с увеличением сопротивления радонопроницанию ограждающих конструкций здания. Радоновая нагрузка нелинейно возрастает по мере увеличения заглубления здания и асимптотически приближается к радоновому потенциалу грунта рис. 2, б.

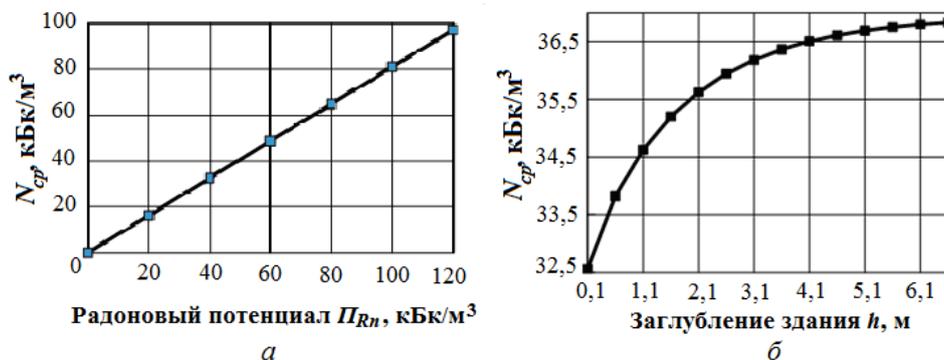


Рисунок 2 – Зависимость радоновой нагрузки N_{cp} на основание здания: а – от радонового потенциала грунта Pr_n ; б – от заглубления здания h

Радоновый потенциал грунта является комплексной характеристикой его физических свойств и определяется по формуле

$$Pr_n = C_{Ra} \cdot \rho_{cp} \cdot k_{эм}, \quad (7)$$

причем удельная активность радия в грунте C_{Ra} и коэффициент эманирования радона $k_{эм}$ могут быть определены в рамках одного гамма-спектрометрического исследования.

Также моделированием было установлено, что радоновая нагрузка N_{cp} растет с увеличением длины здания (рис. 3, а), что можно объяснить снижением бокового оттока радона из-под здания в сторону дневной поверхности. Зависимость радоновой нагрузки от коэффициента диффузии радона в грунте показана на рис. 3, б. В малопроницаемых грунтах ($k \leq 10^{-12} \text{ м}^2$) низкие значения N_{cp} объясняются малой глубиной, с которой радон способен достичь подзем-

ных горизонтальных ограждающих конструкций здания, а в высокопроницаемых грунтах данная зависимость становится малозначимой.

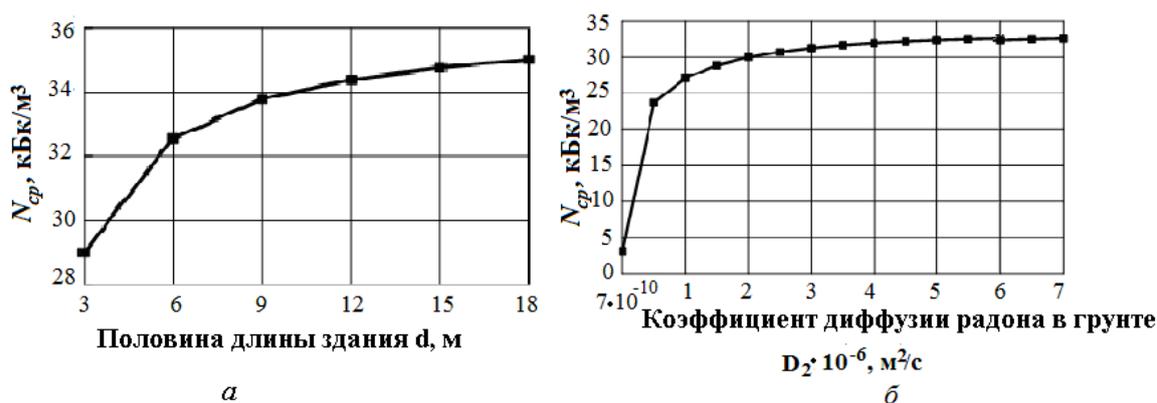


Рисунок 3 – Зависимость радоновой нагрузки N_{cp} на основание здания: а – от ширины здания; б – от коэффициента диффузии радона в грунте

Зная радоновую нагрузку на подземные ограждающие конструкции, по известным размерам строящегося здания и физическим характеристикам грунта, из (5) можно определить минимальное допустимое сопротивление радонопроницанию конструкции пола. Если оно обеспечивается только фундаментной плитой, то ее геометрические характеристики далее могут быть найдены из выражения

$$R_{mp} = \frac{1}{\sqrt{\lambda D}} \cdot sh \left(H \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right), \quad (8)$$

где H – толщина слоя бетона, м; D – коэффициент диффузии радона в бетоне, m^2/c .

Чаще всего сопротивление радонопроницанию здания формируется слоями бетона и гидро-газоизоляции. В таком случае его величина

$$R_{mp} = R_1 + R_2 = \frac{1}{\sqrt{\lambda D_1}} \cdot sh \left(H_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D_1}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\lambda D_2}} \cdot sh \left(H_2 \sqrt{\frac{\lambda}{D_2}} \right), \quad (9)$$

где H_1 и H_2 – толщина слоев бетона и гидро-газоизоляции, соответственно, м; D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии радона в бетоне и гидро-газоизоляции, соответственно, m^2/c .

Задавшись известными характеристиками одного из слоев (в данном случае – гидрогазоизоляции) можно определить минимальную необходимую толщину фундаментной плиты для соответствующей марки бетона. Возможен учет свойств и большего числа слоев в конструкции пола, однако на практике сопротивление поступлению радона в основном оказывают именно два рассмотренных выше слоя.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Оценка потенциальной радоноопасности участка застройки по величине плотности потока радона с поверхности грунта, законодательно закрепленная ОСПОРБ-99/2010, является одной из главных причин ошибок при проектировании противорадовой защиты зданий.

2. Поскольку поступление радона из грунта может изменяться в широких пределах применяемыми строительными технологиями и материалами, целесообразно ограничивать именно величину поступления радона из грунта.

3. Предложенная методика определения требуемых радонозащитных характеристик зданий разработана в предположении диффузионного переноса радона, что характерно для зданий с монолитным фундаментом. Представляет интерес оценка применимости данной модели к описанию радоновой ситуации в отличных по конструкции пола зданиях.

4. Использование предложенного подхода позволяет существенно упростить инженерно-экологические изыскания, сведя их к лабораторным исследованиям грунта и моделированию радоновой обстановки в здании определенной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулабянц, Л.А. Принципы построения новых норм проектирования противорадоновой защиты зданий // Благоприятная среда жизнедеятельности человека, 2009. – № 5. – С. 461-467.
2. Гулабянц, Л.А. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания / Л.А. Гулабянц, М.И. Лившиц, С.В. Медведев // Академия, 2016. - № 1. – С. 122-128.
3. Микляев, П.С. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий / П.С. Микляев, Т.Б. Петрова // АНРИ, 2007. – № 2. – С. 2-16.
4. F. Wang, I.C. Ward. The development of a radon entry model for a house with a cellar / Building and Environment, 2000. Vol. 35. Pp. 615-631.
5. F. Wang, I.C. Ward. Radon entry, migration and reduction in houses with cellars / Building and Environment, 2002. Vol. 37. Pp. 1153-1165.
6. Гулабянц, Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. – М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013. – 52 с.
7. Bakaeva N.V., Kalaydo A.V. Prediction of radon concentrations in above-ground apartments // International Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, art. 442. Pp. 280 – 286. DOI:10.5937/jaes15-14656.

Бакаева Наталья Владимировна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства
E-mail: natbak@mail.ru

Калайдо Александр Витальевич

ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», г. Луганск
Старший преподаватель кафедры БЖД, охраны труда и гражданской защиты
E-mail: kalaydo18@mail.ru

BAKAEVA N.V., KALAYDO A.V.

ENSURING THE RADIATION-ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTIONS

Now the radon flux density from soil surface is the only criterion for the radon hazard of construction site. However, the radon flux density determination at the environmental surveys stage does not provide initial data for the design of buildings radon protection. In such conditions, a fundamentally new methodology is needed to ensure the buildings radon safety at the design stage, which based on the unified media system "soil-atmosphere-building" consideration. The paper proposes an approach to determining the required radon-protective properties of a building on the basis of an analysis the soil characteristics and building underground part construction. This approach not only takes into account the construction site radiation and geological characteristic, but also allows the selection of optimal design solutions for underground walling. Its use will reduce the cost of engineering and environmental research and avoid the buildings with excess or insufficient radon-protective properties commissioning.

Keywords: radon, soil, equivalent equilibrium radon concentration (ERRC), diffusion, walling

REFERENCES

1. Gulabyants, L.A. Printsipy postroeniya novyih norm proektirovaniya protivoradonovoy zaschityi zdaniy // Blagopriyatnaya sreda zhiznedeyatelnosti cheloveka, 2009. – № 5. – S. 461-467.
2. Gulabyants, L.A. Opredelenie radonovoy nagruzki na podzemnyie ograzhdayuschie konstruksii zdaniya / L.A. Gulabyants, M.I. Livshits, S.V. Medvedev // Akademiya, 2016. - № 1. – S. 122-128.
3. Miklyayev, P.S. Mehanizmyi formirovaniya potoka radona s poverhnosti pochv i podhodyi k otsenke radonoopasnosti selitebnyih territoriy / P.S. Miklyayev, T.B. Petrova // ANRI, 2007. – № 2. – S. 2-16.

4. F. Wang, I.C. Ward. The development of a radon entry model for a house with a cellar / Building and Environment, 2000. Vol. 35. Pp. 615-631.
5. F. Wang, I.C. Ward. Radon entry, migration and reduction in houses with cellars / Building and Environment, 2002. Vol. 37. Pp. 1153-1165.
6. Gulabyants, L.A. Posobie po proektirovaniyu protivoradonovoy zashchityi zhilyih i obschestvennyih zdaniy. – M.: NO «FEN-NAUKA», 2013. – 52 s.
7. Bakaeva N.V., Kalaydo A.V. Prediction of radon concentrations in above-ground apartments // International Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, art. 442. Pp. 280 – 286. DOI:10.5937/jaes15-14656.

Bakaeva N. V.

South West State University, Kursk

Advisor RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department industrial and civil construction

E-mail: natbak@mail.ru

Kalaydo A. V.

Luhansk Taras Shevchenko national university, Luhansk

Senior lecturer of the Department of labour protection and civil defense

E-mail: kalaydo18@mail.ru

УДК 699.844.69.825

ГОРИН В.А., КЛИМЕНКО В.В., ПОРОЖЕНКО М.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕЖДУЭТАЖНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Рассматривается звукоизоляция многослойных конструкций междуэтажных перекрытий, обладающих лучшими технико-экономическими показателями, чем традиционные перекрытия с полами по упругим прокладкам. Выполнены теоретические исследования изоляции ударного шума. Установлено, что в области низких частот многослойные перекрытия обладают высокими звукоизоляционными качествами и приводят к снижению уровня ударного шума примерно на 24 дБ при каждом удвоении частоты. Наименьшей величины изоляция ударного шума достигается в полосах частот, соответствующих второй частоте собственных колебаний пола. В области средних и высоких частот рост дополнительной изоляции ударного шума под многослойным перекрытием замедляется и составляет 12 дБ на октаву. Проведена экспериментальная проверка полученных выводов. Сравнение расчетных и измеренных частотных характеристик снижения уровня ударного шума показало хорошее соответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований. Показано, что при одинаковой поверхностной плотности многослойные конструкции перекрытий лучше изолируют ударные и воздушные шума, чем традиционные конструкции перекрытий с полами по упругим прокладкам.

Ключевые слова: звукоизоляция, многослойные междуэтажные перекрытия, технико-экономические показатели

Создание благоприятного акустического режима в современных зданиях представляет собой важную и трудную проблему, решить которую невозможно без комплекса специальных конструктивных мероприятий по борьбе с шумом. Для снижения шума в настоящее время разработаны эффективные строительно-акустические методы, в том числе и метод звукоизоляции. Значительные резервы улучшения звукоизоляции зданий находятся в совершенствовании конструктивных решений междуэтажных перекрытий [1, 2]. Наиболее эффективными из них в настоящее время являются конструкции с полом по упругим прокладкам из звукоизоляционных материалов, уложенных на железобетонный настил поверхностной плотностью около $300\text{--}350\text{ кг/м}^2$, и с рулонным полом по железобетонному настилу поверхностной плотностью более 350 кг/м^2 [3, 4, 5].

Конструкции первого типа с точки зрения звукоизоляции более эффективны, надежны и обладают наименьшей поверхностной плотностью, но достаточно трудоемки. Конструкции второго типа проще в производстве, но имеют большую поверхностную плотность и могут применяться только в тех случаях, когда конструкция несущей части уже сама по себе обеспечивает изоляцию воздушного шума [6, 7, 8]. Кроме того, при некоторых рулонных покрытиях возможно даже ухудшение изоляции воздушного шума за счет возникновения резонансных колебаний пола. Поэтому конструкции перекрытий с полами по упругим прокладкам являются пока наиболее распространенными конструкциями в массовом строительстве. Однако, повышение их звукоизоляции связано с увеличением массы ограждения и, соответственно, с необходимостью увеличения несущей способности конструкций зданий. Последнее ведет к удорожанию строительства. Требуется разработка новых конструкций, обладающих необходимой звукоизоляцией и имеющих небольшую поверхностную плотность [9, 10].

Одним из возможных путей улучшения технико-экономических показателей традиционных конструкций междуэтажных перекрытий с полами по упругим прокладкам является увеличение в них количества инерционных и упругих слоев, т.е. создание многослойной конструкции [11].

Если разделить (по высоте) упругую прокладку традиционной конструкции перекрытия равномерно распределенным слоем материала с достаточно большим инерционным сопротивлением, не увеличивая поверхностной плотности перекрытия, то получаемая конструкция может быть названа многослойной. Основными элементами такого перекрытия являются три инерционных (чистый пол с его основанием, равномерно-распределенный слой материала и несущая панель) и два упругих слоя.

Реальность конструирования таких междуэтажных перекрытий вполне очевидна, однако на практике они не встречались ввиду неисследованности вопроса.

Расчетная модель многослойного перекрытия представляется в виде трех шарнирно опертых по контуру прямоугольных пластинок размером $a \times b$, разделенных упругими слоями, воспринимающими нормальные усилия. Конструкция приводится в колебания стандартной ударной машиной. Выражение ударной нагрузки для этого случая записывается в виде:

$$g = \frac{I}{ab} [\sigma_0(t) + \sigma_0(t-T) + \sigma_0(t-2T) + \dots], \quad (1)$$

где $I = F_0 \tau$ – импульс ударной силы;

τ – продолжительность ударов; T – период ударов;

$$\sigma_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ T & \text{при } t > 0 \end{cases} \text{ – единичная функция.}$$

Используя методику расчета изоляции ударного шума, изложенную в работе [8], получим формулу снижения уровня ударного шума под многослойным перекрытием в области

низких частот (при $f \leq \frac{c_1}{6h_1}$, и $f \leq \frac{c_2}{6h_2}$):

$$\Delta L_1 = 20 \lg \frac{\bar{w}_2}{\bar{w}_1} \left| - \frac{3\omega_{mn123}^4}{2\bar{w}_2^4} + \frac{\omega_{mn123}^2}{\bar{w}_2^2} m - \frac{n}{2} \right|, \quad (2)$$

где $m = \left(1 + \frac{\beta_1}{\lambda_1} + \frac{\beta_2}{\lambda_2}\right) \alpha^2 + (1 + \lambda_2) + \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \frac{\bar{w}_1^2}{\bar{w}_2^2}$;

$$n = \left(\frac{\beta_1}{\lambda_1} + \frac{\beta_2}{\lambda_2} + \frac{\beta_1\beta_2}{\lambda_2}\right) \alpha^4 + \left[\left(1 + \beta_2 + \frac{1 + \lambda_2}{\lambda_1} \beta_1\right) + \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \beta_1 + \beta_2}{\lambda_2}\right) \frac{\bar{w}_1^2}{\bar{w}_2^2} + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \frac{\bar{w}_1^2}{\bar{w}_2^2} \right];$$

$$\alpha = \frac{P_{3mn}}{w_2}; \bar{w}_1 = \sqrt{\frac{\rho_1 \bar{c}_1^2}{m_1 h_1}}; \bar{w}_2 = \sqrt{\frac{\rho_2 \bar{c}_2^2}{m_2 h_2}}; \beta_1 = \frac{D_1}{D_3}; \beta_2 = \frac{D_2}{D_3};$$

Здесь ω_{mn123} – частота собственных колебаний многослойного перекрытия; D_1, D_2, D_3 – цилиндрические жесткости плит многослойного перекрытия; P_{3mn} – частота собственных колебаний несущей плиты; ρ_1, ρ_2 и h_1, h_2 – поверхностная плотность и толщина упругих слоев; \bar{c}_1, \bar{c}_2 – скорости продольных волн в упругих слоях; f – текущая частота.

Для упрощения вычислений по формуле (2) можно принять следующие допущения.

1. Цилиндрические жесткости плиты пола D_1 и равномерно распределенного слоя D_2 малы по сравнению с жесткостью несущей плиты D_3 , и ими можно пренебречь. Такое допу-

щение относится к таким многослойным конструкциям перекрытий, у которых плита пола выполнена из мелкогабаритных элементов, а равномерно распределенный слой – из сыпучих материалов или из мелкогабаритных элементов.

2. Все частоты колебаний системы являются собственными колебаниями несущей плиты (плиты неограниченной протяженности), т.е.

$$P_{3mn}/2\pi = f \text{ и } \alpha = f/f_2 \left(f_2 = \bar{w}_2/2\pi \right)$$

Тогда, при $f > 1,4f_2 \sqrt{1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2} - \frac{f_1}{f_2}}$ выражение (2) может быть записано в более простом виде

$$\Delta L_1^* = 20 \lg \left| -\frac{f^4}{f_1^2 f_2^2} + \frac{f^2}{f_1^2} \left(1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2} \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) - 1 \right| \quad (3)$$

где $f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$, $f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}$.

Из выражений (2) и (3) видно, что в области низких частот многослойные перекрытия обладают высокими звукоизоляционными качествами и приводят к снижению уровня ударного шума (относительно однослойного перекрытия) примерно на 24 дБ при каждом удвоении частоты. Наименьшей величины ΔL_1 достигает в полосах частот, соответствующих второй частоте собственных колебаний пола.

Вычисленные по формуле (2) частотные характеристики ΔL_1 , многослойных конструкций с различными значениями β_1 и β_2 показали, что жесткость при изгибе плиты пола и равномерно распределенного слоя материала должна быть значительно меньше жесткости несущей плиты. Уже при $\beta_1 > 0,3$ и $\beta_2 > 0,5$ отрицательное действие жесткости этих элементов начинает сказываться на изоляционные качества перекрытий.

В области средних и высоких частот (при $f > \frac{c_1}{6h_1}$ и $f > \frac{c_2}{6h_2}$) величина снижения уровня ударного шума под перекрытием определится выражением:

$$\Delta L_2 = 20 \lg \frac{f^2}{f_1 f_2} + 10 \lg \frac{m_1 m_2}{\rho_1 h_1 \rho_2 h_2} \quad (4)$$

В этой области частот рост дополнительной изоляции ударного шума под многослойным перекрытием замедляется и составляет 12 дБ на октаву.

При одинаковой поверхностной плотности многослойные перекрытия лучше изолируют ударный шум, чем перекрытия с полами по упругим прокладкам. Это улучшение в области низких частот составляет примерно 12 дБ на октаву, а в области средних и высоких частот – 6 дБ на октаву.

Проведена экспериментальная проверка полученных выводов. Были исследованы три многослойных перекрытия. Для одного из них в качестве равномерно распределенного слоя использовалась бетонная плита толщиной 32 мм и поверхностной плотностью 60 кг/м²; для двух других – песчаные слои толщиной 35 мм (50 кг/м²). В качестве упругих прокладок при-

менялись древесноволокнистые плиты толщиной 12,5 мм (3 кг/м^2), а также минераловатные и стекловолоконные плиты толщиной 30 мм ($3,3 \text{ кг/м}^2$ и $4,2 \text{ кг/м}^2$).

Сравнение расчетных и измеренных частотных характеристик снижения уровня ударного шума показало хорошее соответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Несмотря на различие спектров ударного шума для многослойных перекрытий и перекрытий с полами по упругим прокладкам сравнительная оценка их звукоизоляции может производиться как при использовании стандартной ударной машины, так и при бытовых ударных воздействиях. Установлено количественное соотношение для данных источников ударов.

При одинаковой поверхностной плотности многослойные конструкции перекрытий также лучше изолируют воздушный шум, чем перекрытия с полами по упругим прокладкам.

Увеличение поверхностной плотности равномерно распределенного слоя материала способствует повышению звукоизолирующих качеств многослойных конструкций междуэтажных перекрытий. Величина изгибной жесткости этого слоя практически не влияет на изменение изоляции воздушного шума данных перекрытий.

С учетом необходимости одновременного обеспечения изоляции воздушного и ударного шумов рекомендуется применять в качестве равномерно распределенного слоя любые строительные материалы с поверхностной плотностью не менее 30 кг/м^2 , а в качестве упругих прокладок – стекловолоконные и минераловатные материалы, уложенные сплошным слоем по площади перекрытия. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы жесткость инерционных элементов пола (плиты пола и равномерно распределенного слоя материала) составляла не более $1/20$ – $1/30$ жесткости несущей плиты перекрытия при изгибе, а поверхностная плотность была бы по возможности большей.

Технико-экономический анализ показал, что многослойные конструкции перекрытий позволяют уменьшить поверхностную плотность примерно на 50 кг/м^2 , а стоимость строительных материалов на 4-8% по сравнению с традиционными конструкциями, при обеспечении нормативных значений звукоизоляции. При использовании в качестве упругих слоев прокладок из супертонкого стекловолокна значительно увеличивается их долговечность и дополнительно уменьшается толщина междуэтажных перекрытий на 30-40 мм.

Уменьшение стоимости строительства зданий произойдет также за счет снижения массы несущих конструкций, что особенно важно для зданий повышенной этажности.

Таким образом, многослойные конструкции междуэтажных перекрытий обладают лучшими показателями чем традиционные перекрытия с полами по упругим прокладкам и их возможно рекомендовать для апробации во всех видах гражданских зданий при новом строительстве и капитальном ремонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старцева О.В., Овсянников С.Н. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. №2 (39). С. 176-184.
2. Бобылев В.Н. Тишков В.А., Монич Д.В. Разработка эффективности звукоизолирующих конструкций с учетом требований ресурсосбережения. В сборнике: Защита населения от повышенного шумового воздействия. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. Н.И. Иванова, К.Б. Фридмана. 2015. С. 276-282
3. Клименко В.В. Экспериментальные исследования изоляции ударного шума междуэтажными перекрытиями. Academia. Архитектура и строительство. 2009. №5. С. 229-230.
4. Кочкин А.А. О влиянии вибропоглощающей прослойки на звукоизоляцию слоистых ограждений. В сборнике: Защита населения от повышенного шумового воздействия. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Н.И. Иванова, К.Б. Фридмана. 2015. С. 265-269.
5. Герасимов А.И. Коваленко К.Н. Оценка изоляции воздушного шума междуэтажными перекрытиями с различными полами в гражданских зданиях. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С 70-72.

6. Горин В.А., Клименко В.В. К оценке изоляции ударного шума междуэтажными перекрытиями с полами из древесных материалов. Вестник МГСУ. 2011. №3-1. С. 66-72.
7. Горин В.А., Клименко В.В. Снижение уровня ударного шума паркетными полами. Жилищное строительство. 2013. №6. С. 22-24.
8. Кочкин А.А., Борисов А.А. Исследование звукового давления в воздушном промежутке двойной ограждающей конструкции из слоистых вибродемпфированных элементов. Жилищное строительство. 2015, №7. С. 52-54.
9. Горин В.А., Клименко В.В., Филиппенко А.А. Звукоизоляция слоистых междуэтажных перекрытий гражданских 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. 41-45.
10. Кочкин А.А., Шубин И.Л., Кочкин Н.А. О прохождении и излучении звука в слоистых вибродемпфированных элементах. Журнал строительство и реконструкция. 2016 №3 (65). С. 119-125.
11. Сенан А.М. К оценке звукоизоляции междуэтажных перекрытий. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2006. №5. С. 150-152.

Горин Виктор Александрович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар
Кандидат технических наук, профессор кафедры АГиПЗиС
тел.: +7(861)(255-20-88)
E-mail: 2486550@mail.ru

Клименко Виталий Владимирович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар
Кандидат технических наук, доцент кафедры АГиПЗиС
тел.: +7(861)(255-20-88)
E-mail: 4552439@mail.ru

Пороженко Марианна Александровна

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва.
Главный научный сотрудник.
тел.: +7(495)(482-57-38)
E-mail: mporoz@mail.ru

GORIN V.A., KLIMENKO V.B., POROZHENKO M.A.

**RESEARCH OF SOUND INSULATION OF MULTILAYERED
INTERFLOOR OVERLAPPINGS**

Sound insulation of the multilayered interfloor overlappings is considered. It possesses the best technical and economic indicators than traditional overlappings with floors on elastic laying. Theoretical researches of isolation of shock noise are executed. It is established that in the low frequency region multilayer overlappings have high sound insulation properties and lead to a decrease in the level of shock noise by about 24 dB at each frequency doubling. The lowest value of shock noise isolation is achieved in the frequency bands corresponding to the second frequency of the floor eigenfrequencies. In the mid-to high-frequency region, the increase in additional shock noise isolation under multi-layer overlap slows down to 12 dB per octave. The experimental inspection of the received conclusions is carried out. The comparison of calculated and measured frequency characteristics of the impact noise reduction showed a good agreement between the results of theoretical and experimental studies. It is shown that at the same surface density multilayer structures of overlappings better isolate shock and air noise than traditional structures of floors with elastic pads.

Keywords: sound insulation, multilayered interfloor overlappings, technical and economic indicators

REFERENCES

1. Startseva O.V., Ovsyannikov S.N. Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya zvukoizolyatsii peregorodok. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2013. №2 (39). S. 176-184.
2. Bobylev V.N. Tishkov V.A., Monich D.V. Razrabotka effektivnosti zvukoizoliruyushchikh konstruktivnykh uchastkov s uchetom trebovaniy resursobezpecheniya. V sbornike: Zashchita naseleniya ot povyshennogo shumovogo vozdeystviya. Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Pod. red. N.I. Ivanova, K.B. Fridmana. 2015. S. 276-282
3. Klimenko V.V. Eksperimental'nyye issledovaniya izolyatsii udarnogo shuma mezhduetazhnymi perekrytiyami. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2009. №5. S. 229-230.
4. Kochkin A.A. O vliyaniy vibropogloshchayushchey prosloyki na zvukoizolyatsiyu sloistykh ograzhdeniy. V sbornike: Zashchita naseleniya ot poveshennogo shumovogo vozdeystviya. Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Pod. redaktsiyey N.I. Ivanova, K.B. Fridmana. 2015. S. 265-269.
5. Gerasimov A.I. Kovalenko K.N. Otsenka izolyatsii vozdušnogo shuma mezhduetazhnymi perekrytiyami s razlichnymi polami v grazhdanskikh zdaniyakh. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2014. № 11. S 70-72.
6. Gorin V.A., Klimenko V.V. K otsenke izolyatsii udarnogo shuma mezhdueatzhnymi perekrytiyami s polami iz drevesnykh materialov. Vestnik MGSU. 2011. №3-1. S. 66-72.
7. Gorin V.A., Klimenko V.V. Snizheniye urovnya udarnogo shuma parketnymi polami. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2013. №6. S. 22-24.
8. Kochkin A.A., Borisov A.A. Issledovaniye zvukovogo davleniya v vozdušnom promezhutke dvoynoy ograzhdayushchey konstruktivnykh iz sloistykh vibrodempirovannykh elementov. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2015, №7. S. 52-54.
9. Gorin V.A., Klimenko V.V., Filippenko A.A. Zvukoizolyatsiya sloistykh mezhduetazhnykh perekrytiy grazhdanskikh zdaniy. V sbornike: Ustoychivoye razvitiye regiona: arkhitektura, stroitel'stvo, transport. Materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii instituta arkhitektury, stroitel'stva i transporta Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. S. 41-45.
10. Kochkin A.A., Shubin I.L., Kochkin N.A. O prokhozhenii i izluchenii zvuka v sloistykh vibrodempirovannykh elementakh. Zhurnal stroitel'stva i rekonstruktsiya. 2016 №3 (65). S. 119-125.
11. Senan A.M. K otsenke zvukoizolyatsii mezhduetazhnykh perekrytiy. Ekologicheskyy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva. 2006. №5. S 150-152

Gorin Viktor Aleksandrovich

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation.

Professor of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings and Structures

E-mail: 2486550@mail.ru

Klimenko Vitaly Vladimirovich

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Architecture Department of Civil and Industrial Buildings and Structures

Email: 4552439@mail.ru

Porozhenko Marianna Aleksandrovna

Research Institute of Structural Physics of the Russian Academy of Architecture and Structural Sciences, Moscow, Russian Federation

Senior fellow.

E-mail: mporoz@mail.ru

УДК 726.5.05:697.112.2

АЛЕКСЕЕНКО В.Н., МИХЕЕВА Ю.Л.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ КЛИМАТИЗАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА РЕСТАВРИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В КРЫМУ

В данной статье рассматриваются различные варианты систем климатизации, включающих в себя отопление и вентиляцию в действующих православных храмах Крыма. На основе проведенных исследований на этих объектах, которые включали в себя натурное обследование и численные замеры, было установлено, что обеспечение нормативного температурно-влажностного режима не выполняется и сталкивается с рядом трудностей, требующих корректного вмешательства. Для этого решения необходимо определить основные источники нарушения температурно-влажностного баланса в объеме храма и оценить эффективность работы систем климатизации по созданию оптимального микроклимата внутри здания.

***Ключевые слова:** системы отопления и вентиляции православных храмов, микроклимат православных храмов, температурно-влажностный режим.*

Большинство православных храмов в Крыму было построено в XVII- XIX веках архитекторами Москвы и Петербурга в так называемом «русско-византийском» стиле, в котором были соединены многие черты византийского и древнерусского церковного зодчества [1-3]. Говоря о русской храмостроительной практике можно выделить основные черты в конструктивно-планировочной композиции крестово-купольных храмов:

- осевая, симметричная и статичная структура;
- строгая ориентация по оси восток-запад;
- двух- или трехчастная структура в плане: алтарь-храм-(притвор);
- кубическая форма средней части храма с купольным покрытием на барабане;
- контрастные переходы по высоте в объеме храма;
- тектоническая система опирания барабана посредством вставок-«парусов» на колонны;
- световая организация пространства храма с преобладанием освещения сверху;
- приподнятость здания храма над поверхностью земли и приподнятость алтарной части над поверхностью собственно храма.

Разработка проектов реставрации объектов культурного наследия в части обеспечения тепловлажностных режимов эксплуатации помещений представляет сложную многофакторную системную задачу. Необходимо выполнение индивидуальных исследований параметров культовых зданий, эксплуатирующихся в различные периоды времени года, а также с учетом влияния массового пребывания людей в периоды церковных служб. Вмешательство в системы отопления и вентиляции культовых сооружений без подобных исследований, как правило, является не только малоэффективным, но и вредным с точки зрения сохранения настенных росписей и убранства. В настоящее время отсутствует регламентация работ корректно обосновывающих выполнение замен традиционных (как правило, не работающих или утраченных) систем отопления современными климат-машинами. Задачами исследования проведенного авторами, является установление взаимосвязей объемно-планировочных характеристик, режимов эксплуатации культовых сооружения Крыма с климатическими параметрами региона и

тепловлажностными характеристиками. Эти зависимости (индивидуальные для каждого памятника архитектуры) должны являться основанием выбора компенсирующих мероприятий, обеспечивающих сохранность объектов культурного наследия Республики Крым. Актуальность и новизна исследований заключается в отсутствии не только подобных индивидуальных зависимостей, но и нормативного пространственно-временного регламента измерений параметров тепловлажностного режима предваряющих проекты реставрации.

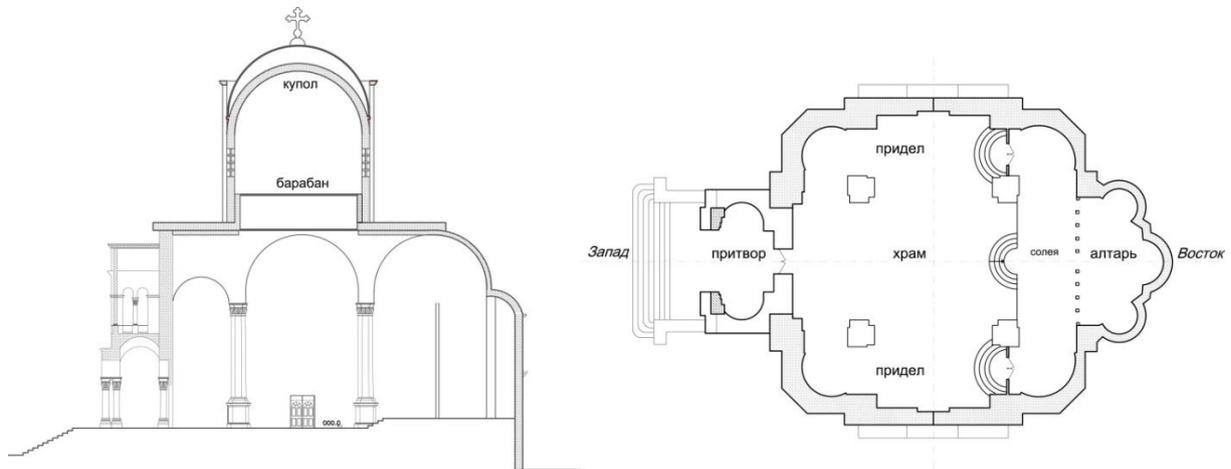


Рисунок 1 - Схема разреза и плана Владимирского Собора в г. Севастополе

История создания и эксплуатации культовых сооружений, в частности церквей, храмов и часовен свидетельствует о том, что их микроклимат обеспечивался в основном комплексом объемно-планировочных, архитектурных и строительных решений [4, 7, 8-13].

В России большинство каменных культовых построек (соборов и церквей), возведенных до XVIII века были не отапливаемы. Прежде всего, храмы условно делились на зимние (деревянные, легко протапливаемые) и летние (каменные с большой тепловой инерционностью). В деревнях и селах строились в основном церкви небольшие, рассчитанные на 50-200 человек, которые в зимнее время обогревались за счет присутствия прихожан и горевших свечей. В городах же строились храмы большие, из расчета 200-400 человек, оборудованные печными и паровыми системами отопления, которые еще выполняли и роль вентиляции.

Сохраняя основные принципы объемно-планировочного решения, некоторые архитектурные элементы видоизменялись, что отчасти было обусловлено природно-климатическими условиями местности и явились приемами по улучшению режимов эксплуатации и сохранению древних зданий. В частности боковые приделы и притвор выполняли функцию тамбуров с импровизированным тепловым барьером и служили защитой для основного объема от внешнего воздействия окружающей среды, а центральный подкупольный барабан, в остеклении проемов которого размещались аэрационные фрамуги, служил своеобразной вытяжной шахтой, играя главную роль в вентиляции всего здания.

В некоторых случаях соборы, имеющие теплые пристройки, функционировали и в зимнее время, используя теплый воздух, поступающий через дверные проемы отапливаемых помещений. Особую роль в режиме содержания здания и обеспечения микроклимата сыграло устройство подклета, который впоследствии трансформировался в низкий зимний храм, отопление которого в холодный период создает тепловлажностные условия, способствующие созданию комфортных условий пребывания людей в верхней части храма и его интерьере.

Так же можно предположить, что к планировочным приемам по улучшению температурно-влажностного режима, обусловленных климатическими условиями, явились такие изменения как: замена шлемовидной формы куполов на луковичную, позволяющая аккумулировать большой объем воздушной среды в пространстве, между каменным сводом и «луковичным» покрытием, а также возможность устройства дополнительных теплоизолирующих слоев из природных материалов); устройство «глухих» барабанов, не сообщающихся с основным

объемом храма; внутренние пониженные своды, обеспечивающие сохранение тепла зимой в нижних зонах зданий [7].

Современные строительные принципы в большей степени направлены на обеспечения комфортных условий для прихожан и церковных служащих, нежели на создание оптимальных условий для сохранности декора и убранства внутреннего интерьера. Поэтому при реконструкции и новом проектировании культовых сооружений необходимо предусматривать такие системы инженерного оборудования, которые обеспечат необходимые комфортные условия не только для людей, но и обеспечат сохранность конструкций и декоративных элементов, представляющих художественную ценность [3].

При реставрации храмов задача осложняется требованиями максимальной сохранности здания и его аутентичности. Храмы круглогодичного действия должны быть оборудованы системами отопления и вентиляции.

Разработку систем климатизации следует проводить после тщательного обследования ограждающих и несущих конструкций, изучения температурно-влажностного режима и процесса воздухообмена в зависимости от объемно-планировочных решений, наружных климатических условий и особенностей эксплуатации; по возможности максимально использовать существующие отопительно-вентиляционные системы. Наряду с этим необходимо учитывать неординарную структуру внутреннего пространства, нерегулярность использования храма и неблагоприятные выделения тепла, влаги и углекислого газа от людей, окиси углерода и тепла от горящих свечей, лампад и осветительных приборов, носящих периодический характер и определения наиболее экономически выгодного варианта в процессе эксплуатации.

Храмы круглогодичного действия должны быть оборудованы системой естественной вентиляции, а при соответствующем обосновании – механической. Для отопления можно применять системы водяного, воздушного, электрического, печного отопления, а так же другие системы, удовлетворяющие требованиям нормативных документов обеспечивающих сохранность памятников истории и культуры.

В таблице 1 приводятся оптимальные параметры внутреннего воздуха в соборе, рекомендованные сводом правил разработанного АХЦ «Арххрам» и исследований, проведенных коллективом сотрудников Лаборатории музейной климатологии ГосНИИ реставрации [1, 2]:

Таблица 1 - Допустимые диапазоны изменений температуры и влажности внутреннего воздуха

Период года	Температура, °С	Влажность, %	Подвижность воздуха, м/с
Декабрь-февраль	12-18	40-55	0,2
Март-май	16-20		
Июль-август	20-25		
Сентябрь-ноябрь	16-20		

В современной практике чаще всего используются *системы водяного отопления* с теплоносителем от центральной теплотрассы или от местной котельной на различных видах топлива, которые размещаются в отдельном помещении. Отопительными приборами могут быть радиаторы, регистры, отопительные шкафы, напольные низкотемпературные панели и конвекторы, установка которых рекомендуется у наружных стен, под световыми проемами на уровне пола в нишах; трубная система разводки и стояков устраивается в подпольных каналах со съемными плитами, полу или штробах стен.

Так, например, в Петропавловском соборе в подвале храма были расположены печи, по каналам в стенах в помещении храма попадал теплый воздух. Во время эксплуатации в качестве сахарного склада печь и подвал законсервировали. В период ведения реставрационных работ к храму была пристроена котельная. В настоящее время собор отапливается системой

водяного отопления, основная задача которой направлена, в первую очередь, на создание комфортной для прихожан температуры. Разводка труб произведена ниже уровня пола вдоль наружных стен и закрыта ажурными литыми решетками. Вентиляция происходит естественным путем за счет открытых дверей и фрагм в остеклении проемов барабана (рисунок 2).



Рисунок 2 - Собор Петра и Павла в г. Симферополе (1866 г.)

Таблица 2 - Среднемесячные показатели параметров воздушной среды

Среднемесячные показатели воздуха	месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
температура внутреннего воздуха	18,6	20,5	18,9	20,5	21,7	25	27,2	28,2	24,1	21,5	19,5	15,5
влажность внутреннего воздуха	42	44,7	48,4	50,5	54,2	58,1	51,2	52	46,3	58,9	50,3	42,5
максимальная температура воздуха в барабане	21,2	24,8	23,5	24,9	25,1	29	30,7	31,2	28	23,2	21,8	21,1
минимальная температура воздуха в барабане	11,9	14,8	15,2	16,5	19,5	21	24,3	25,2	23,1	17	16,2	14,7

Проведя мониторинг за температурно-влажностным состоянием объекта (таблица 2) и принимая во внимание допустимые диапазоны изменений температуры и влажности внутреннего воздуха (таблица 1), рекомендованные строительными нормами можно сделать заключение:

1. Температура воздуха в соборе несколько завышена, особенно в теплый период. В объеме барабана наблюдается критическое завышение показателей на протяжении всего года, особенно в теплый период в виду большой площади остекления (рисунок 3).

2. Влажностный режим соответствует нормативам в теплый период и в холодный, когда включается система отопления. Регистрируемые всплески повышенной влажности являются следствием дождливого периода (рисунок 4).

Как вывод – отсутствие продуманной системы вентиляции, неэффективность методов проветривания и отсутствие солнцезащитных мероприятий на окнах барабана [14, 15].

Одним из факторов, отрицательно влияющих на сохранение росписей и убранства является замена оконных проемов барабана стеклопластиковыми окнами без создания возможности их открывания и создания циркуляции воздушных масс. Первоначально устроенные цепные передачи и бронзовые механизмы открывания верхних оконных проемов, расположенные в каналах кладки стен, в подавляющем большинстве храмовых зданий Крыма утрачены. Утрата этих механизмов обусловлена эксплуатацией подобных сооружений в прошлом столетии в качестве складов и других подсобных помещений. Восстановление каналов в сте-

нах этих зданий без существенного снижения их сейсмобезопасности или кардинальных изменений фасадов технически не возможно. При этом следует подчеркнуть не только необходимость обеспечения приемлемого уровня сейсмостойкости здания с массовым пребыванием людей, но и сохранение аутентичности объекта культурного наследия. Проведенные исследования тепловлажностного режима ряда объектов с замененными окнами выявили практически отсутствующее движение воздушных масс в верхней зоне барабанов.

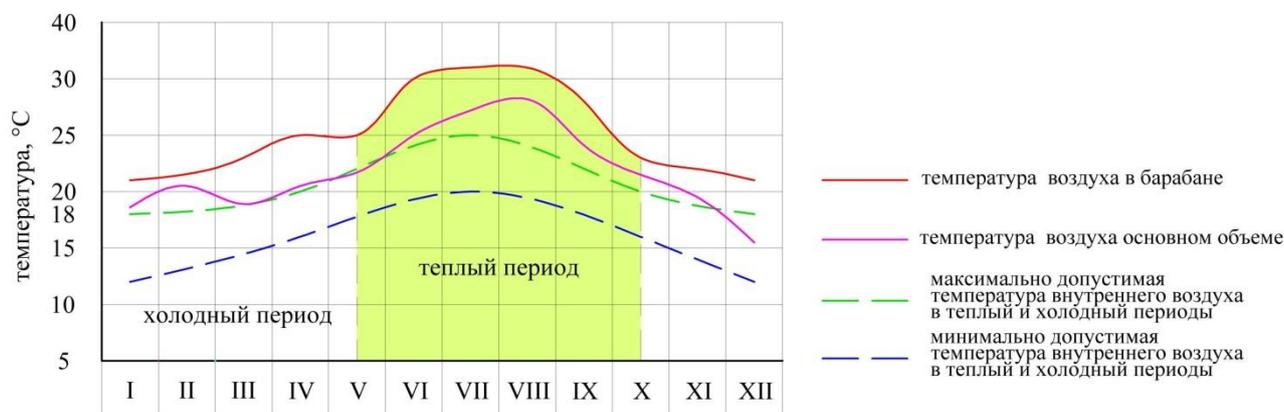


Рисунок 3 - График годового хода температуры внутреннего воздуха в объеме храма и барабана

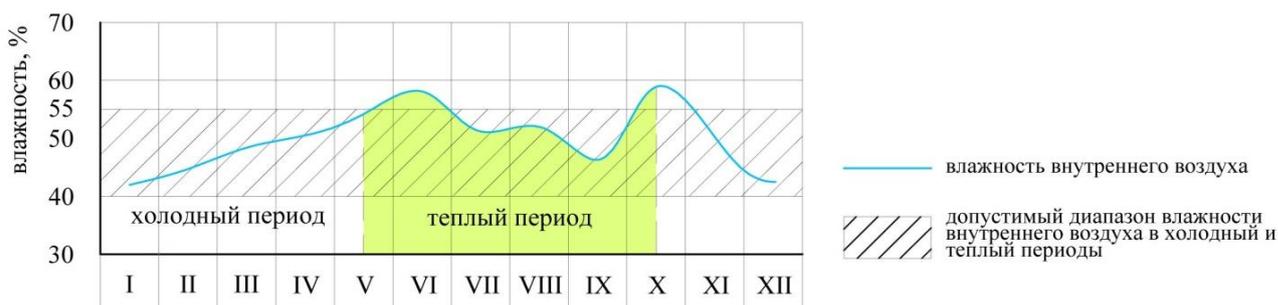


Рисунок 4 - График годового хода влажности внутреннего воздуха

Церковь всех Святых в г. Симферополе (рисунок 5) была оборудована дровяными печами, стоящими непосредственно в помещении храма. Нагреваясь, высокая печь, украшенная изразцами, отдавала тепло в помещение, дым выводился через дымоходную трубу, а в наружных стенах были устроены отдушины. Уже в 80-х годах XX века при реставрации церкви печи разобрали, так как они занимали много места, и требовали постоянного ухода, а вентиляционные каналы замуровали. Построив отдельно помещение котельной, в храм провели водяное отопление, расставив радиаторы под окнами храма. В перекрытии здания расположили вытяжные каналы.

По данным наблюдения состояние микроклимата находится в критическом состоянии и как следствие пересушка декоративно-отделочного слоя, шелушение росписи, выпадение конденсата на стенах притвора и северно-восточной стене храма.

Как пример можно привести ситуацию, сложившуюся в Свято-Илиинском храме (рисунок 6): для обеспечения комфортной температуры для прихожан и служащих в зимний период в храме провели разводку системы водяного отопления с нарушением строительных норм и эстетических законов, изуродовав тем самым внутренний облик этого здания.



Рисунок 5 - Всехвятская церковь г. Симферополь (1864 г.)

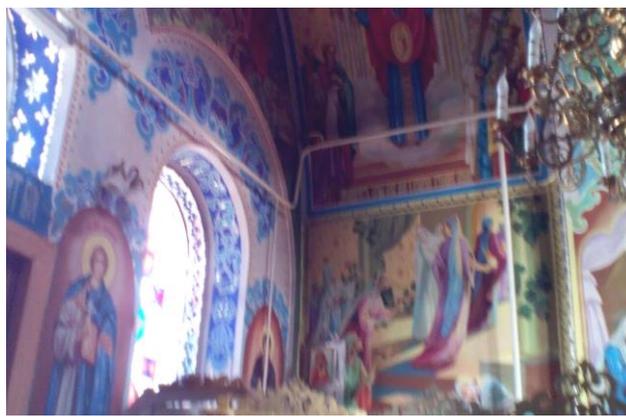


Рисунок 6 - Свято-Илиинский храм в г. Евпатории (1861 г.)

В определенных случаях в основе отопительной системы может быть применено *электроотопление*. В качестве отопительных приборов используются электронагреватели радиаторного типа, устанавливаемые в нижней зоне под оконными проемами на наружных стенах. Она имеет ряд преимуществ: отсутствие каналов и труб, простота регулировки требуемой температуры. Данная система была предложена в первоначальном варианте в храме Св. Луки в пгт. Новый Свет до тех пор, пока действовал льготный тариф на электроэнергию. Но впоследствии, в связи с повышением тарифов, отмены льгот и дороговизной оплаты перешли на газовое отопление, оставив электроотопление аварийным и резервным.

Широкое распространение получили *системы на основе подачи в помещение нагретого воздуха*. Воздушные системы отопления, совмещенные с вентиляцией, более доступны и практичны и позволяют обеспечить равномерную температуру во всем объеме здания. Габариты установочного оборудования минимальны, число диффузоров и воздухозаборных плафонов небольшое, размер первоначальных капиталовложений незначителен. В большинстве случаев работа этой системы обеспечивается посредством генераторов горячего воздуха с одним большим диффузором и одним воздухозаборным устройством для рециркуляции. Это позволяет обойтись без трудоемкой прокладки дополнительных воздушных каналов в зданиях, представляющих историческую и художественную ценность. В реставрируемых и реконструируемых храмах эта система позволяет максимально использовать существующие каналы, которые раньше предназначались для отопления [9, 11, 12,16].

Во Владимирском соборе (рисунок 7) в нижнем храме были предусмотрены печи с огромными чугунными колосниками, которые, нагреваясь, отдавали тепло в вентиляционные каналы, поднимающиеся в стенах в верхний храм. Выходы для теплого воздуха были устроены на высоте 0,5 и 1,5 м над уровнем пола. Холодный воздух у пола через дверные проемы уходил в нижний храм. Таким образом происходил обмен холодного и теплого воздуха в зависимости от времени года. Во время реставрации все каналы в стенах восстановили. Принцип отопления и вентиляции сохранили, заменив угольные печи и чугунные жаровни на конвекторы. В связи с высокой стоимостью электроэнергии отопление большого объема храма таким способом стало невозможным и на зиму верхний храм закрывают, используя для служб и проведения обрядов нижний храм.

Анализируя проведенные замеры температуры и влажности наружного и внутреннего воздуха, представленные в виде графиков на рисунках 8 и 9, можно смело утверждать, что закрытие верхнего храма на холодный период влечет за собой существенное повышение влажности и снижение температуры внутреннего воздуха, зависящей от влажности и температуры наружного воздуха. Данная ситуация негативно сказывается на внутренней отделке и декора верхнего храма. В нижнем храме наблю-

дается повышение влажности выше нормы в дождливые периоды, и повышение температуры август, сентябрь, октябрь за счет прогрева земли и слабой вентиляции.

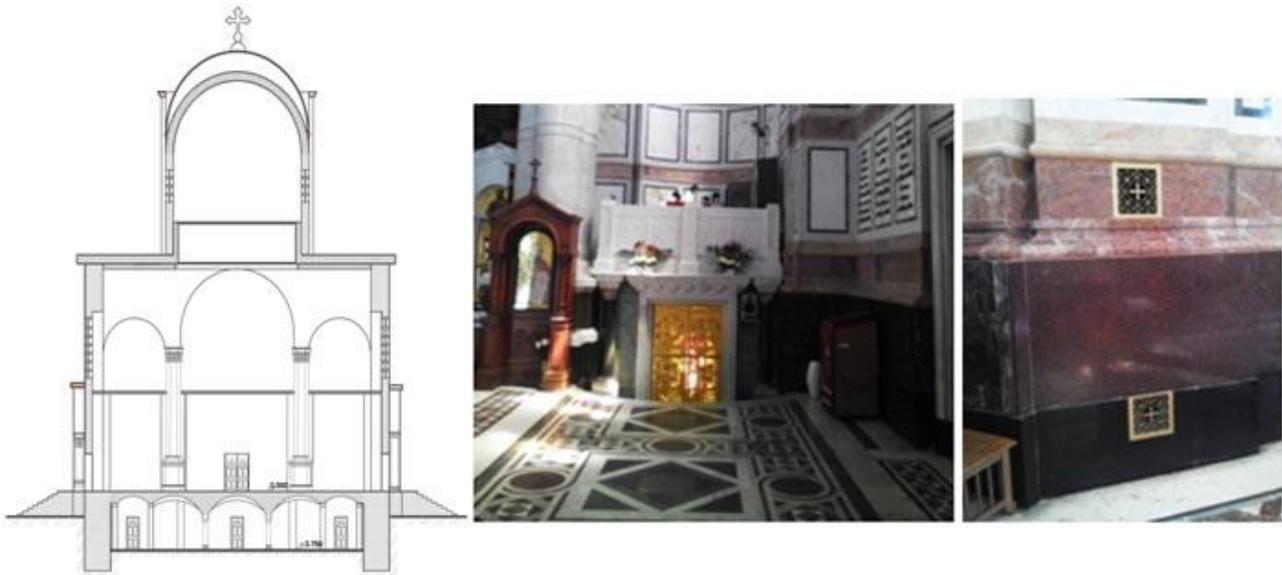


Рисунок 7 - Владимирский собор в г. Севастополе (1861 г.)

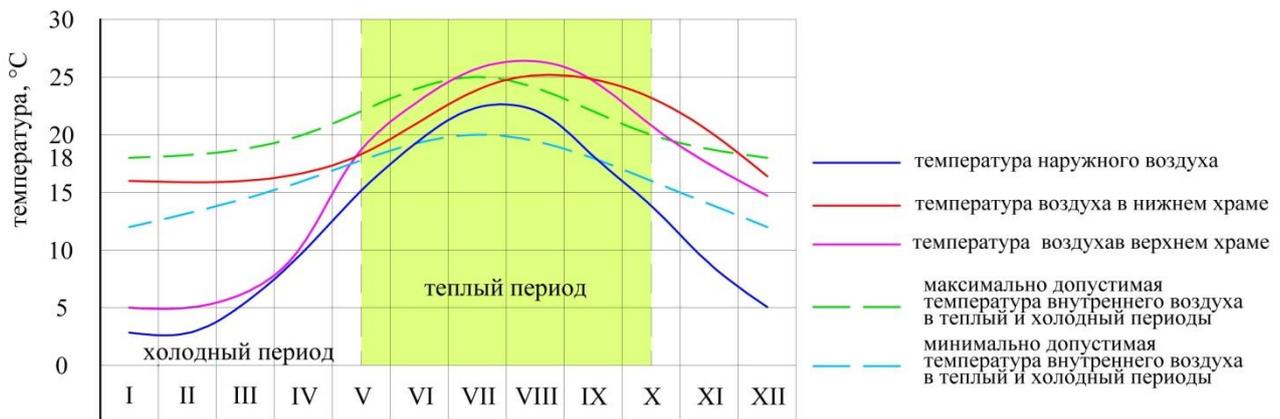


Рисунок 8 - График годового хода температуры наружного и внутреннего воздуха

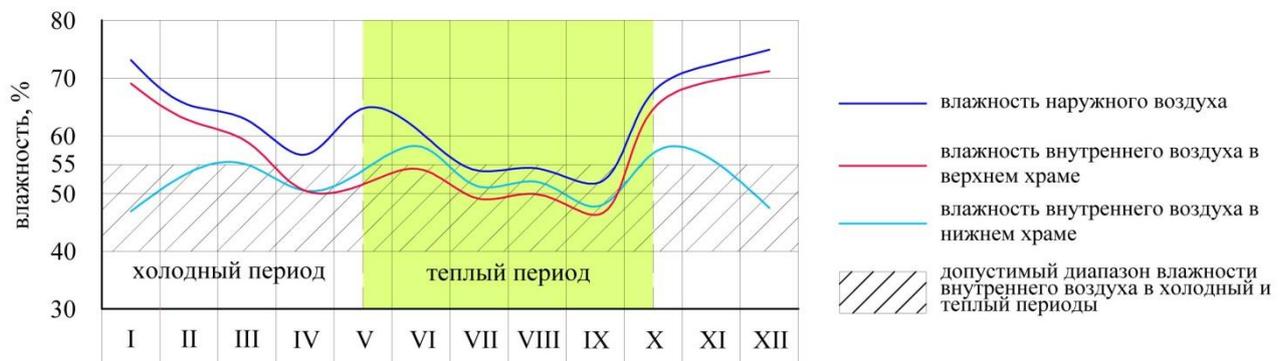


Рисунок 9 - График годового хода влажности наружного и внутреннего воздуха

В настоящее время перспективными являются отопительные системы на основе излучающих полов. Большая тепловая инерция конструкции теплых полов мало подходит для эффективного отопления в переменном режиме (зависимость от расписания богослужений), но

идеальна, если храм открыт постоянно в течение дня, так как этот вариант обеспечивает комфортные условия в любое время. Перегрев в нижней зоне в отопительный период ведет к резкому падению относительной влажности, при этом пыль, которая поднимается с поверхности пола вместе с восходящими потоками воздуха, вызывает удушье и астматический кашель [4, 5].

В Крыму практика устройства теплых полов в храмах еще не получила широкого применения в виду их трудозатрат, но в России и за рубежом в новом строительстве активно применяется (Знаменский собор г. Великий Новгород, Софийский собор г. Вологда, Церковь Вознесения г. Ростов Великий и другие).

Выводы:

1. Создание требуемых параметров температурно-влажностного режима в зданиях культовой архитектуры – сложная многофакторная задача, требующая индивидуального подхода и учета специфики эксплуатации, разнообразия архитектурных и конструктивных решений.

2. При реконструкции храмов следует выбирать оптимальный вариант инженерного оборудования, соблюдая требования максимальной сохранности здания, используя по возможности все имеющиеся каналы, продухи, дымоходы.

3. Проведенные натурные обследования и мониторинг за состоянием температурно-влажностного состояния внутреннего воздуха на ряде отреставрированных объектов признали не справляющиеся системы климатизации с созданием тепловлажностных условий, необходимых для сохранения памятников.

4. Установлены взаимосвязи объемно-планировочных характеристик, режимов эксплуатации ряда культовых сооружений Республики Крым с климатическими и тепловлажностными характеристиками. Эти зависимости индивидуальны для каждого памятника архитектуры и должны являться основанием выбора компенсирующих мероприятий, обеспечивающих сохранность объектов культурного наследия.

5. Необходимо установление нормативного пространственно-временного регламента измерений параметров тепловлажностного режима предваряющих проекты реставрации культовых сооружений.

6. Результаты проведенных исследований выявили весьма ограниченную применимость действующих стандартов к объектам культурного наследия. В связи с этим назрела необходимость корректировки ряда действующих норм с выделением разделов касающихся непосредственно реставрации объектов культурного наследия, позволяющих проектировщику легитимно отходить от требований, разработанных для современных новых зданий и опираться на собственные расчетно-аналитические оценки, учитывающие долговременную безаварийную эксплуатацию таких зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МДС 31-9.2003/АХЦ «Арххрам» Православные храмы и комплексы. Том 2. – М.: ГУП ЦПП, 2003. 361 с.
2. Микроклимат церковных зданий (основы нормализации температурно-влажностного режима памятников культовой архитектуры). ГосНИИР. М., 2000. 120 с.
3. АВОК Стандарт-2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха. – М.: АВОК-ПРЕСС. 2004. 14 с.
4. Bearzi V. Системы отопления и вентиляции храмовых зданий // АВОК. 2003. № 8. С. 56-68.
5. Кронфельд Я. Г. Принципы устройства систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, тепло- и холодоснабжения в зданиях культовой архитектуры // АВОК. 2000. № 1. С. 7-22.
6. Михеева Ю.Л. Гидрозащита памятников истории и культуры на примере Петропавловского собора в г. Симферополе /Сергеева О.И., Алексеенко В.Н.// Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2014. — Вып. 50. — С. 130-135.

7. Сизов Б.Т. Теплофизические аспекты сохранения памятников архитектуры // АВОК. 2017. № 2. С. 48-56.
8. Алексеенко В. Н. Особенности научно-реставрационных исследований памятников архитектуры Крыма // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. – Симферополь.: НАПКС, 2011. - Вып. 35. - С. 220-227.
9. Алексеенко В.Н. Оценка технического состояния и задачи реставрации собора Святого равноапостольного князя Владимира в г. Севастополе / Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения. – Ровно. – 2011. – вып. 22. – С. 767–774
10. Алексеенко В.Н. Сохранение памятников архитектуры в сейсмоопасных районах / Устойчивая архитектура: настоящее и будущее. – Москва. – 2012. – С. 620 – 628.
11. Алексеенко В.Н. Оценка технического состояния и задачи реставрации звонницы Балаклавского Георгиевского монастыря / Сб.: Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения. – Ровно. – 2013. – вып. 27. – С. 431–439.
12. Алексеенко В.Н. Анализ результатов обследования памятника архитектуры XIX века – храма святых апостолов Петра и Павла в г. Севастополе / Строительство уникальных зданий и сооружений. – СПб. – 2015. – № 12(27). – С. 90–111.
13. Алексеенко В.Н. Опыт реставрации объектов культурного наследия в сейсмических районах / Строительство уникальных зданий и сооружений. – СПб. – 2015. – № 12(39). – С. 57–75.
14. Михеева Ю.Л. Воздействие климатических факторов на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций православных храмов XVIII-XIX веков / Михеева Ю.Л., Алексеенко В.Н.// Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2017. - № 1 (17). - С.20-29.
15. Михеева Ю.Л. Результаты исследования температурно-влажностного режима Петропавловского собора в городе Симферополе / Михеева Ю.Л., Алексеенко В.Н.// Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 46-51.
16. Улицкий В.М. Сохранение памятников архитектуры и обеспечение их механической безопасности /Улицкий В.М., Шашкин А.Г.// Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 31-39.

Алексеенко Василий Николаевич

Крымский федеральный университет им. Вернадского (ФГАОУ ВО КФУ им. Вернадского), г. Симферополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника и конструктивные элементы зданий»
e-mail: avn108@mail.ru

Михеева Юлия Леонидовна

Крымский федеральный университет им. Вернадского (ФГАОУ ВО КФУ им. Вернадского), г. Симферополь
ассистент кафедры «Геотехника и конструктивные элементы зданий»
e-mail: miheevajl@gmail.com

ALEKSEENKO V.N., MIKHEYEVA Y.L.

INFLUENCE OF VARIOUS CLIMATIC SYSTEMS ON FORMATION OF MICROCLIMATE OF RESTORED OBJECTS OF CULTURAL HERITAGE TO CRIMEA

In this article, various versions of air conditioning systems are considered, including heating and ventilation in the existing Orthodox churches in Crimea. Based on the studies carried out at these sites, which included a field survey and numerical measurements, it was found that the provision of a regulatory temperature and humidity regime is not carried out and faces a number of difficulties that require correct intervention. For this solution, it is necessary to determine the main sources of the violation of the temperature and humidity balance in the volume of the temple and to assess the efficiency of the climate systems in creating an optimal microclimate inside the building.

Key words: *the heating and ventilation systems of Orthodox churches, the microclimate of Orthodox churches, the temperature and humidity regime*

REFERENCES

1. Kesler M.Ju. Pravoslavnye hramy. Tom 2. [Orthodox churches. Vol. 2]. Moscow, 2003, 361 p. (In Russian).
2. Devina R.A. Mikroklimat cerkovnyh zdaniy [Microclimate of church buildings]. Moscow, 2000, 120 p. (In Russian).
3. AVOK Standart-2-2004. Hramy pravoslavnye. Otoplenie, ventiljacija, kondicionirovanie vozduha. Moscow, AVOK-PRESS, 2004, 14 p. (In Russian).
4. Bearzi V. Sistemy otopleniya i ventilyatsii khramovykh zdaniy // AVOK. Ventiljacija, otoplenie, kondicionirovanie, 2003, no. 8, pp. 56-68. (In Russian).
5. Kronfel'd Ya.G. Printsipy ustroystva sistem otopleniya, ventilyatsii, konditsionirovaniya vozdukha, teplo- i kholodosnabzheniya v zdaniyakh kul'tovoy arkhitektury // AVOK. Ventiljacija, otoplenie, kondicionirovanie, 2000, no. 1, pp. 7-22. (In Russian).
6. Mikheyeva Y.L. Gidrozashhita pamjatnikov istorii i kul'tury na primere Petropavlovskogo sobora v g. Simferopole [Hydroprotection of historical and cultural monuments on the example of the Petropavlovsk Cathedral in Simferopol] // Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'. Sb. nauch. trudov. Simferopol, NAPKS, 2014, no. 50, pp. 130-135. (In Russian).
7. B. T. Sizov, Thermophysical Aspects of Preservation of Architecture Landmarks // AVOK. Ventiljacija, otoplenie, kondicionirovanie, 2017, no. 2, pp. 48-56. (In Russian).
8. Alekseenko B.N. Osobennosti nauchno-restavracionnyh issledovanij pamjatnikov arhitektury Kryma // Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'. Sb. nauch. trudov. Simferopol, NAPKS, 2011, no. 35, pp. 220-227. (In Russian).
9. Alekseenko B.N. Ocenka tehničeskogo sostojanija i zadachi restavratsii sobora Svjatogo Ravnoapostol'nogo knjazja Vladimira v g. Sevastopole / Resursojekonomnye materialy, konstrukcii, zdanija i sooruzhenija. Rovno, 2011, no. 22, pp. 767-774. (In Russian).
10. Alekseenko V.N. Sohranenie pamyatnikov arhitektury i v seysmoopasnyh rayonah / Ustoychivaya arhitektura: nastoyashee i budushee. – Moskva. – 2012. – S. 620 – 628.
11. Alekseenko B.N. Ocenka tehničeskogo sostojanija i zadachi restavratsii zvonnicy Balaklavskogo Georgievskogo monastyrja / Resursojekonomnye materialy, konstrukcii, zdanija i sooruzhenija. Rovno, 2013, no. 27, pp. 431-439. (In Russian).
12. Alekseenko B.N. Analiz rezul'tatov obsledovanija pamjatnika arhitektury XIX veka - hrama svjatyh apostolov Petra i Pavla v g. Sevastopole / Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. St.Petersburg, 2015, no. 12 (27), pp. 90-111. (In Russian).
13. Alekseenko V.N. Opyit restavratsii ob'ektov kulturnogo naslediya v seysmicheskikh rayonah / Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. – SPb. – 2015. – no. 12(39). – S. 57–75.
14. Mikheyeva Y.L. Effects of climatic factors on the temperature and humidity conditions fencing structures orthodox churches xviii-xix centuries/ Alekseenko B.N., Mikheyeva Y.L.// Biosfere compatibility: human, region, technologies. 2017. - no. 1 (17). – S. 20-29.
15. Mikheyeva Y.L. The study of temperature and humidity regime of the Cathedral of St. Peter and Paul in the city of Simferopol / Alekseenko B.N., Mikheyeva Y.L.// Industrial and Civil Engineering. 2017. - no. 7. – S. 46-51.
16. Ulitskiy V.M. Sohranenie pamyatnikov arhitektury i obespechenie ih mehanicheskoy bezopasnosti /Ulitskiy V.M., Shashkin A.G.// Industrial and Civil Engineering. 2017. - no. 7. – S. 31-39.

Alekseenko Vasily Nikolaevich

Crimean Federal University. Vernadsky (FGAOU VO KFU named after Vernadsky), Simferopol

Candidate of technical sciences, associate professor of the department "Geotechnics and structural elements of buildings"

e-mail: avn108@mail.ru

Mikheeva Yuliya Leonidovna

Crimean Federal University. Vernadsky (FGAOU VO KFU named after Vernadsky), Simferopol

Assistant of the department "Geotechnics and structural elements of buildings"

e-mail: miheevajl@gmail.com

ВОПРОСЫ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Проведена оценка минимально необходимой точности расчетов температурных полей. Выделены два основных случая. Показано, что расчет приведенного сопротивления теплопередаче и удельных потерь теплоты наиболее чувствителен к точности определения распределения температуры. Приведен источник погрешности в математических преобразованиях, который должен быть устранен правильным выбором шага расчетной сетки. На примерах проиллюстрированы особенности расчетов температурных полей узлов ограждающих конструкций. Показаны ошибки в выборе расчетной сетки для метода конечных разностей, приводящие к неудовлетворительной точности расчетов. Даны рекомендации по повышению точности расчетов для стационарных и нестационарных случаев. Рассмотрены примеры влияния шага расчетной сетки на погрешность определения температуры и потока теплоты. Приведены примеры завышения точности в нормативных документах, приводящей к ложным ожиданиям у проектировщиков и экспертов.

Ключевые слова: тепловая защита, сопротивление теплопередаче, температурное поле, численные расчеты, метод конечных разностей.

В соответствии с современными требованиями к тепловой защите зданий, для всех ограждающих конструкций необходимо рассчитывать большое число температурных полей. Переработка методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче в СП 50.13330.2012 [1] позволила не рассчитывать каждый раз уникальные температурные поля, а использовать накопленные данные, как из собственного опыта, так и из справочных материалов, например, СП 230.1325800.2015 [2]. Несмотря на это, проблема грамотного расчета температурных полей все равно остается весьма острой, и ее актуальность будет только возрастать. В НИИСФ РААСН часто поступают вопросы по различным деталям расчета температурных полей. Например, правильный выбор расчетного участка, назначение граничных условий, разделение конструкции на узлы и т.д. Но есть ряд вопросов, которые требовали бы особого внимания, но их не задают. По-видимому, они остаются незамеченными большинством специалистов, и, поэтому, их необходимо обсудить подробнее.

1. Оценка требуемой точности расчета температурных полей

С какой точностью необходимо знать температуры на поверхности и внутри конструкции? Ответ зависит от того как мы хотим использовать данную информацию. Если температурное поле рассчитывается с целью проверить конструкцию на промерзание, выпадение конденсата, замораживание оттаивание и т.п., то вполне достаточно будет точности 0,5 °С. Казалось бы, это очень грубая оценка, но практически все потребности ею будут удовлетворены. К тому же, и наши возможности по измерению температуры, а значит и последствий ее достижения конструкцией, будут ограничены примерно той же величиной. Несмотря на кажущуюся точность современных приборов и регистрацию значений с десятками, а то и сотыми долями градуса, погрешность измерений в натуральных условиях зависит от множества сопутствующих факторов. Непостоянство наружной и внутренней температуры, как по времени, так и по пространству, неоднородность материалов, переменность характеристик материалов во времени, влияние оборудования на измеряемый объект и многое другое не дадут повысить указанную точность в условиях реальных измерений. В статье С.И. Крышова «Натурные обследования показателей теплозащиты панельных стен и стен с навесной вентилируемой системой тепло-

изоляции фасадов» [3], автор, имея огромный опыт проведения натуральных исследований современных ограждающих конструкций реалистично оценивает точность измерений приведенного сопротивления теплопередаче в 10% - 15%.

Итак, для непосредственного использования достаточно весьма грубого расчета распределения температуры по конструкции (грубость эта условна, в расчетных условиях такая погрешность составит 0,7% - 1,5% от общего перепада температуры, действующего на конструкцию). Но для расчетов приведенного сопротивления теплопередаче или удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности такой точности совершенно недостаточно. Связано это с особенностями, о которых нужно сказать подробнее.

В результате расчета температурного поля, мы получаем значения температур во всех точках конструкции с некоторой точностью и более ничего. Для нахождения удельных потерь теплоты, или сопротивления теплопередаче необходим поток теплоты через конструкцию, но мы его не знаем, и должны вычислить по температурам. Казалось бы, поток теплоты - это производная температуры по координате, умноженная на коэффициент теплопроводности. Но тут нас подстерегает несколько сложностей. Во-первых, разница температур между соседними узлами сетки при численных расчетах может оказаться сопоставима с общей погрешностью расчета, что приведет к огромной погрешности в определении локальных потоков теплоты. Во-вторых, для неоднородных конструкций (собственно только и представляющих интерес для расчетов) направление потока теплоты меняется от точки к точке, что также снижает точность его нахождения описанным методом.

В итоге, единственным надежным местом нахождения потока теплоты оказывается граница конструкции, на которой известен перепад температуры и коэффициент теплообмена (формула (1) показывает это соотношение на наружной границе конструкции). В расчетах этот коэффициент задается постоянным, что не совпадает с реальной ситуацией, но позволяет полностью оценить саму конструкцию. Средний перепад температуры между поверхностью конструкции и воздухом обычно невелик и составляет примерно от 0,5 °С до 1 °С на наружной границе и от 1 °С до 2,5 °С на внутренней границе. Очевидно, что точность расчета температуры в 0,5 °С привела бы к погрешности определения потока теплоты в 25% - 100%, а это совершенно неприемлемо для современных потребностей.

$$q_n = \alpha_n(t_n - \tau_n) \quad (1)$$

Например, для ограждающей конструкции с приведенным сопротивлением теплопередаче 3,0 (м²·°С)/Вт, в расчетных климатических условиях Подмосковья (температура наружного воздуха -28 °С, температура внутреннего воздуха +20 °С), температурный перепад на наружной границе (рассчитанный по формуле (2)) составит 48/(23·3,0)=0,7 °С.

$$t_n - \tau_n = \frac{t_b - t_n}{\alpha_n R_0} \quad (2)$$

Оценим, какая точность определения сопротивления теплопередаче или удельных потерь теплоты нам может понадобиться. Требования к приведенному сопротивлению теплопередаче традиционно приводятся с двумя знаками после запятой, что предполагает точность его нахождения для неопределенных ограждающих конструкций от 0,8% до 0,12%. Такая точность труднодостижима в расчетах, не соответствует возможностям самих исследуемых конструкций и недостижима в измерениях. Возникает вопрос, если приборами десятые доли процента от сопротивления теплопередаче не фиксируются, а конструкции имеют производственный разброс характеристик, превышающий указанную точность, зачем нам с такой точностью задавать требования к конструкциям? Куда реалистичней требовать точность определения приведенного сопротивления теплопередаче в 1%. (что соответствует 0,02 – 0,06 м² °С/Вт) К такой точности монтажа конструкций, приборной базы и проведения измерений, по крайней мере, можно стремиться (повторюсь, сейчас она не достигнута).

Задавшись точностью определения приведенного сопротивления теплопередаче в 1%, мы можем оценить потребную точность определения удельных потерь теплоты через теплотехническую неоднородность. Она зависит от частоты расположения неоднородности. При точности в 1% суммарный удельный поток теплоты через ограждающую конструкцию (3) должен определяться с точностью $\Delta U_{\text{погр}}$ равной 0,002 – 0,005 Вт/(м²·°C) в зависимости от утепления конструкции

$$\frac{1}{R_0^{\text{пр}}} = \sum a_i U_i + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k \quad (3)$$

Для наглядности, рассмотрим два вида неоднородностей противоположных друг другу по частоте расположения: тарельчатый анкер для крепления утеплителя и сопряжение плиты перекрытия со стеной. Тарельчатые анкеры располагаются на фасаде с большой частотой от 6 до 12 шт/м². Для частоты 10 шт/м² удельные потери теплоты через тарельчатый анкер должны определяться с точностью 0,0002 – 0,0005 Вт/°C. Это очень высокая точность. Сейчас удельные потери теплоты чаще всего приводятся с точностью до одной тысячной и лишь для тарельчатых анкеров в СП 230.1325800.2015 приведены с точностью до 0,0005 Вт/°C. Как видим, в общем случае этого недостаточно. Особенно недостаточно такой точности станет при строительстве зданий с высокими значениями приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, так как $\frac{1}{R_0^{\text{пр}}}$, а значит и допустимая точность $\Delta U_{\text{погр}}$ уменьшатся.

Сопряжение плиты перекрытия со стеной – это мощная теплотехническая неоднородность, но расположена она достаточно редко, в среднем $l = 0,4$ м/м². Удельные потери теплоты для такого теплозащитного элемента должны определяться с точностью до 0,005 – 0,013 Вт/(м·°C). Нынешняя точность приведения материалов в СП 230.1325800.2015 для данного типа узлов (0,001 Вт/(м·°C)) оказывается даже избыточной.

В общем случае максимально допустимая погрешность нахождения удельных потерь теплоты рассчитывается по формуле

$$\Delta \Psi_{\text{погр}} = \frac{\Delta U_{\text{погр}}}{l_j} \quad (4)$$

Погрешность потока теплоты при расчете температурного поля узла конструкции ограничивается величиной

$$\Delta Q_{\text{погр}} = \Delta \Psi_{\text{погр}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot 1 \text{ м} \quad (5)$$

Величина максимально допустимой погрешности по температуре при расчете температурного поля

$$\Delta \tau_{\text{н.погр}} = \frac{\Delta Q_{\text{погр}}}{\alpha_{\text{н}} S_{\text{н}}} \quad (6)$$

Если объединить формулы (4) - (6) получим окончательную формулу для нахождения предельно допустимой погрешности при расчете температурного поля узла конструкции по заданной предельно допустимой погрешности суммарного удельного потока теплоты

$$\Delta \tau_{\text{н.погр}} = \frac{\Delta U_{\text{погр}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\alpha_{\text{н}} S_{\text{н}} l_j} \cdot 1 \text{ м} \quad (7)$$

Для точечной теплотехнической неоднородности формула (7) принимает вид

$$\Delta \tau_{\text{н.погр}} = \frac{\Delta U_{\text{погр}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\alpha_{\text{н}} S_{\text{н}} n_k} \quad (8)$$

Проведем оценку предельно допустимой погрешности при расчете температурного поля для выбранных выше узлов. Для сопряжения плиты перекрытия со стеной рассмотрен узел с удельными потерями теплоты 0,25 Вт/(м·°C). Сопротивление стены по глади примем равным

4 (м²·°C)/Вт, температурный перепад 48 °C. При расчете температурного поля узла площадь расчетной зоны составляет 2 м². По формуле (7) предельно допустимая погрешность расчета температуры 0,01 °C.

Для тарельчатого анкера удельные потери теплоты приняты равными 0,003 Вт/°C. Тарельчатые анкеры располагаются на фасаде с частотой 10 шт/м². Расчетная зона площадью 0,05 м². Как и в предыдущем примере сопротивление стены по глади конструкции примем равным 4 (м²·°C)/Вт, температурный перепад 48 °C. По формуле (8) предельно допустимая погрешность расчета температурного поля 0,017 °C.

Из приведенных примеров мы видим, что для самых разных по своей природе неоднородностей точность определения температуры, необходимая для уверенного нахождения удельных потерь теплоты и приведенного сопротивления теплопередаче, составляет примерно 0,01 °C.

Достичь такой точности расчета уже не так просто. А при измерениях она просто недостижима.

2. Источники погрешности при расчете температурного поля методом конечных разностей

Практически во всех учебниках по численным расчетам погрешность увязывается с переходом от дифференциальных к конечно-разностным уравнениям. В общем случае для нахождения температурного поля решается уравнение теплопроводности (9). Далее рассуждения будут иллюстрироваться на одномерном нестационарном уравнении, так как для многомерного случая все выводы сохраняются, а выкладки окажутся значительно более громоздкими.

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (9)$$

где t – температура, °C;

x – координата, м;

z – время, с;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

ρ – плотность, кг/м³;

λ – теплопроводность, Вт/(м·°C).

Для получения численного решения уравнение (9) преобразуется в конечно-разностное уравнение. Чаще всего используется простейшее конечно-разностное уравнение

$$c\rho \frac{t_i^k - t_i^{k-1}}{\Delta z} = \lambda \frac{t_{i+1}^k - 2t_i^k + t_{i-1}^k}{(\Delta x)^2} \quad (10)$$

При этом обычно забывают о многослойных конструкциях, либо не упоминая их вовсе, либо рассчитывая применить к ним уравнение с помощью специальных условий на стыке. Более корректное уравнение, пригодное для расчетов, как однослойных, так и многослойных ограждающих конструкций имеет следующий вид:

$$\frac{c_i \rho_i \Delta x_i + c_{i-1} \rho_{i-1} \Delta x_{i-1}}{2} \frac{t_i^k - t_i^{k-1}}{\Delta z_k} = \lambda_i \frac{t_{i+1}^k - t_i^k}{\Delta x_i} - \lambda_{i-1} \frac{t_i^k - t_{i-1}^k}{\Delta x_{i-1}} \quad (11)$$

В простейшем случае, когда конструкция состоит из одного материала с постоянными свойствами и шаги по координате времени постоянны ($\lambda_i = \lambda_{i-1}$, $\Delta x_i = \Delta x_{i-1}$ и $\Delta z_k = \Delta z_{k-1}$) разностное уравнение (11) упрощается до уравнения (10).

Раскладывая члены разностного уравнения (10) в ряд Тейлора относительно точки i и времени k , можно заметить отклонения от решаемого уравнения (9).

$$c\rho \left(\frac{\partial t}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 t}{(\partial z)^2} (z_k) \Delta z \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{(\partial x)^2} (x_i) + \frac{1}{12} \frac{\partial^4 t}{(\partial x)^4} (x_i) (\Delta x)^2 \right) \quad (12)$$

В формуле (12) приведены только первые по малости члены, отклоняющиеся от точного уравнения. Это не погрешности расчета в прямом виде, а причины вызывающие появление

погрешностей. Обычно в учебниках и методических пособиях их указывают в обобщенном виде $O[(\Delta x)^2]$ и $O(\Delta z)$, опуская подробности. Различные разностные схемы сравнивают между собой по степеням Δx и Δz . Но для практической оценки погрешности важны именно подробности, которые во всех учебниках пропущены. Для чего нам подробное рассмотрение этих погрешностей? Они неразрывно связаны с выбором шага расчетной сетки по координате и времени, т.е. однозначно определяют выбор сетки достаточной для обеспечения заданной точности.

Во многих методических пособиях ограничиваются уравнением (10) и граничными условиями первого рода, что создает ошибочную уверенность, что численное решение основных задач строительной теплофизики не представляет проблемы и шагов сетки требуется совсем немного. В отвлеченных примерах используют 3 – 6 шагов сетки. Однако, это абсолютно неприменимо к реальным конструкциям, в которых чаще всего встречаются граничные условия третьего рода, стыки слоев и мелкие детали. В ряде учебников рекомендуют механически перевести граничные условия третьего рода и условия на стыке слоев к разностному виду. Такой путь ошибочен и приведет к огромным погрешностям и близко не соответствующим $O[(\Delta x)^2]$ и $O(\Delta z)$. Правильное преобразование граничных условий третьего рода описано в [4,5]. После преобразования погрешность, вносимая граничными условиями, оценивается в $O[(\Delta x)^2]$, но на самом деле, она не совпадает с погрешностью в рядовых узлах сетки и значительно превосходит ее.

Прежде, чем описывать способы снижения погрешностей в местах стыка слоев конструкции рассмотрим природу ее появления на примере уравнения (11). В месте стыка слоев $\lambda_i \neq \lambda_{i-1}$, а значит, при разложении в ряд Тейлора не сократятся третьи производные по координате, которые сократились при исследовании уравнения (10).

$$c\rho \left(\frac{\partial t}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 t}{(\partial z)^2} (z_k) \Delta z \right) = \lambda \frac{\partial^2 t}{(\partial x)^2} (x_i) + \frac{1}{6} (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \frac{\partial^3 t}{(\partial x)^3} (x_i) \Delta x \quad (13)$$

Если разница теплопроводностей $\lambda_i - \lambda_{i-1}$ велика, что соответствует подавляющему большинству реальных случаев, то, при достаточно малых шагах сетки, отклонения разностных уравнений от точных в случаях (12) и (13) будут отличаться на порядки. То есть, стык материалов создаст погрешность на порядки большую, чем рядовой участок конструкции. Аналогичное влияние окажет изменение шага сетки. Для одномерного случая можно подобрать изменение шага сетки так, чтобы компенсировать влияние стыка материалов. Для этого нужно перейти от координаты к термическому сопротивлению. И уже в термических сопротивлениях шаг сетки должен быть постоянным.

$$\frac{\Delta x_i}{\lambda_i} = \frac{\Delta x_{i-1}}{\lambda_{i-1}} \quad (14)$$

Условие (14) на вид простое, но даже оно применимо с ограничениями. В двухмерном и трехмерном случаях использовать его не представляется возможным. В одномерном случае его использование предполагает переменность шага по координате, иначе подобрать правильный шаг, подходящий всем слоям конструкции, окажется невозможным.

Таким образом, наибольшую погрешность в расчеты вносят граничные условия, места стыка материалов и места изменения шага расчетной сетки. Однако, этих общих наблюдений недостаточно, для того чтобы оценить возникающую погрешность количественно. Как следует из уравнений (12) и (13), погрешность зависит не только от величины шага сетки, но и от третьей или четвертой производной температуры по координате. Очевидно, эти производные изменяются с координатой и со временем. В местах малости производных даже наиболее грубая сетка будет давать весьма точные результаты. То есть, основное влияние на погрешность расчетов будут оказывать места наибольшего искажения линий температуры. В общем случае указанная особенность делает почти невозможным предсказание погрешности расчета. Но в нашей области знаний есть дополнительные ограничения, позволяющие провести анализ

далее. В нестационарных условиях основные изменения температуры происходят с наружной стороны. Именно они будут вызывать в одномерном случае искажения температурного поля, а значит создавать условия для возникновения погрешностей при численных расчетах. Причем, наибольшие искажения будут в моменты наибольшей скорости изменения граничных условий. Вблизи внутренней поверхности конструкции изменения температуры так малы и медленны, что не смогут оказать существенное влияние на погрешность расчетов. Несмотря на малое количество статей на эту тему проблемы нестационарного теплопереноса актуальны и по сей день. К примеру, в статье Н.П. Умняковой [6] рассматриваются именно такие проблемы. В стационарном двух- трехмерном случае основное искажение будут создавать теплопроводные включения. Именно вокруг них следует искать наибольшие погрешности расчетов.

Конечно, на третью и четвертую производные температуры по координате огромное влияние оказывают свойства материалов, составляющих данный участок конструкции. На рисунках 1 и 2 показаны распределения температуры для двух ограждающих конструкций: однослойной стены в два кирпича и двухслойной стены из железобетона, утепленного снаружи 150 мм ПСБ-С. Показан одномерный нестационарный случай в момент наибольшей скорости изменения наружных условий. Для расчета задавался пилообразный профиль изменения температур. В течении суток температура сначала падала с 10 °С до -5 °С а затем поднималась обратно. Синяя линия соответствует наружной температуре -5 °С. Рыжая линия соответствует наружной температуре 10 °С после завершения цикла.

Для стены из кирпичной кладки, обладающей большой тепловой инерцией, график распределения температуры изогнут и явно имеет ненулевые производные всех порядков (изгиб меняется со временем). Для двухслойной стены с наружным утеплением ПСБ-С график распределения температуры практически прямой и все производные кроме первой будут близки к нулю независимо от момента времени и координаты. Таким образом, для первой конструкции надо внимательно следить за погрешностью расчетов и аккуратно выбирать шаг

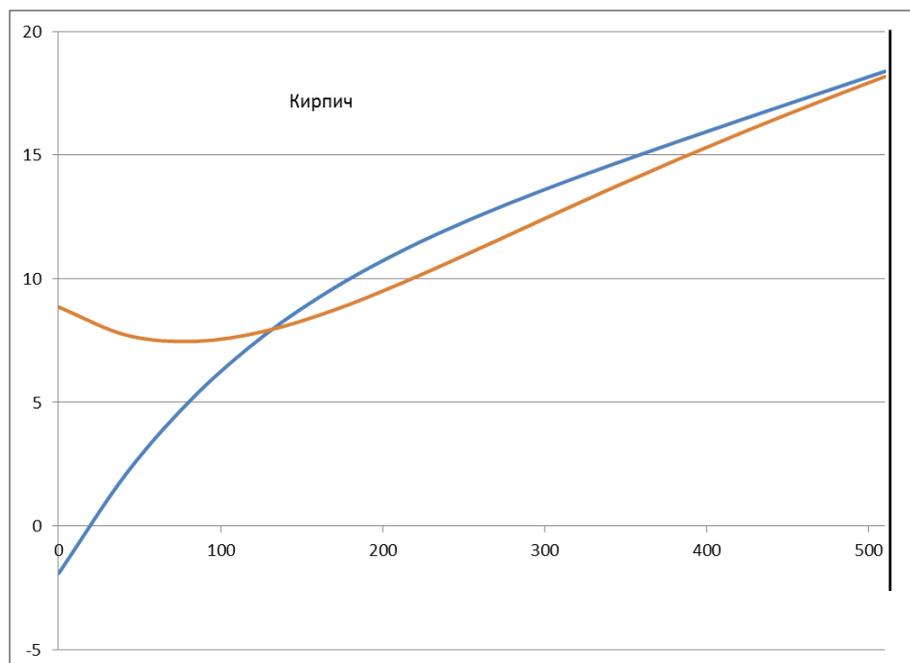


Рисунок 1 – Распределение температуры по толщине ограждающей конструкции для однослойной стены в два кирпича

сетки, а для второй конструкции, несмотря на наличие стыка материалов, погрешность будет практически отсутствовать, и шаг сетки можно выбирать весьма крупный.

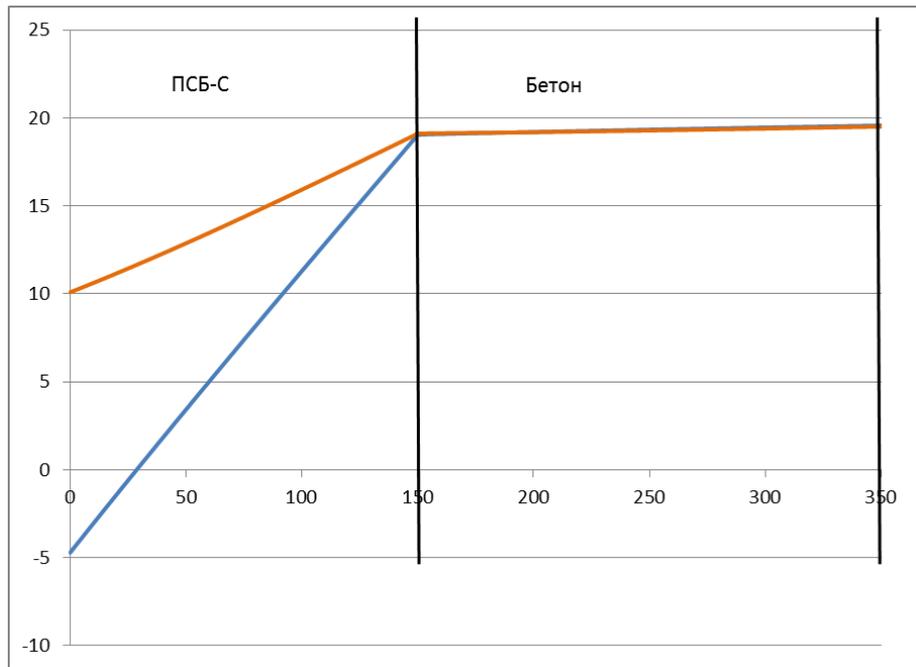


Рисунок 2 – Распределение температуры по толщине ограждающей конструкции для двухслойной стены из железобетона утепленного снаружи 150 мм ПСБ-С

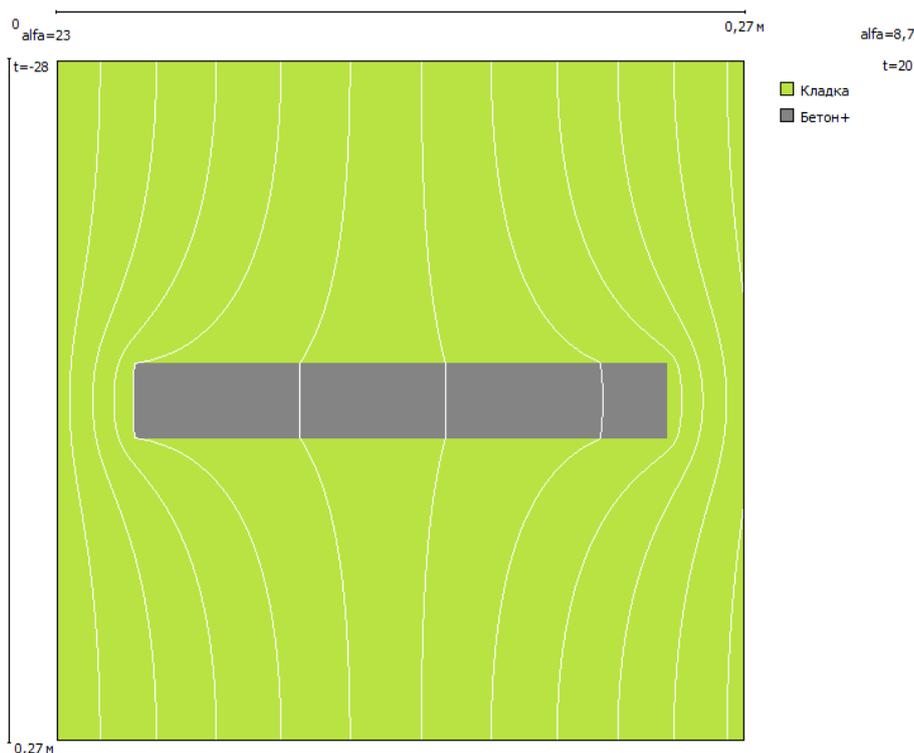


Рисунок 3 – Температурное поле неоднородного участка конструкции. Линии равной температуры проходят с шагом 4 °С начиная с -24 °С и заканчивая 16 °С.

Для двух- и трехмерных расчетов дополнительное искажение в температурное поле вносят неоднородности. Причем, даже в стационарном случае погрешность расчетов приходится учитывать. Для иллюстрации этого тезиса на рисунке 3 приведено двухмерное температурное поле узла конструкции, примерно соответствующего кладке легкого бетона с толстым швом из армированного раствора, или закладной деталью из тяжелого бетона. На рисунке видно, что линии температуры сгущаются вокруг неоднородности и в некоторых местах про-

ходят в 3 – 4 раза чаще, чем на удалении от неоднородности, что неизбежно приведет к ненулевым производным всех порядков, хотя бы на отдельных участках конструкции.

3. Связь погрешности и шага сетки на конкретных примерах

На рисунках 1 и 2 был приведен пример сильных изменений наружной температуры на пределе реалистичности. Для кирпичной стены (для любой инерционной конструкции) в этих условиях возникает существенная зависимость точности результатов от шага сетки по координате. Для этого примера были выбраны экстремальные воздействия. На рисунке 3 показан пример рядовой теплотехнической неоднородности в рядовых условиях. При этом, искажения температурного поля в 2 – 2,5 раза сильнее, чем в примере 1. Кроме того, наличие стыка материалов в двух- трехмерном случае невозможно компенсировать, а значит погрешность расчетов возрастет многократно. То есть, экстремальный нестационарный, но одномерный случай оказался намного менее требовательным точности расчета, чем рядовой стационарный, но двухмерный случай. Рядовым этот случай назван потому, что он еще не содержит металлических включений, имеет простую форму, а теплопроводное включение одно и простой формы.

Для иллюстрации этих рассуждений проведены численные расчеты с несколькими вариантами шага сетки. Для кирпичной стены результаты расчета сведены в таблицу 1. С удвоением шага погрешность уменьшается примерно в четыре раза, что подтверждает предположение о квадратичной зависимости погрешности от шага сетки в данном узле. Из этих результатов следует, что точность, необходимая для проверки конструкции на промерзание, выпадение конденсата и т.п., достигается даже при разбиении узла на 6 – 8 шагов. В ряде случаев это количество придется увеличить при наличии нескольких тонких слоев. Но 10 шагов сетки должно с запасом хватать для задач данного класса. В то же время, для нахождения потока теплоты с приемлемой точностью потребуются разбивать конструкцию минимум на 30 шагов. Все сказанное относится к одномерной нестационарной задаче.

Таблица 1 – Зависимость максимальной погрешности температуры от количества шагов сетки для однослойной кирпичной стены в нестационарном случае

Количество шагов сетки	6	12	24
Погрешность Δt , °С	0,2	0,046	0,011

Для двух-, трехмерной задачи картина совсем иная. Результаты численного расчета с несколькими вариантами шага сетки для узла, показанного на рисунке 3, приведены в таблице 2. Погрешность снижается менее упорядоченно, чем в первом примере, из-за особенностей расчета. Максимальная погрешность достигается на уголках теплопроводных включений, в первой же точке за уголком. Так как при изменении сетки появляются точки, расположенные ближе к уголку, доступный для определения максимум погрешности приближается к критической точке и за счет этого увеличивается. Если бы мы сравнили погрешность в одной и той же точке, то она убывала бы пропорционально шагу, как и предсказывала теория. В отличие от первого примера второй не является экстремальным и не позволяет однозначно судить о границах применимости сеток. Кроме того, погрешность температуры в многомерных случаях не столь однозначно отражается на погрешности потока. Так как поток определяется по средней температуре, то и влияние оказывает средняя, а не экстремальная погрешность, а она, конечно, меньше. Как видно из таблицы 2, погрешность потока уменьшается с увеличением количества шагов быстрее, чем прямо пропорционально. Погрешность потока при 81 шаге сетки уже очень мала, несмотря на еще существенную максимальную погрешность по температуре. Предварительно можно сказать, что в двух-, трехмерном случае для проверки конструкции на промерзание, выпадение конденсата и т.п. достаточно будет 40 шагов сетки (не считая случаев с тонкими металлическими деталями). А для нахождения удельных потерь теплоты или приведенного сопротивления теплопередаче с приемлемой точностью потребуются разбивать кон-

струкцию минимум на 60 шагов. Последняя оценка не является окончательной – это лишь оценка минимального количества шагов сетки снизу на основании одного примера. Вопрос более точного установления ограничений на шаг сетки при расчете многомерных температурных полей требует отдельного намного более подробного изучения.

Таблица 2 – Зависимость максимальной погрешности температуры и потока от количества шагов сетки для узла, изображенного на рисунке 3

Количество шагов сетки	9-9	27-27	81-81
Максимальная погрешность Δt , °C	0,69	0,44	0,2
Погрешность ΔQ , Вт/м	0,34	0,08	0,018

Приведенные выше минимально необходимые количества шагов сетки – это не размер всей сетки, а количество шагов от наружной до внутренней поверхности конструкции в самом узком месте (для современных несветопрозрачных конструкций). Если рассчитывается конструкция сложной формы, то общее количество шагов может достигать и тысячи, важно чтобы поперек конструкции уместилось 40 – 60 шагов в зависимости от задачи.

4. Примеры температурных полей с недостатком шагов сетки.

Из рассмотренных выше примеров следует, что наиболее критичен выбор шага сетки при расчете многомерных температурных полей в рамках определения приведенного сопротивления теплопередаче. К сожалению, приемлемый шаг сетки используется далеко не всегда. Понятно, когда в монографиях и учебниках 20 – 50-ых годов приводятся примеры с малым количеством шагов сетки. Проводя расчеты практически вручную, специалисты того времени часто не имели другого выхода. Например, в книге К.Ф. Фокина [7] приведено большое число примеров расчета температурного поля, в которых ограждающая конструкция делится на 4 - 5 шагов от наружной до внутренней поверхности. Рассчитываемые конструкции в основном были проще, требования к ним намного ниже, а значит и допустимая погрешность была больше. Скорее всего, проводимые в то время расчеты проходили по грани требующихся точностей, и вряд ли могли получаемые температуры в наиболее критичных местах иметь точность выше, чем 1 °C. К тому же расчеты того времени проводились исключительно опытными специалистами. Как это ни удивительно, проблема точности расчета значительно обострилась сейчас с широким распространением специализированных программ. Регулярно в статьях и научно-технических отчетах сторонних организаций мы встречаем ошибки точности. К сожалению, сейчас не принято подробно оформлять расчеты, и шаг расчетной сетки приводится редко, но, во многих случаях, ошибки столь выдающиеся, что их можно наблюдать визуально на температурных полях.

Например, на сайте «Института пассивного дома» (www.passiv-rus.ru) рекламируются возможности по различным теплофизическим расчетам, в том числе расчетам двух- и трехмерных температурных полей с помощью программы HEAT. В качестве иллюстраций приводятся расчеты, статьи и презентации. И прямо в этих материалах можно увидеть некачественные расчеты, заметные невооруженным глазом. Например, статья «Развитие теоретических и практических основ концепции пассивного дома. Примеры реализованных пилотных объектов в России» [8]. Первый же пример температурного поля в этой статье демонстрирует, либо недостаток шагов расчетной сетки, либо неумение вести расчет (вероятность того, что используемая программа неспособна проводить расчеты отбрасываем, так как ничего сложного с математической точки зрения в подобных программах нет). Указанное температурное поле приведено на рисунке 4.

Уравнение теплопроводности так устроено, что линии температуры имеют гладкую округлую форму везде, кроме мест стыка материалов на которых возможны переломы. На рисунке 4 на крайних линиях температуры слева и справа можно заметить пилообразные выступы, абсолютно нехарактерные для естественного распределения температуры. Это артефакты, привнесенные качеством расчета, скорее всего недостатком выбора расчетной сетки.

На том же сайте представлена презентация «Примеры моделирования наружной оболочки энергоэффективных зданий с учетом тепловых мостов. Практическое применение программ HEAT2 и HEAT3» [9]. На странице 49 презентации показано температурное поле с аналогичными пилообразными выступами (рисунок 5).

В той же презентации на слайде 26 встречается и основная причина подобных ошибок – выбор расчетной сетки с недостаточным количеством шагов (рисунок 6). В приводимой расчетной сетке от наружного до внутреннего края конструкции всего 10 шагов, этого, как показало наше предшествующее исследование, совершенно недостаточно для определения потерь теплоты через конструкцию. Стандарт пассивного дома предполагает сверхутепление ограждающих конструкций, что требует еще более высокой точности расчетов, а в иллюстративных материалах, обозначенных как расчеты реальных объектов, мы видим нижайшее качество. Особую иронию описанному случаю придает то, что это не случайные люди, плохо освоившие программу. Авторы этих материалов позиционируют себя специалистами и берут деньги за обучение расчетам по программе HEAT. А на сайте разработчиков программы HEAT эти материалы указаны как обучающие.

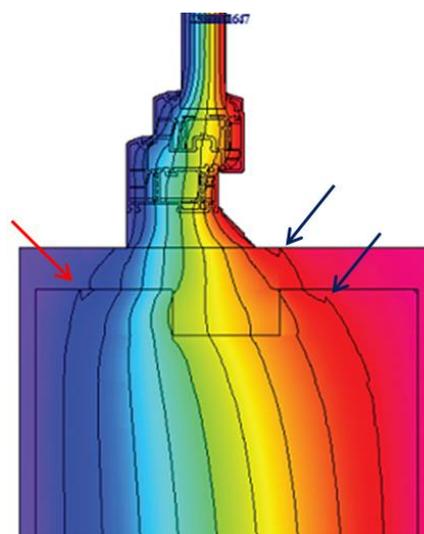


Рисунок 4 – Температурное поле, рассчитанное с ошибками

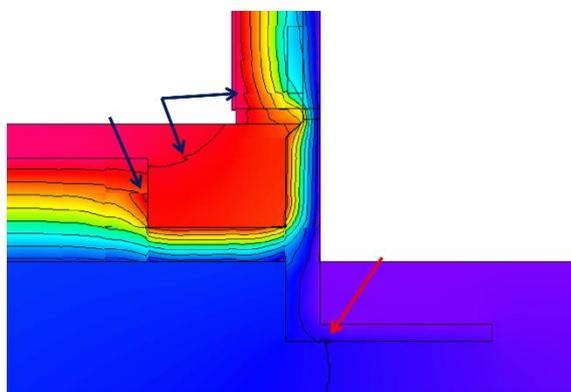


Рисунок 5 – Температурное поле, рассчитанное с ошибками

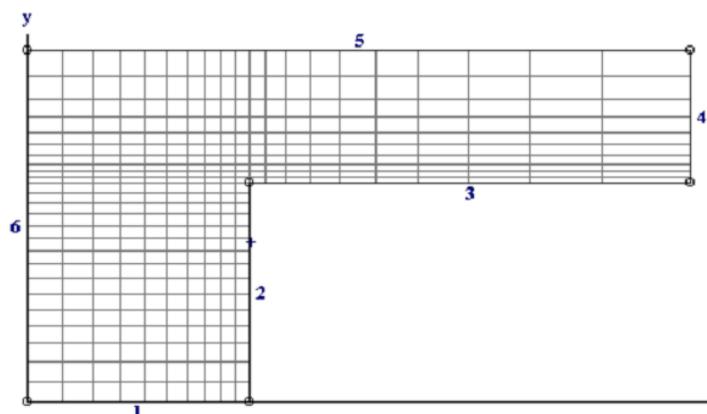


Рисунок 6 – Расчетная сетка с недостаточным количеством шагов

Конечно, это не единственный случай. Например, в статье «MODELLING OF CONDUCTION TRANSFER FUNCTIONS FOR TYPICAL THERMAL BRIDGES IDENTIFIED IN BIM DATA» P. Narowski, J. Stasiński, and P. Wereszczyński [10] для вспомогательных целей проводится расчет температурного поля и приведена расчетная сетка (рисунок 7). Как видим, она содержит лишь 10 шагов поперек стены, и 3 шага поперек светопрозрачной конструкции.

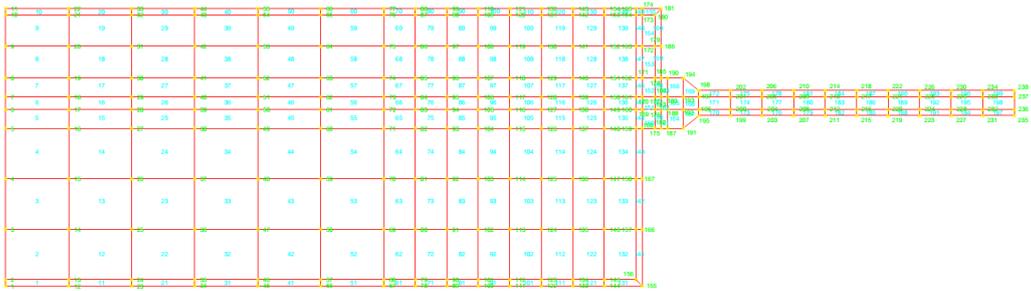


Рисунок 7 – Расчетная сетка с недостаточным количеством шагов

Подробный разбор подобных случаев потребовал бы отдельной статьи. Весь предыдущий текст касался конечно-разностного метода, но для решения уравнения теплопроводности конечно-элементным методом характерны те же проблемы. Их теоретическое и практическое описание требует отдельного исследования, которое логично было бы написать авторам, или постоянным пользователям соответствующих программ. В настоящей статье приведем только иллюстрацию, любезно предоставленную к.т.н. Дмитрием Крайновым из Казанского ГАСУ, являющегося специалистом по расчету температурных полей с помощью различных программных комплексов [11]. Расчеты выполнены на программе ELCUT. Указанная программа доступна в двух вариантах: профессиональном и студенческом. Студенческий вариант бесплатный, но имеет серьезное ограничение по количеству узлов сетки, практически препятствующее ее профессиональному использованию. Несмотря на это, часто используют студенческую версию игнорируя ее непригодность. Результаты такого использования приведены на рисунках 8 и 9. На них можно видеть недостаток узлов разбиения сетки и те же характерные пилообразные выступы и изломы линий температуры.

Заключение

Настоящая работа дает оценку максимально допустимых погрешностей при расчетах температурных полей. Эта информация важна для грамотного и достоверного проведения расчетов. В статье разобраны причины появления погрешностей и их связь с выбором расчетной сетки. Исследования проведены только для конечно-разностного метода, который имеет в настоящее время широкое распространение. Для него даны ориентиры по выбору минимального шага сетки в различных случаях. Для конечно-элементного метода, также широко распространенного, требуются дальнейшие исследования.

Ужесточение требований к энергопотреблению и постоянная борьба за энергоэффективность невозможны без повышения точности расчетов. Современная техника однозначно позволяет проводить

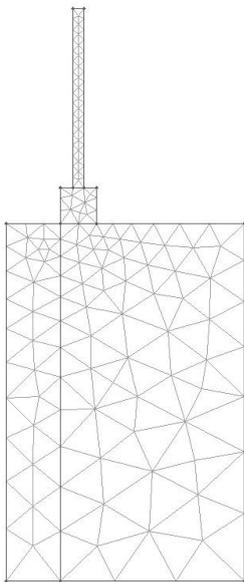


Рисунок 8 – Расчетная сетка с недостаточным количеством узлов

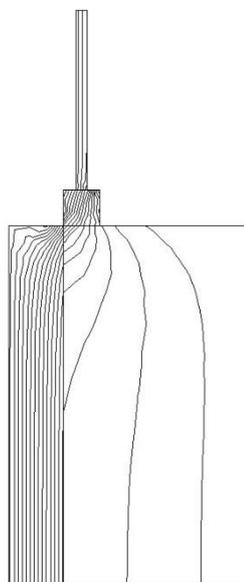


Рисунок 9 – Температурное поле с недостатком узлов расчетной сетки

расчет температурных полей с любой точностью, т.е. реальную точность должны ограничивать только нерасчетные причины (неоднородность материалов, отклонения при монтаже и т.п.). Обилие статей и отчетов с ошибочными или недостаточно точными расчетами, говорит о большом количестве неподготовленных людей, занявшихся теплофизикой и энергосбережением. Сложившаяся ситуация представляет реальную опасность для строительного комплекса,

так как результаты таких ошибочных расчетов принимаются окружающими, в том числе и руководителями, за чистую монету. В современной ситуации пара ошибочных расчетов способна исключить со строительного рынка какую-либо продукцию, или направить целый регион по ложному пути для достижения пониженного энергопотребления.

Давно назрела необходимость повышения грамотности расчетчиков. Требуются некий контроль качества и пропаганда правильных методов расчета, включая разбиение конструкции на узлы, выбор расчетной зоны, наложение сетки, обработку результатов. Возможно, необходим каталог достоверных программ расчета, как это сделано за рубежом.

Также, в статье поставлены вопросы об изменении точности записи приведенного сопротивления теплопередаче и удельных потерь теплоты отдельных теплотехнических неоднородностей в соответствии с их реальным влиянием на конструкцию и технической возможностью определения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 // Минрегион России – М., 2012. С. 96.
2. СП 230.1325800.2015 Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей // Минстрой России. 2015. С. 68.
3. Крышов С.И. Натурные обследования показателей теплозащиты панельных стен и стен с навесной вентилируемой системой теплоизоляции фасадов // ALTIinform. Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2017 г. №4-5 (48). С. 72-81.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем // Самарский А.А. - М., 1977. - 656с.
5. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса // Учебное пособие – Томск STT, 2016. С. 92.
6. Умнякова Н.П. Методика расчета количества переходов через 0°С, -2°С, -4°С и -6°С в толще трехслойных кирпичных стен на основе типового климатического года для оценки долговечности наружных облицовочных слоев ограждающих конструкций // БСТ №8 (996) 2017. С. 37-43.
7. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий // М.:АВОК-ПРЕСС, 5-е изд. 2006. – 256 с.
8. Пилипенко А. Развитие теоретических и практических основ концепции пассивного дома. Примеры реализованных пилотных объектов в России // Архитектура и строительство. 2014 г. №1. С. 32-37.
9. Примеры моделирования наружной оболочки энергоэффективных зданий с учетом тепловых мостов. Практическое применение программ HEAT2 и HEAT3 [Электронный ресурс] // Институт пассивного дома - Режим доступа: http://passiv-rus.ru/images/mosbuild2014/presentations/Pilipenko_PHI.pdf
10. Narowski P. Modelling of conduction transfer functions for typical thermal bridges identified in BIM data // P. Narowski, J. Stasiński, and P. Wereszczyński Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November С. 1320-1327.
11. Крайнов Д.В., Садыков Р.А. Определение дополнительных потоков теплоты через элементы фрагмента ограждающей конструкции // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 10-12

Козлов Владимир Владимирович

НИИСФ РААСН, г. Москва

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Строительной теплофизики

E-mail: kozlov.v2@yandex.ru

KOZLOV V.V.

ACCURACY OF CALCULATION OF THE RESISTANT RESISTANCE OF HEAT TRANSFER AND TEMPERATURE FIELDS

The estimation of the minimum required accuracy of calculations of temperature fields is carried out. Two main cases are distinguished. It is shown that the calculation of the reduced heat transfer re-

sistance and specific heat loss is most sensitive to the accuracy of the temperature distribution. The source of error in mathematical transformations, which must be eliminated by the correct choice of the computational grid step, is given. The examples illustrate the features of calculations of temperature fields of enclosing structures. Errors in the choice of the computational grid for the finite difference method leading to unsatisfactory accuracy of calculations are shown. Recommendations are given to improve the accuracy of calculations for stationary and non-stationary cases. Examples of the influence of the computational grid step on the error of temperature and heat flow determination are considered. Examples of overestimation of accuracy in regulatory documents leading to false expectations of designers and experts are given.

Keywords: *thermal protection, heat transfer resistance, temperature field, numerical calculations, finite difference method.*

REFERENCES

1. SP 50.13330.2012 Teplovaya zashchita zdaniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 23-02-2003 // Minregion Rossii – M., 2012. S. 96.
2. SP 230.1325800.2015 Konstruktsii ograzhdayushchiye zdaniy. Kharakteristiki teplotekhnicheskikh neodnorodnostey // Minstroy Rossii. 2015. S. 68.
3. Kryshov S.I. Naturnyye obsledovaniya pokazateley teplozashchity panel'nykh sten i sten s navesnoy ventiliruyemoy sistemoy teploizolyatsii fasadov // ALITinform. Tsement. Beton. Sukhiye smesi. 2017 g. №4-5 (48). S. 72-81.
4. Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem // Samarskiy A.A. - M., 1977. - 656s.
5. Kraynov A.YU., Min'klv L.L. Chislennyye metody resheniya zadach teplo- i massoperenosa // Uchebnoye posobiye – Tomsk STT, 2016. S. 92.
6. Umnyakova N.P. Metodika rascheta kolichestva perekhodov cherez 0°s, -2°s, -4°s i -6°s v tolshche trekhslonykh kirpichnykh sten na osnove tipovogo klimaticheskogo goda dlya otsenki dolgovechnosti naruzhnykh oblitsovochnykh slojev ograzhdayushchikh konstruktsiy // BST №8 (996) 2017. S. 37-43.
7. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy // M.:AVOK-PRESS, 5-ye izd. 2006. – 256 s.
8. Pilipenko A. Razvitiye teoreticheskikh i prakticheskikh osnov kontseptsii passivnogo doma. Primery realizovannykh pilotnykh ob'yektov v Rossii // Arkhitektura i stroitel'stvo. 2014 g. №1. S. 32-37.
9. Primery modelirovaniya naruzhnoy obolochki energoeffektivnykh zdaniy s uchetom teplovykh mostov. Prakticheskoye primeneniye programm HEAT2 i HEAT3 [Elektronnyy resurs] // Institut passivnogo doma - Rezhim dostupa: http://passiv-rus.ru/images/mosbuild2014/presentations/Pilipenko_PHL.pdf
10. Narowski P. Modelling of conduction transfer functions for typical thermal bridges identified in BIM data // P. Narowski, J. Stasiński, and P. Wereszczyński Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November S. 1320-1327.
11. Kraynov D.V., Sadykov R.A. Opredeleniye dopolnitel'nykh potokov teploty cherez elementy fragmenta ograzhdayushchey konstruktsii // Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2012. № 6. S. 10-12

Kozlov Vladimir Vladimirovich

SRIBP RAACS, Moscow

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Building Thermophysics

8-916-378-45-44

E-mail: kozlov.v2@yandex.ru

УДК 697.133

НЕКЛЮДОВ А.Ю.

РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОГО РАСЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЮ

Рассмотрена удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, являющаяся ключевым показателем энергопотребления здания. Показаны факторы, которые учитывались в расчете энергопотребления в ранее действующих нормативных документах. Показаны основные реализованные направления совершенствования расчета энергопотребления в действующем нормативном документе СП 50.13330.2012. Представлены основные направления совершенствования рассматриваемого расчета в подготавливаемом Изменении № 1 к СП 50.13330.2012. Проведен анализ баланса приточного и вытяжного вентиляционного воздуха для квартир жилых зданий. Выявлен фактор, являющийся одной из важнейших причин недооценки расчетного потребления энергии на отопление и вентиляцию. Даны рекомендации по основным направлениям последующей модернизации расчета удельной вентиляционной характеристики с учетом имеющихся технологических возможностей.

Ключевые слова: удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, удельная вентиляционная характеристика, расход приточного воздуха в квартире, баланс приточного и вытяжного воздуха.

Никакое энергосбережение и, естественно, повышение энергетической эффективности в зданиях невозможно реализовать без верного расчета энергопотребления. Как известно [1, 2], максимальный вклад в энергетический баланс любого здания вносит величина потребленной тепловой энергии, а, ввиду того что потребности в горячем водоснабжении – жестко субъективный фактор, ключевым является параметр потребленной тепловой энергии на отопление и вентиляцию.

В настоящее время в качестве показателя удельного годового расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию в России применяют удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, позволяющую осуществлять эффективное нормирование соответствующих составляющих энергопотребления для всех регионов страны без исключений.

Однако отдельные нормативные правовые акты в части государственного регулирования энергосбережения (в частности, Постановление Правительства от 25 января 2011 г. № 18 и Приказ Минстроя от 6 июня 2016 г. № 399/пр) расположены совершенно не в плоскости событий отраслевого технического нормирования [3].

5. Определение удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию «вчера»

В ныне устаревшем СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», предъявлялись требования к величине расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период q^{h}_{des} , кДж/(м²·°С·сут) или кДж/(м³·°С·сут). В недействующем МГСН 2.01-99 «Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению» требование назначалось в кВт·ч/(м²·год) и только в расчете на единицу площади.

Каковы же основные факторы энергопотребления, которые учитывались в указанных документах?

В МГСН 2.01-99 расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период определялся как разность «общих теплопотерь здания за отопительный

период через наружные ограждающих конструкции» и тепловых поступлений (бытовых и от солнечной радиации). Величина тепловых поступлений принималась с учетом инерционности ограждающих конструкций, а расход тепловой энергии также предполагал учет некоторых бесполезных тепловых потерь, возникающих в результате несовершенства систем отопления.

«Общие теплотери здания за отопительный период через наружные ограждающие конструкции» оценивались на основании общего коэффициента теплопередачи здания, который, в свою очередь, определялся как сумма «приведенного трансмиссионного коэффициента теплопередачи здания» и «приведенного инфильтрационного (условного) коэффициента теплопередачи здания». Этот «приведенный инфильтрационный (условный) коэффициент теплопередачи», составляющий в терминах рассматриваемого МГСН общие тепловые потери через ограждающие конструкции, несомненно, представлял наибольший вопрос, т.к. его величина определялась на основании средней кратности воздухообмена здания за отопительный период «по нормам проектирования соответствующих зданий».

Проблема заключалась в том, что подобная «кратность воздухообмена здания» в строительных нормах никогда не устанавливалась, а сам термин «кратности воздухообмена» применяется для отдельных помещений здания! Принимая в качестве «средней кратности воздухообмена здания» кратность воздухообмена наиболее представительных помещений, проектировщик рисковал исказить величину расхода тепловой энергии. Кроме того, дополнительная путаница образовывалась при уточнении нормативной величины этой средней кратности воздухообмена для жилых зданий, т.к. предписывающий норматив назначался исключительно по величине необходимого расхода только приточного воздуха.

Кроме того, МГСН 2.01-99 указывал, что общий расход тепловой энергии зданием следует определять с отдельным расчетом тепловой энергии «на принудительную приточную вентиляцию», что образовывало логическое противоречие с методикой расчета «условного инфильтрационного коэффициента теплопередачи» по величине «средней кратности воздухообмена здания» (несколько раз осуществлялся учет вентиляционных тепловых потребностей и, в некоторых случаях, тепловых поступлений. Например, при снижении температуры приточного воздуха).

В СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» уточнилось определение средней кратности воздухообмена здания. Несуществующие величины, которые предписывалось в МГСН выбирать «по нормам проектирования соответствующих зданий», превратились в фиксированные величины (для различных общественных зданий). При этом для жилых зданий требования уточнились: расход воздуха стал назначаться в зависимости от расчетной заселенности, а также появилось дополнительное требование к удельному расходу приточного воздуха в расчете на 1 человека. Кроме того, норматив вобрал в себя дополнительный фактор: теперь в расчете учитывались потери теплоты, связанные с потребностью нагревания инфильтрующегося через ограждающие конструкции воздуха. Величина тепловых поступлений теперь принималась с учетом не только инерционности ограждающих конструкций, но и с учетом «эффективности авторегулирования».

6. Определение удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию «сейчас»

Как известно, в настоящее время методику расчета расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию устанавливает СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». При этом множество участников отрасли до сих пор не понимают модернизацию этой методики по сравнению с теми, которые применялись в СНиП 23-02-2003 и в его региональных аналогах и даже вносят искусственную путаницу в нормирование теплоэнергетических показателей зданий.

Во-первых, таковым является отнесение нормируемого показателя исключительно к единицам отапливаемого объема здания.

В СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» наблюдалась серьезная ошибка, когда нормируемые показатели в расчете на единицу площади назначались в расчете на только площадь пола квартир или на полезную площадь иных помещений. Искусственное изменение знаменателя удельного расхода тепловой энергии приводило к необходимости коррекции числителя: для верного учета тепловых потерь в рамках проекций квартир необходимо учесть тепловые потери через внутренние ограждающие конструкции, завершающие эти квартиры со стороны общедомовых пространств (коридоров, лестнично-лифтовых узлов и т.д.), т.е. исключить тепловые потери всех вспомогательных помещений, а также учесть теплообмен между «полезными» и «бесполезными» помещениями. Вопрос о способе учета тепловых потерь этих вспомогательных помещений оставался бы открытым, а, кроме того, невозможно было бы применять коэффициент компактности, где используется объем, ограниченный внутренними поверхностями наружных ограждающих конструкций.

Во-вторых, это – приведение нормируемого показателя к величинам Международной системы единиц.

В системе СИ одними из основных единиц являются секунды (с) – единицы времени. Единицами энергии являются джоули (Дж), однако они – только производные величины. Основными единицами температуры (термодинамической) являются кельвины (К), однако т.к. в указанных расчетах речь идет о разности температуры (выраженной из ГСОП), то в качестве единиц температуры сохранены градусы Цельсия (°С), которые также являются производными единицами системы СИ.

Итак, чтобы удельный расход тепловой энергии построить относительно секунд и джоулей, необходимо выполнить следующее преобразование:

$$1 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{сут}) = 1000 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot 24 \cdot 3600 \cdot \text{с}) = 0,01157(407) \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{с}).$$

Можно заметить, что в числителе полученной размерности также содержатся основные единицы системы СИ (также единицы времени). Тогда при использовании связи единиц энергии и времени можно провести преобразование:

$$1 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{с}) = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{с}) = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Также можно представить обратные преобразования:

$$1 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}) = 24 \cdot 3600 \text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{сут}) = 86400 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{сут}) = 86,4 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{сут})$$

Таким образом, наличие единиц мощности в знаменателе размерности удельной характеристики объясняется формальным сокращением единиц времени при их выражении в секундах – основных единицах системы СИ. Это означает, что характеристическое выражение во Вт/(м³·°С) не меняет физический смысл этого показателя. Это – количество энергии, потерянное единицей отапливаемого объема в единицу времени и отнесенное к перепаду температуры.

Применение представленных размерных единиц широко практиковалось в прошлом веке [4], и необходимость возвращения к ним показана профессором В.Н. Богословским в [5].

В-третьих, произошло серьезное совершенствование нормирования тепловой защиты: переход к новым размерностям позволил выделить комплексное требование, представленное удельной теплозащитной характеристикой, и согласовать его как с оценкой объемно-планировочных решений (коэффициент компактности входит в величину этой характеристики), так и с главным энергетическим показателем, которым в действующем своде правил является удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию.

Подробнее с удельными характеристиками, которые, кроме всего прочего, также позволяют исключить из расчета величину ГСОП, что обеспечивает их универсальное применение для всех регионов страны, можно ознакомиться в работах [6, 7].

Надо отметить, что при этом определение трансмиссионных тепловых потерь происходит с использованием элементного подхода, т.е. расчет указанных тепловых потерь ведется с учетом всех характерных для рассматриваемого здания «мостиков холода», образуемых теплозащитной оболочкой.

В-четвертых, и далее, выделены удельные характеристики для учета вентиляционных тепловых потребностей и тепловых поступлений, уточнены величины расхода приточного воздуха для различных типов общественных зданий, необходимые для расчета удельной вентиляционной характеристики и др.

7. Определение удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию «завтра»

Что добавится в Изменении № 1 к СП 50.13330.2012 в части теплоэнергетических расчетов?

Здесь нужно отметить несколько важных положений.

Реализована модернизация расчета удельной вентиляционной характеристики. Теперь расход приточного воздуха для общественных и административных зданий определяют согласно подразделу проектной документации «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, тепловые сети» с учетом баланса приточного и вытяжного воздуха, в том числе при использовании систем рециркуляции, либо согласно приложению К «Минимальный расход, м³/ч, наружного воздуха на одного человека» СП 60.13330.2016 с учетом количества человек в помещениях. Таким образом, проектировщик получает реальный инструмент для сокращения энергопотребления в результате применения эффективных схемных решений при организации систем вентиляции и воздухообмена в помещениях, а также для учета результирующего влияния применяемых технологических и функциональных решений.

Также исправлена ошибочная ситуация, при которой полезный эффект от систем утилизации теплоты вытяжного воздуха распространялся и на инфильтрационные тепловые потери.

Предложен новый алгоритм определения удельной характеристики тепловых поступлений от солнечной радиации [8, 9].

8. Определение удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию «послезавтра»

Что еще необходимо совершенствовать?

Безусловно, учет воздушного баланса в полной мере необходим и для помещений жилых зданий. Рассмотрим характерные расходы приточного и вытяжного воздуха для стандартных квартир общей площадью 20 – 125 м².

Расход приточного воздуха для жилых помещений квартиры определяется как наибольшая из величин, определенная по двум условиям:

а) нормативная величина в зависимости от заселенности:

1) если общая площадь квартиры, приходящаяся на 1 человека, составляет менее 20 м², то количество приточного воздуха определяется выражением $3 \cdot A_{ж}$, где $A_{ж}$ – жилая площадь квартиры, м²;

2) если общая площадь квартиры, приходящаяся на 1 человека, составляет более 20 м², то количество приточного воздуха определяется выражением $0,35 \cdot h_{эт} \cdot A_{об}$, где $A_{об}$ – общая площадь квартиры, м², $h_{эт}$ – высота этажа, м;

б) не менее 30 м³/ч на одного человека.

Фактически условие б) вводят только при обеспечении санитарной нормы заселенности, однако с целью осуществления дополнительного сравнения крайних вариантов в настоящей статье это условие отнесено и для характерного случая необеспечения заселенности в количестве 20 м² общей площади квартиры на 1 человека.

Расчеты приточного воздуха выполнялись для двух сценариев, отличающихся количеством жильцов в квартирах и, соответственно, фактической заселенностью. В первом сценарии предполагалось, что количество жильцов равняется количеству жилых комнат в квартире, во втором – количество жильцов равнялось количеству жилых комнат «плюс» один человек.

При этом количество комнат в квартирах назначалось в зависимости от общей их площади в соответствии с СП 54.13330.2011 «СНиП 31-01-2003. Здания жилые многоквартирные».

Расход вытяжного воздуха для квартиры определяется в зависимости от типа оборудования для приготовления пищи, установленного на кухне, и от количества и типа помещений для удовлетворения санитарно-гигиенических потребностей (совмещенные и/или отдельные санузлы, ванны и душевые).

Сравнение расходов воздуха выполнено для 4-х наиболее распространенных наборов «кухонь-санузлов» согласно таблице 1.

Таблица 1 – Наборы вспомогательных помещений квартир и оборудования для приготовления пищи

Набор	Оборудование кухни для приготовления пищи	Состав санитарно - гигиенических помещений	Расход вытяжного воздуха, м ³ /ч
1	Электроплита (60 м ³ /ч)	Совмещенный санузел (25 м ³ /ч)	85 м ³ /ч
2	Электроплита (60 м ³ /ч)	Раздельный санузел (25 м ³ /ч) и ванная или душевая (25 м ³ /ч)	110 м ³ /ч
3	Газовая плита (100 м ³ /ч)	Совмещенный санузел (25 м ³ /ч)	125 м ³ /ч
4	Газовая плита (100 м ³ /ч)	Раздельный санузел (25 м ³ /ч) и ванная или душевая (25 м ³ /ч)	150 м ³ /ч

Каждый следующий санузел или ванная увеличивают общий расход вытяжного воздуха квартиры на 25 м³/ч, однако они в настоящем сравнении не рассматривались.

Как видно исходя из рисунка 1, для каждой квартиры (определенной площади) в зависимости от количества жильцов, заселенности и набора вспомогательных помещений определяется такой расход воздуха, при котором количество приточного и вытяжного воздуха, необходимое для квартиры, одинаково. Тогда, для всех квартир, где количество приточного воздуха меньше, чем количество вытяжного, в расчете удельной вентиляционной характеристике будет наблюдаться ошибка, возникающая в результате недооценки количества воздуха, необходимого для компенсации нужд вытяжной системы вентиляции.

При наиболее распространенном варианте набора вспомогательных помещений (раздельный санузел и ванная) с электроплитой на кухне и при благоприятном сценарии заселенности (первый), приближенном к нормативу в 20 м² общей площади квартиры на 1 человека, для квартир общей площадью до 53 м² включительно, а также для квартир общей площадью от 60 до 67 м² (также включительно) будет наблюдаться недооценка требуемого количества приточного воздуха и, соответственно, вентиляционных тепловых потребностей.

Однако, ввиду того что в настоящее время отсутствуют технологические решения, обеспечивающие приточную вентиляцию, предложено сохранить действующий норматив до разработки технологии обеспечения жилых многоквартирных зданий организованной приточной вентиляцией.

Если предположить, что фактическое открывание окон совпадает с реальными потребностями воздушного режима, то частично превышение фактического потребления тепловой энергии жилыми здания объясняется именно недооценкой вентиляционных тепловых потребностей.

Однако без разработки технологии создания воздушного режима (прежде всего, организованной приточной вентиляции) нет смысла точнее оценивать тепловые потребности, образующиеся в результате необходимости нагревания воздуха для вентиляции помещений, когда вынужденное открывание окон искажает и тепловой баланс помещений.

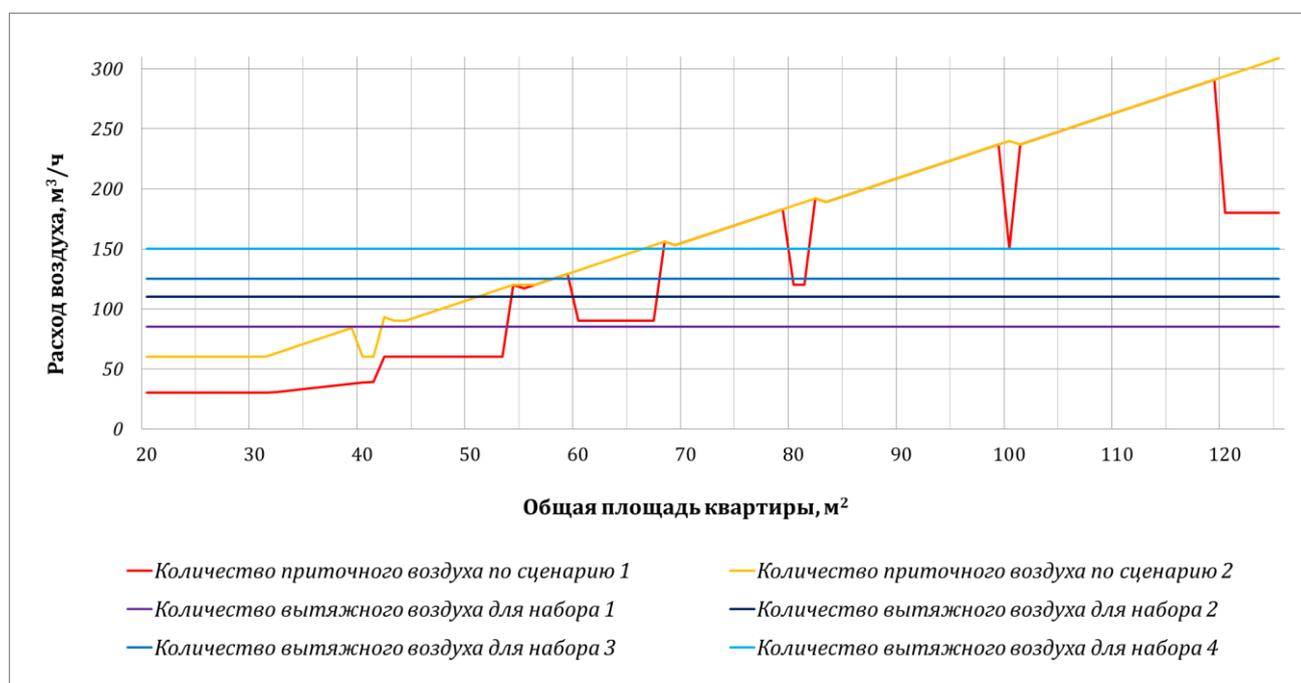


Рисунок 1 – Расходы приточного и вытяжного воздуха, м³/ч, для различных сценариев заселения и наборов вспомогательных помещений

Тем не менее, для общественных зданий с организованными и преимущественно механическими приточно-вытяжными системами вентиляции точный учет воздухообменов (особенно при использовании систем рециркуляции) представляет собой прогрессивный инструмент для сокращения энергопотребления здания.

Заключение

Как уже было отмечено в работе [4], для завершения формирования комплекса критериев, приближающих нас к описанию энергетической эффективности здания как некоторой единой системы, необходимо охарактеризовать также и рациональность использования других материально-технических ресурсов (кроме потребляемой энергии и, значит, топлива). Это возможно реализовать с помощью такой удельной характеристики, которая формируется для расчетного режима (к 1 °С расчетной разности температуры для систем теплоснабжения), описывающего мощность систем отопления и внутреннего теплоснабжения систем вентиляции здания. Некоторые аспекты взаимосвязей различного типа расчетов (определения мощности инженерных систем, определяющих микроклимат помещений в холодный период года, и энергопотребление здания) уже рассмотрены в [10 – 12].

Формирование такого набора удельных характеристик становится особенно важным при проектировании задач для определения эффективности использования энергии в теплый период года, где наблюдается большой разброс максимальных и осредненных нагрузок, определяющих соответственно требуемые инвестиции в системы охлаждения и холодоснабжения систем вентиляции и потребляемую энергию в указанный период года, а также существенную суточную амплитуду температуры воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

12. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России. // Энергия, экономика, техника, экология. 2012. № 5. С. 25-32.
13. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России. // Вестник МГСУ. 2011. № 3-1. С. 192-200.

14. Неклюдов А.Ю. Неразрешенные вопросы методики расчета энергетической эффективности зданий // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 20-23.
15. Казанцев А.П. Справочная книга по отоплению и вентиляции. Издание второе, исправленное и дополненное. Москва-Ленинград: Государственное научно-техническое издательство, 1931. 643 С.
16. Богословский В.Н. Три аспекта создания здания с эффективным использованием энергии // АВОК. 1998. № 3. С. 34-43.
17. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О нормировании теплозащиты и требованиях расхода энергии на отопление и вентиляцию в проекте актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий». // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31-2 (50). С. 468-474.
18. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О требованиях к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 59-66.
19. Гагарин В.Г., Коркина Е.В., Шмаров И.А. Теплопоступления и теплопотери через стеклопакеты с повышенными теплозащитными свойствами // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 2. С. 106-110.
20. Горбаренко Е.В., Коркина Е.В., Ларин О.А. Радиационный режим различно ориентированных вертикальных поверхностей по данным МО МГУ // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 6 (994). С. 43-45.
21. Гагарин В.Г., Неклюдов А.Ю. Использование матричного метода для определения вентиляционной составляющей тепловой нагрузки на систему отопления здания // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 21-25.
22. Неклюдов А.Ю. Расчет характеристик энергопотребления здания при определении трансмиссионных тепловых потерь // Жилищное строительство. 2016. № 7. С. 11-14.
23. Неклюдов А.Ю. Сопряженный расчет вентиляционных тепловых потерь и характеристик энергопотребления здания // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2016. № 6 (982). С. 42-44.

Неклюдов Александр Юрьевич

НИИСФ РААСН, г. Москва

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории строительной теплофизики

E-mail: a.yu.neklyudov@gmail.com

NEKLYUDOV A. YU.

DEVELOPMENT OF MODERN CALCULATION OF CONSUMPTION ENERGY FOR HEATING AND VENTILATION

The specific characteristic of the heat energy consumption for heating and ventilation which is the key indicator of the energy consumption of the building is considered. The factors considered in the calculation of energy consumption in earlier regulatory documents are shown. The main realized directions for improving the calculation of energy consumption in the current normative document SP 50.13330.2012 are shown. The basic directions of improvement of the considered calculation in the prepared Change No. 1 to the SP 50.13330.2012 are presented. The balance of supply and exhaust ventilation air for flats of residential buildings has been analyzed. The factor is revealed that is one of the most important reasons for underestimating of the evaluation of energy consumption for heating and ventilation. Recommendations are given for the main directions of the subsequent modernization of the calculation of specific ventilation characteristic within existing technological possibilities.

Keywords: *specific characteristic of the heat energy consumption for heating and ventilation, specific ventilation characteristic, supply air flow for flats, balance of supply and exhaust air.*

REFERENCES

1. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Perspektivy povysheniya energeticheskoy effektivnosti zhilykh zdaniy v Rossii. // Energiya, ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2012. № 5. S. 25-32.
2. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Perspektivy povysheniya energeticheskoy effektivnosti zhilykh zdaniy v Rossii. // Vestnik MGSU. 2011. № 3-1. S. 192-200.
3. Neklyudov A.YU. Nerazreshennyye voprosy metodiki rascheta energeticheskoy effektivnosti zdaniy // Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2017. № 6. S. 20-23.

4. Kazantsev A.P. Spravochnaya kniga po otopeniyu i ventilyatsii. Izdaniye vtoroye, ispravlennoye i dopolnennoye. Moskva-Leningrad.: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo, 1931. 643 S.
5. Bogoslovskiy V.N. Tri aspekta sozdaniya zdaniya s effektivnym ispol'zovaniyem energii // AVOK. 1998. № 3. S. 34-43.
6. Gagarin V.G., Kozlov V.V. O normirovanii teplozashchity i trebovaniyakh raskhoda energii na otopeniye i ventilyatsiyu v projekte aktualizirovannoy redaktsii SNIp «Teplovaya zashchita zdaniy». // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2013. № 31-2 (50). S. 468-474.
7. Gagarin V.G., Kozlov V.V. O trebovaniyakh k teplozashchite i energeticheskoy effektivnosti v projekte aktualizirovannoy redaktsii SNIp «Teplovaya zashchita zdaniy» // Vestnik MGSU. 2011. № 7. S. 59-66.
8. Gagarin V.G., Korkina Ye.V., Shmarov I.A. Teplopostupleniya i teplopoteri cherez steklopakety s povyshennymi teplozashchitnymi svoystvami // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2017. № 2. S. 106-110.
9. Gorbarenko Ye.V., Korkina Ye.V., Larin O.A. Radiatsionnyy rezhim razlichno oriyentirovannykh vertikal'nykh poverkhnostey po dannym MO MGU // BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki. 2017. № 6 (994). S. 43-45.
10. Gagarin V.G., Neklyudov A.YU. Ispol'zovaniye matrichnogo metoda dlya opredeleniya ventilyatsionnoy sostavlyayushchey teplovoy nagruzki na sistemu otopeniya zdaniya // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2014. № 7. S. 21-25.
11. Neklyudov A.YU. Raschet kharakteristik energopotrebleniya zdaniya pri opredelenii transmissionnykh teplovykh poter' // Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2016. № 7. S. 11-14.
12. Neklyudov A.YU. Sopryazhennyy raschet ventilyatsionnykh teplovykh poter' i kharakteristik energopotrebleniya zdaniya // BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki. 2016. № 6 (982). S. 42-44.

Neklyudov Alexander Yurievich

SRIBP RAACS, Moscow

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Building Thermophysics

E-mail: a.yu.neklyudov@gmail.com

УДК 534.2

ШУБИН И.Л., АНТОНОВ А.И., ЯРОВАЯ Т.С.

О ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ШУМА В ДЕЦИБЕЛАХ «А» В МЕСТАХ МАССОВОГО ПРЕБЫВАНИЯ ЛЮДЕЙ

При санитарно-гигиенической оценке шумового режима в местах с массовым пребыванием людей используются уровни звука, определяемые в децибелах А. В статье предлагается упрощенная методика расчета уровней звука в децибелах А, создаваемых речью в местах массового скопления людей. Методика позволяет значительно повысить скорость расчета уровней звука. В статье указываются границы ее применения. Расчет уровней звука речи скопления людей можно производить непосредственно в децибелах А. Это позволяет почти в 8 раз повысить быстроту расчетов. Погрешности расчетов уровней звука в децибелах А по предложенной методике зависят от характеристик звукопоглощающих свойств ограждений. Погрешности минимальны в случае малой зависимости коэффициентов звукопоглощения ограждений от частоты, что характерно для большинства поверхностей ограждений помещений. Исключения составляют звукопоглощающие конструкции, спектральная характеристика звукопоглощения которых сильно изменяется в зависимости от частоты звука. При использовании таких конструкций необходимо выполнять расчет по всем нормативным полосам частот.

Ключевые слова: объекты с массовым пребыванием людей, уровень звука, речь людей, расчет шума.

Речь является основным источником шума в местах массового пребывания людей. В некоторых случаях, например, при проведении спортивных мероприятий, шум, возникающий от большого скопления людей, может доставлять значительные неудобства жителям окружающей застройки [1]. При больших скоплениях разговаривающих людей в закрытых помещениях уровни шума могут превышать допустимые нормами величины. При этом может ухудшаться разборчивость речи [2].

При санитарно-гигиенической оценке шумового режима на территориях застройки, прилегающих к местам с массовым пребыванием людей, а также в помещениях с большим скоплением людей используются уровни звука, измеряемые в децибелах А (дБА). Такие сведения необходимо иметь и на стадии проектирования объектов. В этом случае для расчета уровней звука в децибелах А производят расчеты уровней звукового давления во всех нормативных октавных полосах частот и затем выполняют их энергетическое сложение с учетом частотной коррекции «А».

В настоящее время, существует ряд методик расчета шума непосредственно в децибелах А. Подобная методика используется, например, при расчете распространения транспортного шума в городах. Известны также попытки разработки методики для расчета шума в децибелах А в производственных помещениях [3]. Однако, в последнем случае такой подход не получил дальнейшего развития из-за низкой точности получаемых результатов.

В статье рассматривается возможность расчета шума в местах массового пребывания людей непосредственно в децибелах А. Предлагается методика такого расчета.

Возможность оценки шума людей в местах их массового скопления в децибелах А связана с особенностями речи человека. Спектр речи отличается постоянством [4], а образующийся отраженный звук в расчетной точке часто не вносит заметного искажения в спектр общего сигнала, в виду того, что звукопоглощающие свойства большинства ограждающих поверхностей незначительно зависят от частоты.

Среднестатистический спектр речи в месте скопления людей имеет достаточно постоянную форму. Усредненный спектр речи на расстоянии 1 м от источника звука приведен на

рис. 1 [5]. Из графика видно, что максимум звуковой энергии речи находится в диапазоне частот 250-500 Гц.

Чувствительность уха существенно зависит от частотного спектра сигнала. Для учета спектральной чувствительности используются специальные поправки ΔL_A . С использованием поправок ΔL_A вычислено частотное распределение энергии речи, учитывающее чувствительность органов слуха (см. рис. 2)

$$P_i = \frac{10^{0,1(L_i + \Delta L_A)}}{\sum_{i=1}^8 10^{0,1(L_i + \Delta L_A)}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где L_i – уровень звукового давления в i -ой частотной полосе, дБ.

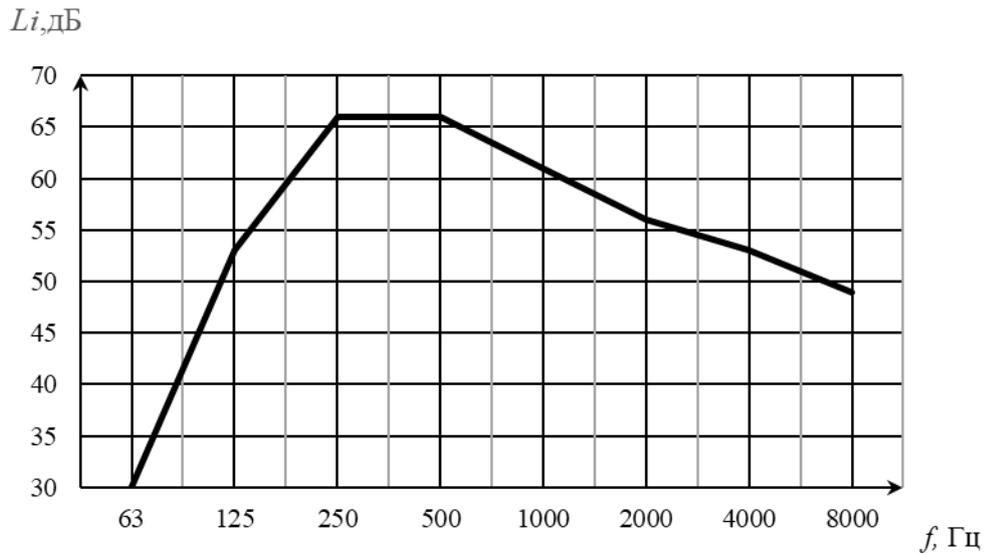


Рисунок 1 - Спектр речи на расстоянии 1 м от источника звука

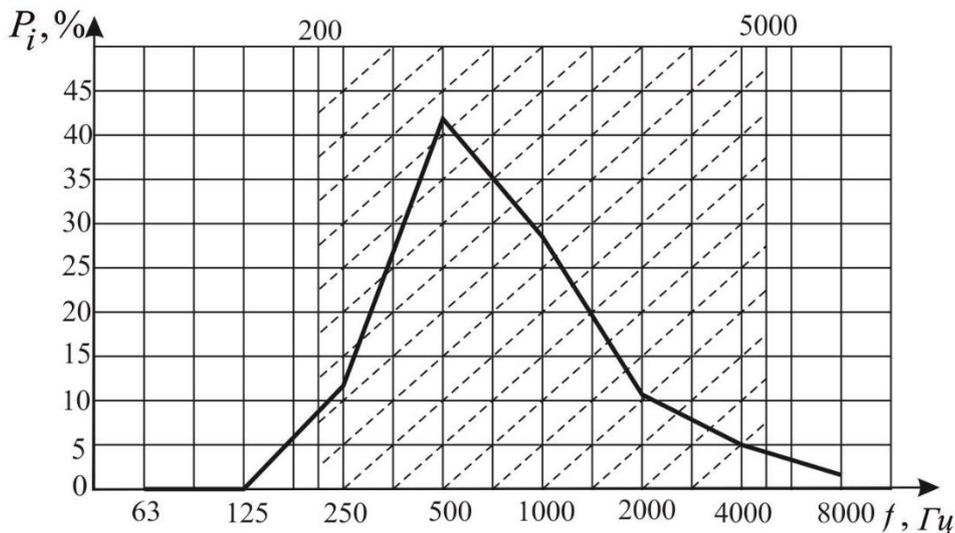


Рисунок 2 - Частотное распределение энергии речи с учетом чувствительности слуха

Видно, что более 95 % (см. рис. 2) всей энергии, вызывающей слуховые ощущения, находится в диапазоне частот 200-5000 Гц (октавы со среднегеометрическими частотами 250,

500, 1000, 2000 и 4000 Гц). Выполненный анализ позволил определить частотный диапазон речи, который необходим и достаточен для оценки разборчивости и для расчета энергетических параметров звукового поля в местах массового пребывания людей. Этот диапазон совпадает с рекомендуемым диапазоном для обеспечения слышимости речевых сигналов [5].

Учитывая незначительный вклад звуковой энергии отдельными частотными полосами, уровень звука в децибелах А можно рассчитывать не по всем восьми стандартным полосам анализа, а только по пяти указанным выше полосам. В табл. 1 приведены результаты расчета уровней речи в децибелах А и погрешностей в случае использования неполного диапазона частот.

Таблица 1 - Результаты расчета уровней речи в децибелах А по ограниченному частотным диапазонам

№ п/п	Уровни звука по частотам, дБ								Уровень, дБА	Погрешность, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	30	53	66	66	61	56	53	49	66.6	-
2	-	-	66	66	61	56	53	49	66.6	0.005
3	-	-	66	66	61	56	53	-	66.5	0.06
4	-	-	66	66	61	56	-	-	66.3	0.31
5	-	-	-	66	61	-	-	-	65	1.6
6	-	-	-	66	-	-	-	-	62.8	3.8

Видно, что результаты расчета уровней в децибелах А по пяти октавным полосам (п. 3 табл.1) и расчета по всем восьми полосам частот (п. 1 табл. 1) практически совпадают, погрешность составляет менее 0.1 дБА. Расчет в децибелах А только по двум основным полосам частот 500 и 1000 Гц обеспечивает также достаточно высокую точность.

Возможность расчета распределения отраженного звука в помещениях непосредственно в децибелах А определяется степенью изменения спектра шума в результате взаимодействия и поглощения звуковой энергии ограждениями помещения на пути распространения шума от источника к расчетной точке. С точки зрения формы частотной характеристики звукопоглощения все ограждающие конструкции можно разделить на три группы.

К первой группе относятся конструкции, коэффициенты звукопоглощения которых практически не зависят от частоты. К таким относятся большинство строительных конструкций и специальные звукопоглощающие ограждения, устраиваемые с относом или с воздушной прослойкой. Параметры воздушной прослойки подбирают таким образом, чтобы повысить звукопоглощение облицовки на низких частотах и обеспечить одинаково высокую эффективности конструкции по всему нормируемому диапазону частот.

Во вторую группу входят конструкции, у которых звукопоглощение выше на низких частотах, например, конструкции из дерева, оконные заполнения, сухая штукатурка с воздушной прослойкой 50-150мм. Третью группу составляют материалы, у которых максимальная эффективность звукопоглощения находится в области высоких частот. К ним относятся звукопоглощающие материалы, смонтированные без воздушного промежутка и имеющие малую эффективность на низких частотах.

В таблице 2 приведены звукопоглощающие параметры некоторых характерных строительных конструкций.

Возможность расчета звукового поля, формируемого речью, в том числе и усиленной за счет системы звукоусиления, непосредственно в децибелах А исследована на примере расчета шума от громкоговорителя в помещении коридорного типа с размерами 24×4×3(н) м. Покрытие пола в помещении выполнено из керамогранита, стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской. Оценка возможности использования непосредственного расчета в децибелах А выполнена для различных вариантов конструкции потолка с характерными спектрами звукопоглощающих свойств. В расчете использовались обобщенные звукопоглощающие характе-

ристики ограждений, соответствующие октавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц. Спектр акустической мощности источника звука соответствовал спектру речи см. (рис. 1).

Расчет звукового поля осуществлялся статистическим энергетическим методом разделения переменных [6] для шести вариантов звукопоглощающих характеристик потолка согласно данным таблицы 1.

Таблица 2 - Коэффициенты звукопоглощения характерных строительных конструкций

№ п/п	Группа	Наименование	Коэффициент звукопоглощения на частоте, Гц				
			250	500	1000	2000	4000
1	1	Стены оштукатуренные или бетонная поверхность, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
2		Плиты «Акмигран» с воздушной прослойкой 100мм	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
3	2	Панель деревянная толщиной 5-10 мм с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
4		Плиты ДВП с воздушной прослойкой	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
5	3	Плиты минераловатные акустические без воздушного зазора	0,15	0,60	0,90	0,80	0,40
6		Плиты «Акмигран» без воздушного зазора	0,15	0,50	0,65	0,65	0,70

Для каждого варианта звукопоглощения помещения в трех расчетных точках на расстоянии 2, 8 и 18 м от источника звука выполнялось два расчета: расчет уровней звука по восьми октавным полосам частот с последующим определением уровней в децибелах А и расчет непосредственно в децибелах А. В табл. 3 приведены погрешности результатов расчета по предлагаемой методике относительно данных точного расчета.

Таблица 3 – Погрешности расчета уровней звука непосредственно в децибелах А

Конструкция потолка			Погрешность, дБА, на расстоянии от источника звука		
№	Группа по табл.1	Наименование конструкции			
			2 м	8 м	18 м
1	1	Бетонная окрашенная поверхность	0.3	0.4	0.5
2		Плиты «Акмигран» с воздушной прослойкой 100мм	0.1	0.1	0.4
3	2	Панель деревянная	0.1	0.2	0.3
4		Плиты ДВП с воздушной прослойкой			
5	3	Плиты акустические без воздушного зазора	0.6	1.6	6.7
6		Плиты «Акмигран» без воздушного зазора	0.7	2.3	5.6

В целом результаты расчета в приведенном примере, а также результаты подобных расчетов, выполненных нами в других помещениях, позволяют сделать следующие выводы.

Расчет уровней звука речи скопления людей можно производить непосредственно в децибелах А. Это позволяет почти в 8 раз повысить быстродействие расчетов. Погрешности расчетов уровней звука в децибелах А по предложенной методике зависят от характеристик звукопоглощающих свойств ограждений. Погрешности минимальны в случае малой зависимости коэффициентов звукопоглощения ограждений от частоты (конструкции групп 1 и 2 по табл. 1), что характерно для большинства поверхностей ограждений помещений. Исключение составляют звукопоглощающие конструкции, спектральная характеристика звукопоглощения которых сильно изменяется в зависимости от частоты звука (конструкции группы 3 по таблице 1). При использовании таких конструкций необходимо выполнять расчет по всем нормативным полосам частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов, А.И. Расчет распространения прямого звука в городской среде от объектов с массовым пребыванием людей / А.И. Антонов, И.Л. Шубин, Т.С. Яровая // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – № 3 (19). – С. 105–112.
2. Антонов, А.И. Расчеты шума при акустическом благоустройстве в помещениях с массовым пребыванием людей / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Т.С. Яровая // Строительство и реконструкция. - 2017. - № 4 (72). - С. 94-100.
3. Ващук Д.Б., Заборов В.И. Расчет звуковых полей по уровням звука в дБА. – В кн.: III Всесоюзная конференция по борьбе с шумом и вибрацией. Борьба с шумом. – Челябинск: ВНИИТБчермет, 1980. – С.308–312.
4. Антонов, А.И. Экспериментальное определение энергетических параметров речи с целью использования их при оценке шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, Т.С. Яровая // Приволжский научный журнал. - 2017. - № 4 (44). - С. 9-15.
5. Хорев, А.А. Технические каналы утечки акустической (речевой) информации // Специальная техника. – М., 2004. – № 3 – С. 59–64.
6. Леденев, В.И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий // В.И. Леденев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 156 с.

Шубин Игорь Любимович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва
Доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор НИИСФ РААСН
E-mail: niisf@mail.ru

Антонов Александр Иванович

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

Яровая Татьяна Сергеевна

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", г. Тамбов
аспирант
E-mail: ais@nnn.tstu.ru

SHUBIN I.L., ANTONOV A.I., YAROVAYA T.S.

ON THE POSSIBILITY OF CALCULATION OF NOISE IN DECIBELS "A" IN PLACES OF MASS STAY OF PEOPLE

In the sanitary-hygienic assessment of the noise regime in places where people stay in masses, the sound levels determined in decibels A are used. The paper proposes a simplified technique for calcu-

lating sound levels in decibels A, generated by speech in places of mass congestion. The technique allows to significantly increase the speed of calculation of sound levels. The article specifies the limits of its application. Calculation of the sound levels of the speech of a congestion of people can be made directly in decibels A. This makes it possible to increase the speed of calculations by almost 8 times. The errors in the calculation of sound levels in decibels A, according to the proposed method, depend on the characteristics of the sound-absorbing properties of the enclosures. Errors are minimal in the case of low dependence of the noise absorption coefficients of fences on frequency, which is typical for most surfaces of enclosure fencing. The exception is made by sound-absorbing structures, the spectral characteristic of sound absorption of which varies greatly depending on the frequency of sound. When using such structures, it is necessary to perform calculations for all regulatory frequency bands.

Key words: objects with massive stay of people, sound level, people's speech, noise calculation.

REFERENCES

1. Antonov. A.I. Raschet rasprostraneniya pryamogo zvuka v gorodskoy srede ot obyektov s massovym prebyvaniyem lyudey/ A.I. Antonov. I.L. Shubin. T.S. Yarovaya // Biosfernaya sovmestimost: chelovek. region. tekhnologii. – 2017. – № 3 (19). – S. 105–112.
2. Antonov. A.I. Raschety shuma pri akusticheskom blagoustroystve v pomeshcheniyakh s massovym prebyvaniyem lyudey / A.I. Antonov. V.I. Ledenev. T.S. Yarovaya // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. - 2017. - № 4 (72). - S. 94–100.
3. Vashchuk D.B., Zaborov V.I. Raschet zvukovykh poley po urovnym zvuka v dBA. – V kn.: III Vsesoyuznaya konferentsiya po borbe s shumom i vibratsiyey. Borba s shumom. – Chelyabinsk: VNIITBchermet. 1980. – S.308–312.
4. Antonov. A.I. Eksperimentalnoye opredeleniye energeticheskikh parametrov rechi s tselyu ispolzovaniya ikh pri otsenke shumovogo rezhima na obyektakh s massovym prebyvaniyem lyudey / A.I. Antonov. O.A. Zhogoleva. T.S. Yarovaya // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. - 2017. - № 4 (44). - S. 9–15.
5. Khorev. A.A. Tekhnicheskiye kanaly utechki akusticheskoy (rechevoy) informatsii // Spetsialnaya tekhnika. – M., 2004. – № 3 – S. 59–64.
6. Ledenev. V.I. Statisticheskiye energeticheskiye metody rascheta shumovykh poley pri proyektirovanii proizvodstvennykh zdaniy // V.I. Ledenev. – Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta. 2000. – 156 s.
6. Ledenev, V.I. Statisticheskie ehnergeticheskie metody rascheta shumovykh polej pri proektirovanii proizvodstvennykh zdaniy // V.I. Ledenev. – Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2000. – 156 s.

Shubin I.

Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Director of Institute NIISF RAASN
E-mail: niisf@mail.ru

Antonov A.

Tambov State Technical University, Tambov
Doctor of Technical Sciences, associate professor, head of "Architecture and building construction" department
E-mail: ais@nnn.tstu.ru

Yarovaya T.

Tambov State Technical University, Tambov
graduate student
E-mail: ais@nnn.tstu.ru

УДК 51-74:67.09.55

ЕЗЕРСКИЙ В.А., КУЗНЕЦОВА Н.В., БЕССОНОВ И.В., СЕЛЕЗНЕВ А.Д.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ЦСП

Для решения проблемы оценки качества композиционных строительных материалов предлагается использовать метод многокритериального сравнительного анализа. Рассматриваются несколько вариантов составов смесей композиционных строительных материалов с использованием отходов цементно-стружечных плит, каждый из которых характеризуется определенным набором свойств – критериев оценки. Для определения наилучшего варианта состава по рассматриваемым критериям оценки возможно использовать весовые коэффициенты, отражающие значимость конкретного свойства. Практическое использование метода многокритериального анализа для технико-экономической оценки композиционных материалов позволило при установлении определенных приоритетов выполнить ранжирование составов по единственному синтетическому показателю. Предлагаемый метод оценки качества позволяет существенно экономить время на поиск оптимального варианта и повысить объективность оценки.

Ключевые слова: цементные композиционные материалы, добавки, отходы производства цементно-стружечных плит, многокритериальный сравнительный анализ, синтетический показатель качества.

Введение

Производство композиционных материалов, обладающих высокими прочностными характеристиками и низкой себестоимостью за счет использования местного природного сырья и техногенных отходов, в настоящее время является перспективным направлением развития строительной индустрии [1].

Экономические показатели, доступность сырья, его количество, технологические, экономические и экологические особенности производства являются важнейшими характеристиками композиционных материалов наряду с физико-механическими параметрами (прочность при сжатии, прочность при изгибе, плотность) [2].

Существует значительное количество различных способов оценки эффективности применения отходов в производстве строительных материалов, однако выполнить объективную комплексную оценку конечной продукции крайне сложно, так как все эти способы имеют существенные недостатки: возможность учета только ограниченного количества критериев, трудоемкость их определения, расчет эффективности по какому-либо основному показателю (экономический, экологический), сложность сбора исходных данных, расчета и оценки [3].

На основе лабораторных испытаний удастся подобрать составы с добавками отходов, обеспечивающие высокие показатели отдельных качеств бетонов, однако в большинстве случаев затруднительно определить и выбрать окончательный и наилучший состав материала. Часто в стороне остаются варианты, которые характеризуются лучшими сочетаниями показатели качества – стоимость, показатели качества – технологичность, экологичность – транспортные расходы, чем выбранные по одному самому лучшему показателю из числа анализируемых. К тому же возникают проблемы недооценки или переоценки того или иного состава материала, которые сложно заметить, просматривая и сравнивая варианты вручную.

В такой ситуации возникает потребность инструментальной оценки вариантов составов по многим критериям. Для облегчения процедуры принятия решения можно использовать многокритериальный сравнительный анализ. Использование вычислительного инструмента,

задачей которого стал бы анализ информации о качестве отдельных вариантов состава материала, может значительно упростить процесс выбора наилучших вариантов и повысить объективность оценки качества.

Целью данного исследования является разработка на основе использования одного из методов многокритериального сравнительного анализа инструментального подхода к оценке качества вариантов состава цементного композиционного материала с использованием отходов производства цементно-стружечных плит (ЦСП). Данный вид отходов образуется в значительном количестве на предприятии «Тамак» (г. Тамбов) – около 5,5 тыс. м³ в год [4].

1 Выбор и обоснование математического метода

При оценке качества вариантов состава смесей цементного композиционного материала с использованием отходов приходится учитывать много факторов, которые в итоге определяют свойства предлагаемого материала. Учет всех факторов при выборе окончательного варианта весьма проблематичен, так как анализ большого числа критериев затрудняет объективную оценку. Решение проблемы может быть облегчено при использовании вычислительных алгоритмов и инструментов, которые объективно характеризуют качества вариантов с учетом предпочтений, закладываемых на этапе создания материала.

В качестве вычислительного инструмента для оценки качества вариантов состава смесей цементных композиционных материалов могут использоваться методы многофакторного и многокритериального сравнительного анализов, а также метод главных компонентов [5, 6, 7, 8, 9]. Метод многокритериального сравнительного анализа может служить вычислительным инструментом для определения наиболее подходящих вариантов среди множества предложенных, опираясь на совокупность их характеристик или на выбранные критерии. На практике данный метод используется во многих ситуациях, когда необходимо принять решение на основе анализа ряда параметров или функций.

Достоинствами многокритериального сравнительного анализа являются: возможность использования различных систем критериев, как количественных, так и качественных; достаточная универсальность, обеспечивающая возможность сравнивать и ранжировать любые объекты, для которых можно построить общую систему критериев; обозримость и оперативность, означающая, что все необходимые расчеты и экспертные оценки по методике могут выполняться одним экспертом или небольшой группой в приемлемые сроки [9].

В данном исследовании использован математический метод многокритериального сравнительного анализа, опирающийся на построение скаляра синтетического показателя, который учитывает численные значения оценок критериев и их весовые коэффициенты [9]. Этот метод характеризуется точностью и простыми вычислениями, что делает его вполне пригодным для оценки качества строительных материалов.

В качестве синтетического показателя нами использован скорректированный суммирующий показатель J_i , который рассчитывался по формуле [9]:

$$J_i = \sum_{j=1}^m (z_{ij} \cdot v_j),$$

где m – число критериев;

z_{ij} – кодированная мера j -того критерия для i -того варианта;

v_j – весовой коэффициент j -того критерия.

При выполнении анализа все варианты необходимо предварительно оценить в соответствии с выбранными критериями. Критерии могут быть количественные, выраженные числами, и качественные, которые требуют создания шкалы оценок и присвоения им соответствующих цифровых значений в соответствии с установленной шкалой.

Затем для проведения анализа значениям оценок критериев, выраженным в единицах измерения, присваиваются безразмерные значения, для чего выполняется кодирование значений оценок критериев. Кодирование для стимуляторов (критериев, которые с увеличением повышают оценку качества варианта) заключается в вычислении отношения каждой числовой оценки критерия к максимальному значению в целой совокупности оценок данного критерия.

В случае дестимуляторов (критериев, которые с увеличением понижают оценку качества варианта) перед кодированием вводится максимализация значений оценок. Максимализация заключается в нахождении обратного числа соответствующей оценки критерия. Далее выполняется кодирование подобно как для стимуляторов [9].

В случае применения методов, учитывающих веса критериев, следующим шагом должно быть определение значений весовых коэффициентов соответствующих критериев, при условии, что их сумма должна составлять 100%. После установления всех данных выполняется вычисление значений выбранного синтетического показателя для всех вариантов.

2 Характеристика вариантов состава смесей цементных материалов для сравнительного анализа

Составы смесей композиционного строительного материала с использованием отходов производства ЦСП представлены следующими компонентами:

- вяжущее – портландцемент марки М500 ГОСТ 31108-2003;
- заполнитель – кварцевый песок мелкой фракции ГОСТ 8736-93* и отходы ЦСП с насыпной плотностью 650 кг/м³ и следующим гранулометрическим составом: свыше 1 мм – 7 %; 0,63-1 мм – 4 %; 0,32-0,63 мм – 81 %; 0,16-0,32 мм – 8 %;
- вода ГОСТ 23732-79;
- добавки – пластификатор Кратосол ПК, ускоритель твердения Кратосол УТ.

Компоненты смеси дозировались в соотношении, зависящим от условий эксперимента и отправлялись в вибровращательную мельницу периодического действия для измельчения и перемешивания. Водоцементное отношение для разных составов принималось исходя из условия создания равноподвижных смесей. Прочность образцов определялась на 28 сутки в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Результаты экспериментального определения физико-механических показателей цементных композиционных материалов с описанными составами смесей опубликованы в [10].

На основе накопленных данных лабораторных испытаний для анализа были выбраны следующие 13 составов смесей с добавлением отходов и модифицирующих добавок, обеспечивающих высокие показатели отдельных качеств бетонов (таблица 1).

Таблица 1 – Варианты компонентных составов цементных композиционных материалов с использованием отходов ЦСП

№ варианта	Компонентный состав				
	Цемент	Песок	Отходы ЦСП	Пластификатор Кратосол ПК (в % от массы цемента)	Ускоритель твердения Кратосол УТ (в % от массы цемента)
1	0,333	0,333	0,333	0	0
2	0,25	0,75	0	0	0
3	0,143	0	0,857	0	0
4	0,2915	0,5415	0,167	0	0
5	0,2385	0,1665	0,595	0	0
6	0,1965	0,375	0,4285	0	0
7	0,242	0,361	0,397	0	0
8	0,219	0,329	0,452	0	0
9	0,237	0,422	0,304	0	0
10	0,237	0,422	0,304	0	1
11	0,237	0,422	0,304	0,8	0
12	0,237	0,422	0,304	0,4	0,5
13	0,237	0,422	0,304	0,8	0,5

Приведенные в таблице 1 составы смесей цементных композиционных материалов с использованием отходов ЦСП послужили основой для последующей количественной оценки их качества.

3 Выбор критериев качества вариантов состава материала

С учетом положений и требований норм проектирования к изготовлению бетонных материалов при определении совокупности критериев была выбрана группа критериев в количестве 6, характеризующих физико-механические свойства полученных материалов. Далее эта группа была дополнена 3 критериями, характеризующими экономические показатели составов. Последним критерием принят критерий, характеризующий экологические свойства составов. Таким образом, были выбраны 10 следующих критериев:

К₁ – прочность на сжатие, МПа; критерий количественный, стимулятор;

К₂ – прочность на изгиб, МПа; критерий количественный, стимулятор;

К₃ – плотность, кг/м³; критерий количественный, стимулятор;

К₄ – стоимость, руб/(кг·м³) при нулевой цене отходов ЦСП; критерий количественный, дестимулятор;

К₅ – стоимость материала, руб/МПа на 1 МПа прочности при сжатии (при нулевой стоимости отходов); критерий количественный, дестимулятор;

К₆ – класс бетона; критерий количественный, стимулятор;

К₇ – морозостойкость; критерий количественный, стимулятор;

К₈ – водопоглощение, %, масс.; критерий количественный, дестимулятор;

К₉ – стоимость, руб/(кг·м³) добавок на 1 м³ бетонной смеси; критерий количественный, дестимулятор;

К₁₀ – экологическая оценка материала; критерий качественный, стимулятор.

4 Выбор весовых коэффициентов критериев

Весовые коэффициенты критериев устанавливались на основе экспертной оценки, полученной от группы специалистов строительной отрасли. При этом были разработаны три шкалы предпочтений: 1 – шкала с одинаковыми приоритетами и равными весовыми коэффициентами для всех 10 критериев; 2 – шкала весовых коэффициентов с приданием высших приоритетов физико-механическим критериям (критерии 1, 2, 3, 6, 7, 8); 3 – шкала весовых коэффициентов с приданием высших приоритетов экономическим и экологическим критериям (критерии 4, 5, 9, 10) (таблица 2).

Таблица 2 – Весовые коэффициенты для принятых критериев

Критерий	Шкала 1 (J_1)	Шкала 2 (J_2)	Шкала 3 (J_3)
К ₁	0,10	0,20	0,05
К ₂	0,10	0,15	0,05
К ₃	0,10	0,10	0,05
К ₄	0,10	0,15	0,05
К ₅	0,10	0,10	0,05
К ₆	0,10	0,05	0,15
К ₇	0,10	0,05	0,20
К ₈	0,10	0,05	0,20
К ₉	0,10	0,05	0,15
К ₁₀	0,10	0,10	0,05
Σ	1,00	1,00	1,00

Установленные весовые коэффициенты использовались далее при выполнении расчетов синтетических показателей качества вариантов состава материала по принятым критериям.

5 Порядок выполнения расчетов

Расчеты, необходимые для проведения исследования, выполнены в программе Microsoft Excel в виде таблиц, содержащих исходные данные и расчеты на отдельных этапах анализа.

Первый этап включал в себя создание таблицы, содержащей значения оценок отдельных критериев для каждого варианта (таблица 3). Эти значения для качественных и количественных критериев устанавливались по методикам, приведенным при описании каждого критерия.

Таблица 3 – Оценки вариантов по принятым критериям

Номер варианта	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀
1	9,81	0,325	1549,48	7,5	50	3	3030,3	388,5	0	20,5
2	22,07	0,523	2032,55	15	100	1	3575,0	161,8	0	12,1
3	7,58	0,289	1416,67	5	50	5	929,5	94,8	0	34,9
4	15,74	0,448	1690,10	10	50	2	3302,7	210,4	0	18,1
5	10,77	0,350	1585,94	7,5	50	4	1983,2	183,6	0	32,0
6	11,59	0,369	1598,96	7,5	50	4	2252,3	194,2	0	27,5
7	15,51	0,335	1585,94	10	50	4	2511,6	162,0	0	22,8
8	12,10	0,263	1588,96	7,5	50	4	2278,5	225,6	0	28,9
9	18,46	0,276	1709,64	12,5	50	3	2637,7	142,6	0	18,1
10	20,65	0,386	1795,57	15	100	3	2656,9	128,4	71,1	16,7
11	22,17	0,386	1720,05	15	100	3	2652,7	119,5	47,4	15,4
12	24,57	0,374	1766,93	15	100	3	2654,6	107,9	59,25	13,9
13	26,20	0,466	1829,57	20	100	3	2662,7	101,6	82,95	12,5

Следующим шагом при проведении исследования было кодирование значений оценок из таблицы 3, т.е. присваивание значениям оценок критериев, выраженным в единицах измерения, безразмерных значений. Кодирование выполнялось отдельно для стимуляторов и дестимуляторов (таблица 4).

После вычисления кодированных значений частных оценок отдельных критериев выполнялась их корректировка с учетом весовых коэффициентов для каждого подхода. Окончательным этапом вычислений явилось суммирование частных скорректированных кодированных оценок в синтетический показатель качества J_i для каждого i -того варианта (таблица 4).

Таблица 4 – Кодированные значения оценок вариантов по принятым критериям и значения синтетических показателей качества вариантов J_1, J_2, J_3

Номер варианта	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	J_1	J_2	J_3
1	0,3744	0,6214	1	0,375	0,5	0,6	0,3067	0,2440	1	0,6098	0,5631	0,5428	0,5242
2	0,8424	1	0,1333	0,750	1	0,2	0,2600	0,5859	1	0,3582	0,6129	0,6824	0,5533
3	0,2893	0,5526	0,0929	0,250	0,5	1	1	1	1	0,3582	0,6042	0,4733	0,8021
4	0,6008	0,8566	0,1108	0,500	0,5	0,4	0,2814	0,4506	1	0,6906	0,5391	0,5604	0,5193
5	0,4111	0,6692	0,1040	0,375	0,5	0,8	0,4687	0,5163	1	0,3906	0,5235	0,4776	0,5895
6	0,4424	0,7055	0,1049	0,375	0,5	0,8	0,4126	0,4882	1	0,4545	0,5283	0,4915	0,5792
7	0,5920	0,6405	0,1040	0,500	0,5	0,8	0,3700	0,5852	1	0,5482	0,5640	0,5425	0,6053
8	0,4618	0,5029	0,1042	0,375	0,5	0,8	0,4079	0,4202	1	0,4325	0,5004	0,4591	0,5544
9	0,7046	0,5277	0,1121	0,625	0,5	0,6	0,3524	0,6648	1	0,6906	0,5777	0,5750	0,6014
10	0,7882	0,7380	0,1177	0,750	1	0,6	0,3498	0,7383	0,001	0,7485	0,5831	0,6519	0,5148
11	0,8462	0,7380	0,1128	0,750	1	0,6	0,3503	0,7933	0,001	0,8116	0,6002	0,6721	0,5316
12	0,9378	0,7151	0,1159	0,750	1	0,6	0,3501	0,8786	0,001	0,8992	0,6247	0,7003	0,5567
13	1	0,8910	0,1200	1	1	0,6	0,3491	0,9331	0,001	1	0,6893	0,7898	0,5970

6 Результаты исследования и их интерпретация

Вычисления синтетического показателя качества J_i для каждого варианта проводились трижды с учетом весовых коэффициентов критериев для каждого из трех подходов. Результаты вычислений приведены в таблицах 4, 5.

Таблица 5 – Результаты многокритериального сравнительного анализа в порядке расположения вариантов от максимального значения качества к минимальному

Подход 1 (J_1)		Подход 2 (J_2)		Подход 3 (J_3)	
J_1	Номер варианта	J_2	Номер варианта	J_3	Номер варианта
0,6893	13	0,7898	13	0,8021	3
0,6247	12	0,7003	12	0,6053	7
0,6130	2	0,6824	2	0,6014	9
0,6043	3	0,6721	11	0,5970	13
0,6002	11	0,6519	10	0,5895	5
0,5831	10	0,5750	9	0,5793	6
0,5777	9	0,5604	4	0,5567	12
0,5640	7	0,5429	1	0,5545	8
0,5631	1	0,5424	7	0,5534	2
0,5391	4	0,4915	6	0,5317	11
0,5283	6	0,4776	5	0,5242	1
0,5235	5	0,4734	3	0,5193	4
0,5005	8	0,4591	8	0,5148	10

Синтетический показатель J является основой для установления рейтинга вариантов состава смесей цементного композита с добавкой ЦСП, рассмотренных в настоящем исследовании. Анализируя его наибольшие и наименьшие значения, соответствующие своим вариантам, можно их интерпретировать как наилучшие и наихудшие варианты составов.

Различия полученных значений синтетического показателя J для трех подходов свидетельствуют о важности правильного выбора весовых коэффициентов критериев, так как все исходные данные для расчетов, кроме весовых коэффициентов, были одинаковыми для всех подходов. Наибольшие различия показателя качества выявлены между третьим подходом и двумя остальными. В случае первых двух подходов полученные результаты близки между собой, а в третьем на крайних позициях появились другие варианты составов материала. При этом выявлено, что при принятии одинаковых приоритетов и равных весовых коэффициентов для всех 10 критериев наилучшими вариантами оказались варианты 13, 12, 2; наихудшими – 8, 5, 6. При придании приоритета и отражении его в высших весовых коэффициентах физико-механическим свойствам (критерии 1, 2, 3, 6, 7, 8) наилучшими вариантами оказались 13, 12, 2; наихудшими – 8, 3, 5. При придании приоритета и отражении его в высших весовых коэффициентах экономическим и экологическим свойствам (критерии 4, 5, 9, 10) наилучшими вариантами оказались 3, 7, 9; наихудшими – 10, 4, 1.

В подходах 1 и 2 наилучшим вариантом оказался состав 13, т.е. состав, имеющий наибольшую прочность при сжатии. Однако, с позиции подхода 3, этот состав не является наилучшим, что объясняется невозможностью получить при частичной замене песка отходами ЦСП и введении добавок наиболее дешевый вариант.

В подходе 3 наилучшим вариантом оказался состав 3, имеющий максимальное значение критерия стоимостного показателя, но, в то же время, и минимальное значение прочности при сжатии.

Установленный рейтинг качества вариантов состава материала, по конфронтации конкурирующих вариантов, дает информацию для окончательного принятия наилучшего состава.

Выводы

Использование многокритериального сравнительного анализа для оценки качества составов цементных композиционных материалов с использованием отходов ЦСП оказывается весьма эффективным, поскольку легко и в короткое время позволяет сжать большое количество информации до единого параметра качества в виде синтетического показателя J для каждого варианта состава смеси материала.

Для технико-экономической оценки композиционных материалов использование метода многокритериального анализа позволило при установлении определенных приоритетов выполнить ранжирование составов смесей по единственному синтетическому показателю. Выявлено, что в зависимости от принятого подхода к оценке качества (принятие одинаковых приоритетов и равных весовых коэффициентов или придание приоритета какому-либо критерию с увеличением его весового коэффициента) в качестве наилучших вариантов выступают разные составы смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 10 мая 2016 г. № 868-р).
2. Щепочкина Ю.А. Модификация мелкозернистого бетона добавками измельченной пластмассы / Ю.А. Щепочкина, Б.И. Быков // Строительство и реконструкция. 2017. № 4. – С. 129-132.
3. Дворкин Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 368 с.
4. О компании ЗАО "ТАМАК" [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.tamak.ru/about/> (Дата обращения – 28.04.2018 г).
5. Финансовая статистика: Учебник/Под ред. Т.В. Тимофеевой, А.А. Снатенкова. – М.: Финансы и статистика, 2009.-287с.
6. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ./Дж.-О. Ким, Ч.У.Мьюллер, У.Р.Клекка. – М.: Финансы и статистика, 1989. -215с.
7. Бузни А.Н., Буйко О.В.. Детерминантный анализ гостиничного предприятия// Вестник академии знаний.- Краснодар: Академия знаний, 2015. - №13(2), с. 15-24.
8. Главные компоненты и факторный анализ [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stfacan.html> (Дата обращения – 28.04.2018 г).
9. Szwabowski J. (2001): Metody wielokryterialnej analizy porównawczej: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie.- PŚ, Gliwice, 2001.
10. Езерский В.А. Модификация цементных смесей с использованием отходов производства цементно-стружечных плит / В.А. Езерский, Н.В. Кузнецова, О.С. Барина // Строительные материалы. 2016. № 6. – 84 с.

Езерский Валерий Александрович

Белостокский технический университет, г. Белосток

Доктор технических наук, профессор кафедры "Основы строительства и строительной физики"

E-mail: wiz75micz@rambler.ru

Кузнецова Наталия Владимировна

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Кандидат технических наук, доцент кафедры "Архитектура и строительство зданий"

E-mail: nata-kus@mail.ru

Бессонов Игорь Вячеславович

федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской Академии Архитектуры и Строительных Наук», г. Москва,

Кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Стройфизика-тест»,

e-mail: bessonoviv@mail.ru

Селезнев Артем Денисович

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Магистрант кафедры "Конструкции зданий и сооружений"

E-mail: selezen95@yandex.ru

EZERSKIY V.A., KUZNETSOVA N.V., SELEZNEV A.D.

MULTI-CRITERIA COMPARATIVE ANALYSIS WITH THE ESTIMATE OF THE QUALITY OF CEMENT COMPOSITES WITH THE USE OF CBPB WASTE

To solve the problem of estimating the quality of composite building materials, it is proposed to use the method of multi-criteria comparative analysis. Several variants of compositions of the mixtures of composite building materials with the use of cement bonded particle board waste are considered, each of them is characterized by a certain set of properties - evaluation criteria. To determine the best variant of the composition, according to the evaluation criteria in question, it is possible to use weighting coefficients, reflecting the significance of a particular property. Practical use of the multi-criteria analysis method for the technical and economic estimate of composite materials allowed, with setting certain priorities, to perform the ranking of compositions with a single synthetic index. The proposed method of estimating quality can save time of searching for the optimal variant significantly and increase the objectivity of the estimate.

Keywords: cement composite materials, additives, waste of cement bonded particle board production, multi-criteria comparative analysis, synthetic quality index.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya promyshlennosti stroitel'nyh materialov na period do 2020 goda i dal'nejshuyu perspektivu do 2030 goda (utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 10 maya 2016 g. № 868-r).
2. SHCHepochkina YU.A. Modifikaciya melkozernistogo betona dobavkami izmel'chennoj plastmassy / YU.A. SHCHepochkina, B.I. Bykov // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2017. № 4. – S. 129-132.
3. Dvorkin L.I. Stroitel'nye materialy iz othodov promyshlennosti / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin. – Rostov n/D: Feniks, 2007. – 368 s.
4. O kompanii ZAO "TAMAK" [EHlektronnyj resurs].– Rezhim dostupa: <http://www.tamak.ru/about/> (Data obrashcheniya – 28.04.2018 g).
5. Finansovaya statistika: Uchebnik/Pod red. T.V. Timofeevoj, A.A. Sntenkova. – M.:Finansy i statistika, 2009.-287s.
6. Faktornyj, diskriminantnyj i klasternyj analiz: Per. s angl./Dzh.-O. Kim, CH.U.M'yuller, U.R.Klekka. – M.: Finansy i statistika, 1989. -215s.
7. Buzni A.N., Bujko O.V.. Determinantnyj analiz gostinichnogo predpriyatiya// Vestnik akademii znaniy.- Krasnodar: Akademiya znaniy, 2015. - №13(2), s. 15-24.
8. Glavnye komponenty i faktornyj analiz [EHlektronnyj resurs].– Rezhim dostupa: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stfacan.html> (Data obrashcheniya – 28.04.2018 g).
9. Szwabowski J. (2001): Metody wielokryterialnej analizy porównawczej: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie.- PŚ, Gliwice, 2001.
10. Ezerskij V.A. Modifikaciya cementnyh smesej s ispol'zovaniem othodov proizvodstva cementno-struzhechnyh plit / V.A. Ezerskij, N.V. Kuznecova, O.S. Barinova // Stroitel'nye materialy. 2016. № 6. – 84 s.

Ezerskiy Valeriy Alexandrovich

Bialystok University of Technology, Bialystok

Doctor of Technical Sciences, Professor of Department "Fundamentals of Construction and Construction Physics"

E-mail: wiz75micz@rambler.ru

Kuznetsova Natalia Vladimirovna

Tambov State Technical University, Tambov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department "Architecture and Building Construction"

E-mail: nata-kus@mail.ru

Seleznev Artem Denisovich

Tambov State Technical University, Tambov

Master student of Department of "Structure of Buildings and Constructions"

E-mail: selezen95@yandex.ru

СТЕПАНОВ М.В., МОЙСЕЕНКО Г.А.

РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕРЫ ПОЛЗУЧЕСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА И СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ РАЦИОНАЛЬНОМ СОДЕРЖАНИИ ФИБРЫ

Установлены меры ползучести высокопрочного сталефибробетона (ВСФБ) и матрицы мелкозернистого высокопрочного бетона (МВБ) для различного возраста (7 сут., 28 сут. и 100 сут.) на основании развития экспериментального метода применительно к различным уровням напряжений. Выполнена корректировка формулы И.Е. Прокоповича и М.М. Заставы для описания линейной меры ползучести применительно к новому классу мелкозернистых высокопрочных бетонов и сталефибробетонов; дано развитие экспериментальной методики И.Е. Прокоповича и М.М. Заставы на случай определения нелинейных мер ползучести для нового класса МВБ и ВСФБ. Предложенная зависимость для описания мер ползучести хорошо согласуется с данными экспериментальных исследований

Ключевые слова: высокопрочный сталефибробетон, высокопрочный мелкозернистый бетон, фибра, возраст бетона, деформация ползучести, меры ползучести.

1. Краткая характеристика экспериментальных исследований

Использованы экспериментальные исследования [1], в которых изучался полный спектр физико-механических и реологических характеристик высокопрочных мелкозернистых бетонов и сталефибробетонов. Для оценки влияния стальной фибры на деформации ползучести было задействовано 2 серии образцов – призм размером 7,07x7,07x28 (см).

Остановимся на определении деформаций ползучести. Первая серия бетонировалась без стальной фибры, а во вторую вводилась прямая латунированная высокопрочная фибра Ø 0,3 мм и длиной 13 мм в количестве 1,5% от объема. Использовался следующий состав фибробетонной смеси (ВСФБ):

- портландцемент марки ПЦ 500 ДОН 900кг/м³;
- песок с $M_k = 2,5$ 860кг/м³;
- фибра 120кг/м³;
- вода 190кг/м³;

Составы МВБ отличались только отсутствием фибры. Соотношения компонентов назначалось в соответствии с исследованиями [2].

Составы бетонов можно отнести к самоуплотняющимся, поскольку имеем расплыв конуса более 60 см. Характеристики образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Возраст, сут.	Вид бетона	R_b , МПа	E_b МПа $\times 10^{-3}$	ν_b
7	МВБ	80,3	30,8	0,281
	ВСФБ	87,2	37,5	0,276
28	МВБ	102,7	38,2	0,295
	ВСФБ	111,5	43,1	0,299
100	МВБ	104,7	37,4	0,291
	ВСФБ	117,3	44,3	0,285
240	МВБ	108,90	39,0	0,289
	ВСФБ	122,8	44,0	0,290

2. Экспериментальный подход к описанию меры ползучести

Выражения для мер ползучести предлагались различными исследователями.

Для описания деформаций ползучести в данных исследованиях использовалась основанная на большом количестве экспериментов с обычными бетонами формула, предложенная И.Е. Прокоповичем и М.М. Заставой [3] в виде

$$C(t, \tau) = C(\infty, 28) \cdot \Omega(\tau) \cdot f(t - \tau), \quad (1)$$

где $C(\infty, 28)$ – предельное значение меры ползучести, определяемое по методике [4] (см. табл. 2, 3);

$\Omega(\tau)$ – функция, учитывающая влияние старения бетона на меру ползучести;

$f(t - \tau)$ – функция, учитывающая нарастание во времени меры ползучести.

В [3] τ обозначается как t_0 .

Для функций $\Omega(\tau)$ и $f(t - \tau)$ принимаются выражения

$$\Omega(\tau) = 0,5 + de^{-2\gamma_1\tau} \quad (2)$$

$$f(t - \tau) = 1 - De^{-\alpha(t-\tau)} - Be^{-\gamma_1(t-\tau)} \quad (3)$$

где d и γ_1 – назначаются по табл. 2 и табл. 3; $B = 0,475$; $D = 0,525$, $\alpha = 0,1$.

Таблица 2

Параметры	t_0 , сут.	Значение параметра d при модуле открытой поверхности конструкции M_0 , м ²			
		10 и менее	20	40	60 и более
d	3	1,326	1,485	1,661	1,855
	7	1,001	1,121	1,256	1,406
	14	0,737	0,825	0,924	1,035
	28	0,626	0,701	0,785	0,879
	>60	0,592	0,663	0,744	0,833

Таблица 3

Параметры	Значение параметра γ_1 при модуле открытой поверхности конструкции M_0 , м ²			
	10 и менее	20	40	60 и более
$\gamma_1 \text{сут}^{-1}$	0,004	0,006	0,008	0,010

Для применения методики И.Е. Прокоповича и М.М. Заставы к высокопрочным бетонам необходимо корректировать функции $f(t - \tau)$ и $\Omega(\tau)$. Данные функции корректируются для обеспечения лучшей сходимости экспериментальных и теоретических данных. Корректировка осуществляется за счет подбора коэффициентов d , B , D и α . При корректировке было учтено два условия:

1) Произведение значения предельной меры ползучести бетона, загруженного в возрасте 28 суток, на функцию $\Omega(\tau)$ дает значение предельной меры ползучести бетона, загруженного в возрасте τ :

$$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau) = C(\eta, \infty, \tau) \quad (4)$$

2) Значение выражения $C(\eta, t, \tau) = C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau) \cdot f(t - \tau)$ при $t = \tau$ равно экспериментальному значению начальной меры ползучести $C(\eta, \tau, \tau)$:

$$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau) \cdot f(\tau - \tau) = C(\eta, \tau, \tau) \quad (5)$$

Коэффициенты подбирались при модуле открытой поверхности M_0 , равном 10 и менее m^{-1} . Подбор производился при разных уровнях нагружения ($\eta=0,3R_b$, $\eta=0,6R_b$, $\eta=0,8R_b$). Значение подобранных коэффициентов для различных уровней нагружения приведено в табл. 4 – 5.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных по указанным условиям приведено в табл. 6 – 9. Сравнение полученных теоретических кривых с экспериментальными данными приведено на рис. 1 – 6.

Таблица 4 – Значения коэффициентов функций $\Omega(\tau)$ и $f(t - \tau)$ для МВБ

Коэффициент	7 сут.		28 сут.			100 сут.	
	0,3R _b	0,6R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b
d	0,905	1,419	0,626	0,626	0,626	0,626	0,518
B	0,275	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385
D	0,650	0,549	0,570	0,557	0,532	0,585	0,543
α	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Таблица 5 - Значения коэффициентов функций $\Omega(\tau)$ и $f(t - \tau)$ для ВСФБ

Коэффициент	7 сут.		28 сут.			100 сут.	
	0,3R _b	0,6R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b
d	0,920	0,728	0,626	0,626	0,626	0,495	0,413
B	0,205	0,185	0,385	0,385	0,285	0,385	0,385
D	0,730	0,753	0,563	0,551	0,619	0,545	0,548
α	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Таблица 6 - Проверка выполнения условия (2.4) для МВБ

Параметр	$\tau=7$ сут.		$\tau=28$ сут.			$\tau=100$ сут.	
	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,8R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$
$C(\eta, \infty, \tau)$	4,020	7,126	2,966	3,868	3,918	2,508	2,835
$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau)$	4,021	7,123	2,967	3,869	3,919	2,317	2,834

Таблица 7 - Проверка выполнения условия (2.4) для ВСФБ

Параметр	$\tau=7$ сут.		$\tau=28$ сут.			$\tau=100$ сут.	
	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,8R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$
$C(\eta, \infty, \tau)$	2,818	3,345	2,057	2,814	2,871	1,486	1,929
$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau)$	2,818	3,344	2,058	2,815	2,872	1,486	1,929

Таблица 8 - Проверка выполнения условия (2.5) для МВБ

Параметр	$\tau=7$ сут.		$\tau=28$ сут.			$\tau=100$ сут.	
	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,8R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$
$C(\eta, \tau, \tau)$	0,301	0,467	0,133	0,224	0,324	0,076	0,205
$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau) \cdot f(t - \tau)$	0,302	0,470	0,134	0,224	0,325	0,075	0,204

Таблица 9 - Проверка выполнения условия (2.5) для ВСФБ

Параметр	$\tau=7$ сут.		$\tau=28$ сут.			$\tau=100$ сут.	
	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$	$\eta=0,8R_b$	$\eta=0,3R_b$	$\eta=0,6R_b$
$C(\eta, \tau, \tau)$	0,184	0,207	0,107	0,180	0,277	0,104	0,129
$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(\tau) \cdot f(t - \tau)$	0,183	0,207	0,107	0,180	0,276	0,104	0,129

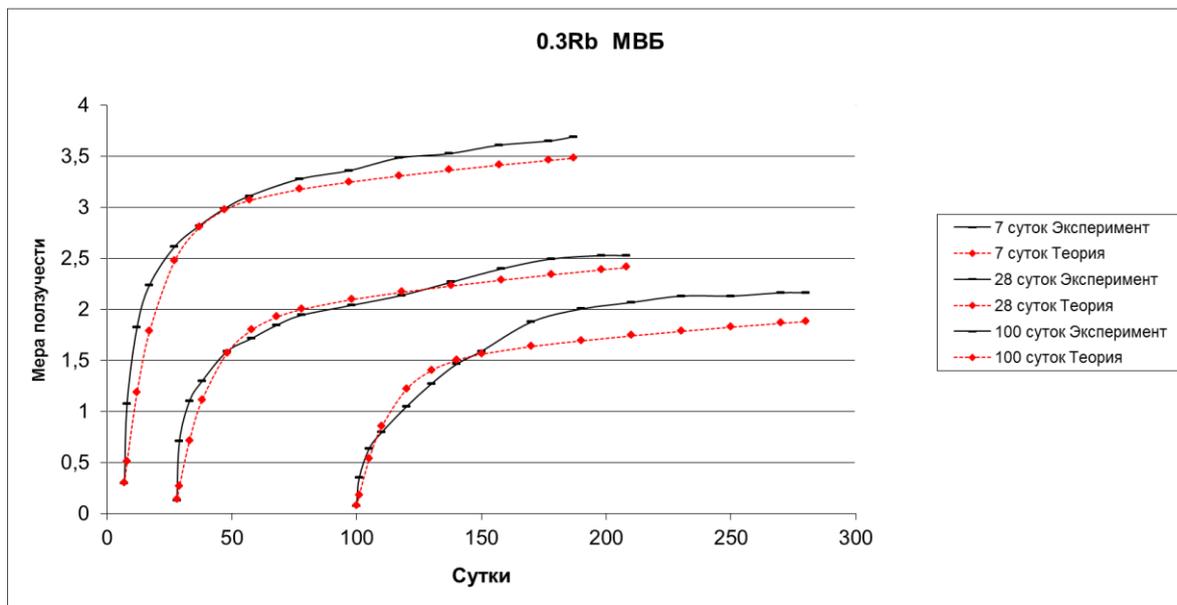


Рисунок 1 - Теоретические и экспериментальные зависимости мер ползучести МВБ при $\eta=0,3R_b$

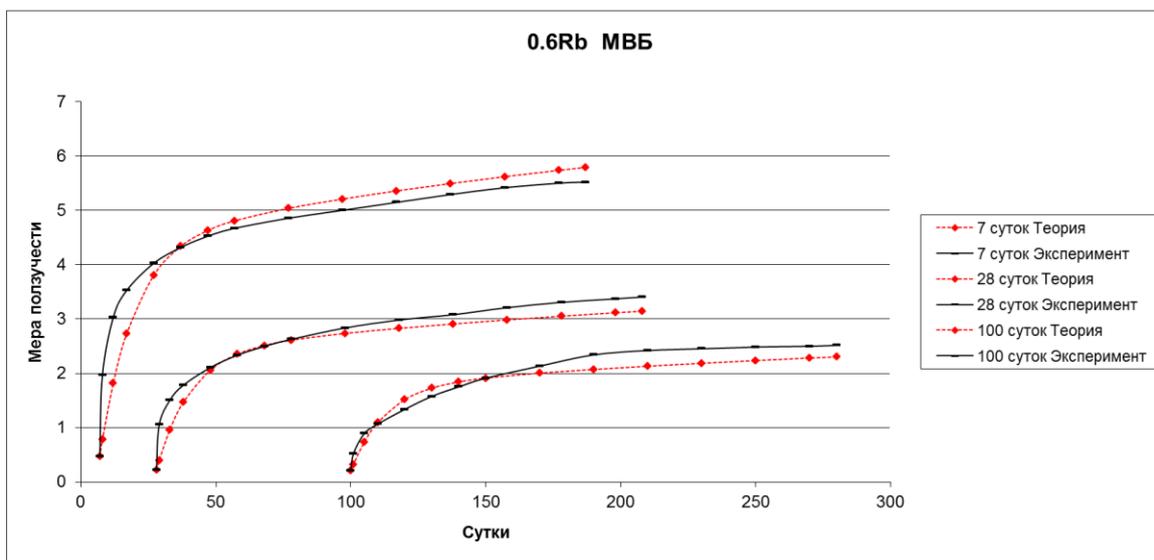


Рисунок 2 - Теоретические и экспериментальные зависимости мер ползучести МВБ при $\eta=0,6R_b$

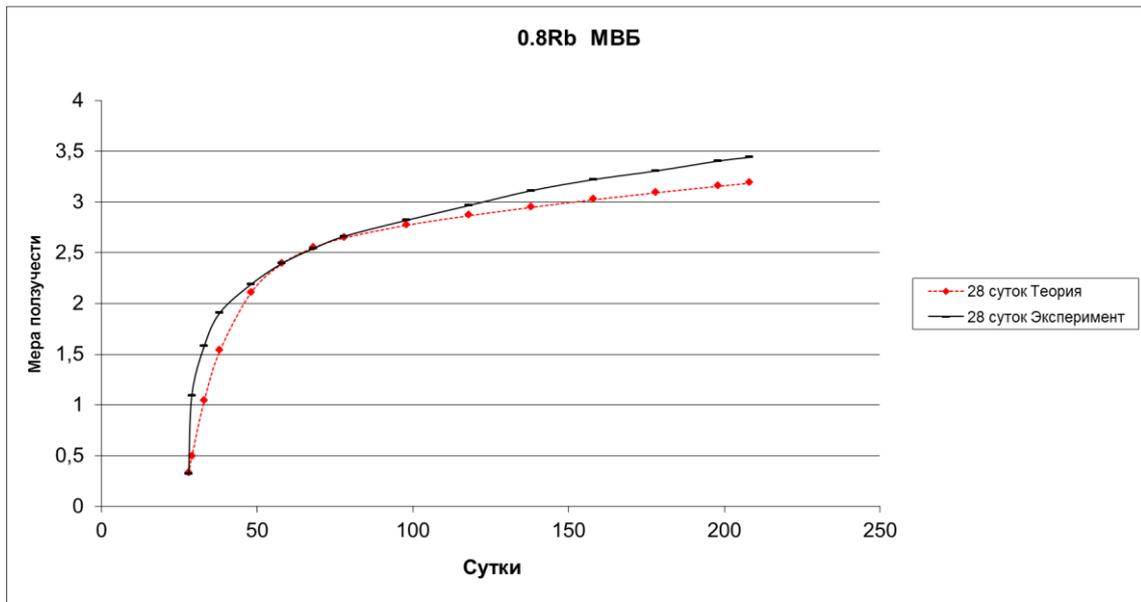


Рисунок 3 - Теоретические и экспериментальные зависимости мер ползучести МВБ при $\eta=0,8R_b$

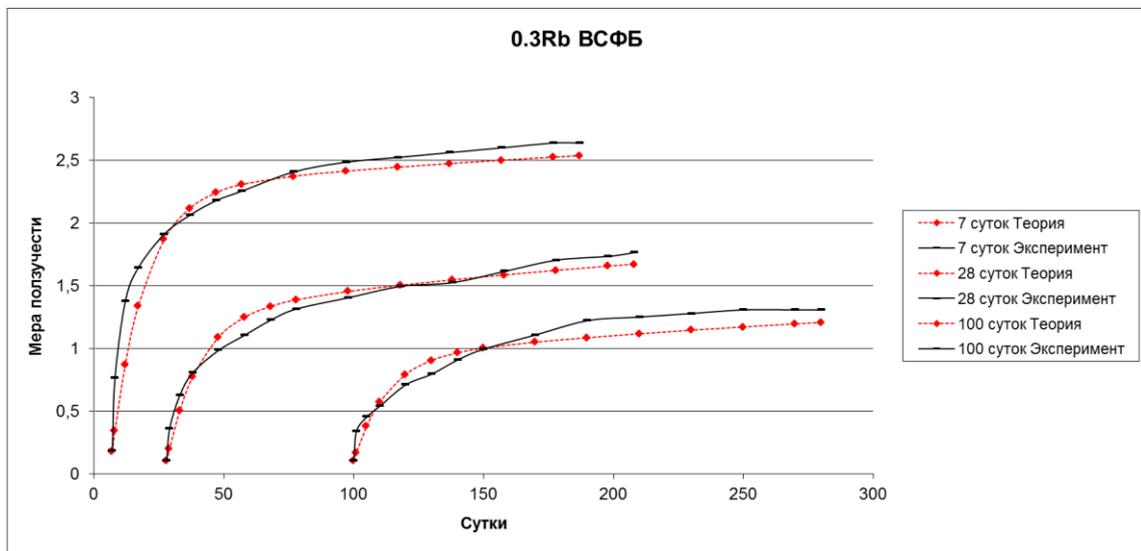


Рисунок 4 - Теоретические и экспериментальные зависимости мер ползучести ВСФБ при $\eta=0,3R_b$

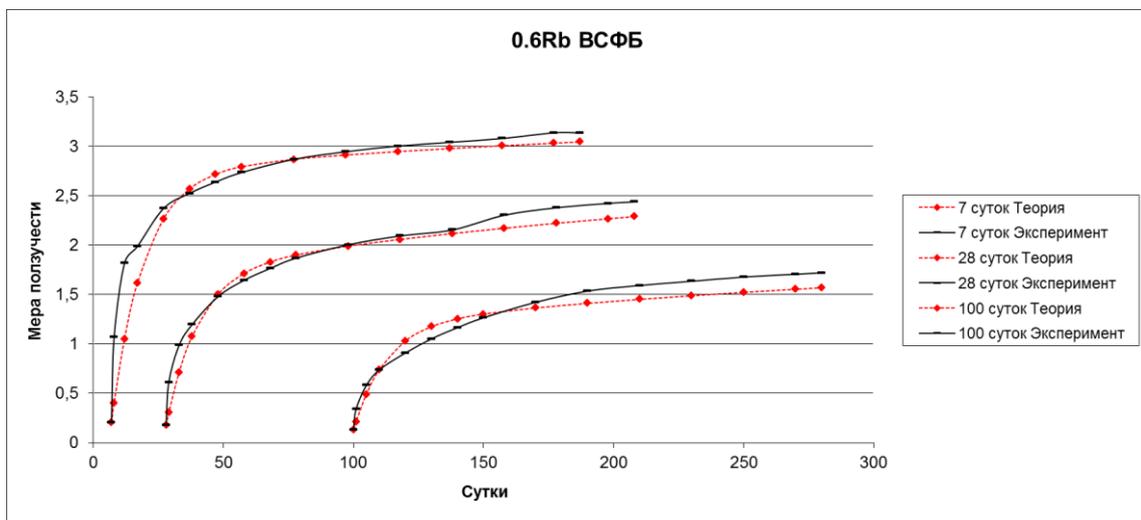


Рисунок 5 - Теоретические и экспериментальные зависимости мер ползучести ВСФБ при $\eta=0,6R_b$

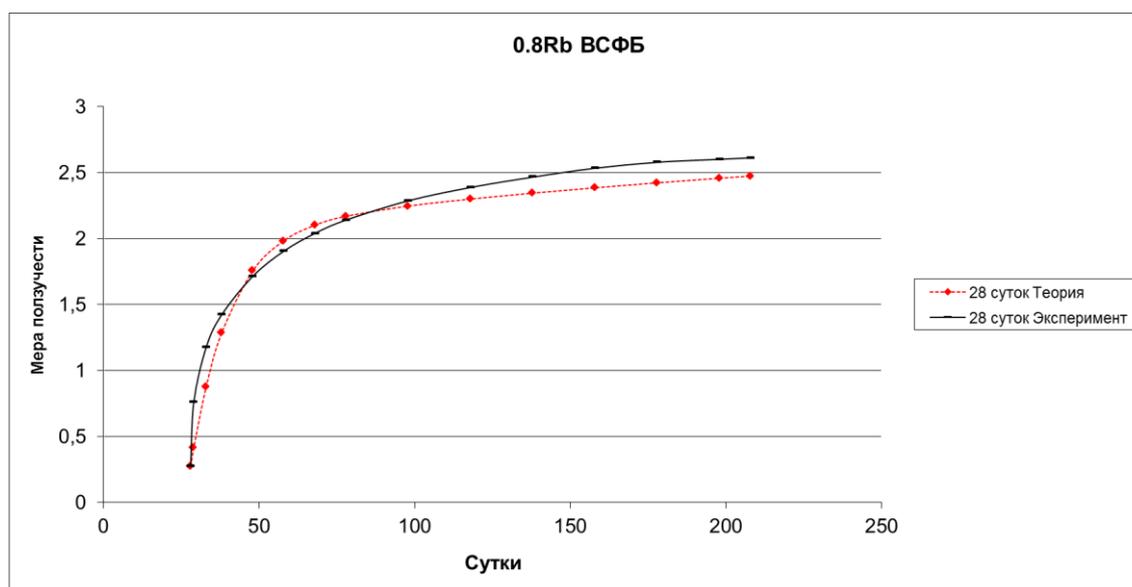


Рисунок 6 - Теоретические и экспериментальные зависимости мер ползучести ВСФБ при $\eta=0,8R_b$

Выводы

Анализируя кривые деформаций ползучести для МВБ и ВСФБ, нагруженных в возрасте 7, 28 и 100 суток, можно сделать ряд выводов:

- с ростом возраста бетона (как МВБ, так и ВСФБ) деформации ползучести сокращаются;
- деформации ползучести у ВСФБ значительно ниже, чем у МВБ при любом возрасте нагружения;
- выполнена корректировка формулы И.Е. Прокоповича и М.М. Заставы для описания линейной меры ползучести применительно к новому классу мелкозернистых высокопрочных бетонов и сталефибробетонов; дано развитие экспериментальной методики И.Е. Прокоповича и М.М. Заставы на случай определения нелинейных мер ползучести для нового класса МВБ и ВСФБ;
- предложенная зависимость для описания мер ползучести хорошо согласуется с данными экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н., Безгоднов И.М., Моисеенко Г.А., Степанов М.В., Чилин И.А. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонов из самоуплотняющихся смесей. Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году, том 2. Москва, 2018. С. 237-246.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны // М., ООО «Типография Парадиз». – 2010. – С. 258.
3. Прокопович И.Е., Застава М.М. О расчётном определении предельных длительных деформаций тяжёлого бетона. Бетон и железобетон, №5, 1972, стр. 35-37.
4. ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести.

Степанов М.В.
НИИСФ РААСН, г. Москва
мл. науч. сотр.
E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Моисеенко Г.А.
НИИСФ РААСН, г. Москва
мл. науч. сотр.
E-mail: gecklock@yandex.ru

STEPANOV M.V., MOISEENKO G.A.

**ELABORATION OF THE EXPERIMENTAL APPROACH
TO DETERMINATION OF MEASURE OF THE CREEP
OF FINE-GRAINED HIGH-STRENGTH CONCRETE
AND HIGH-STRENGTH STEEL FIBER CONCRETE
WITH A RATIONAL FIBER CONTENT**

The measures of the creep of high-strength steel fiber concrete and the matrix of fine-grained high-strength concrete have been determined for different ages of loading (7 days, 28 days and 100 days) on the basis of elaboration of the experimental method applied to various levels of load. The correction of the formula of Prokopovich I. E. and Zastava M. M. to describe the linear creep measure applied to a new class of fine-grained high-strength concrete and steel-fiber concrete; the development of the experimental method of Prokopovich I. E. and Zastava M. M. in the case of determining the nonlinear creep measures for a new class of MVB and VSFБ. The proposed dependence for the description of creep measures agrees well with the experimental data.

Keywords: *high-strength steel fiber concrete, fine-grained high-strength concrete, fiber, age of the concrete, deformation of the creep, measures of the creep.*

REFERENCES

1. Karpenko N.I., Kapriyelov S.S., Petrov A.N., Bezgodov I.M., Moiseyenko G.A., Stepanov M.V., Chilin I.A. Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh svoystv vysokoprochnykh stalefibrobetonov iz samouplotnyayushchikhsya smesey. Fundamental'nyye, poiskovyie i prikladnyye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2017 godu, tom 2. Moskva, 2018. S. 237-246.
2. Kapriyelov S.S., Sheynfel'd A.V., Kardumyan G.S. Novyye modifitsirovannyye betony // М., ООО «Типографiya Paradiz». – 2010. – S. 258.
3. Prokopovich I.Ye., Zastava M.M. O raschotnom opredelenii predel'nykh dlitel'nykh deformatsiy tya-zhelogo betona. Beton i zhelezobeton, №5, 1972, str. 35-37.
4. GOST 24544-81 Betony. Metody opredeleniya deformatsiy usadki i polzuchesti.

Stepanov M.V.
SRIBP RAACS, Moscow
Junior scientific staff
E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Moiseenko G.A.
SRIBP RAACS, Moscow
Junior scientific staff
E-mail: gecklock@yandex.ru

УДК 699.86

УМНЯКОВА Н.П., ПОТАПОВА Г.А., ПОТАПОВА Е.Д., СУЛТЫГОВА П.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КАЧЕСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Для повышения эффективности железобетонных конструкций и повышения прочностных характеристик в состав бетона вводят дискретные волокна (фибры) различного происхождения. При расчете железобетонных конструкций на огнестойкость необходимо знание теплофизических характеристик бетона. В статье представлены результаты по экспериментальному определению коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости образцов из сталефибробетона со стальной проволочной волнистой фиброй в зависимости от процента содержания фибры по объему 1.5; 3.0 и 6.0 %. Также проведены испытания образцов матрицы (содержание фибры 0 %). Предложена методика и формула по определению удельной теплоемкости образцов сталефибробетона с использованием контактных регистраторов температуры. Результаты исследований показали, что коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость сталефибробетона зависят от процентного содержания фибры и уменьшаются с ростом процента содержания фибры по объему.

Ключевые слова: *огнестойкость, сталефибробетон, фибра, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость*

Снизить массивность конструкций, сократить в значительной степени расход бетона и арматуры позволяют сверхпрочные бетоны. Однако, такие факторы, как повышенная хрупкость, которая приводит к взрывоопасному характеру разрушения (spalling concrete – разбрасывающийся бетон), относительно низкое увеличение прочности на растяжение по сравнению с прочностью на сжатие, препятствуют созданию сверхпрочных бетонов. Для устранения этих негативных факторов можно добавлять в состав бетона стальную фибру и получить высокопрочный сталефибробетон [1]. Для повышения эффективности железобетонных конструкций и их прочностных характеристик в состав бетона надовводить дискретные волокна (фибры) различного происхождения [2]. Дисперсное армирование бетонов позволяет повысить их трещиностойкость, ударостойкость, износостойкость, увеличить стойкость бетона к воздействию агрессивной среды, а также в ряде случаев отказаться от использования стержневой арматуры или уменьшить ее расход. В качестве микрофибры можно использовать стекловолокно, стальные, базальтовые или полимерные волокна. При изгибе прочность фибробетона может принимать значения от 30 до 35 МПа, а при сжатии от 80 до 100 МПа [3].

Для фибробетона присущи, по сравнению с неармированным бетоном, более высокие показатели прочности, выносливости, водонепроницаемости, огнестойкости. Указанные свойства способствуют применению фибробетона в конструкциях, которые эксплуатируются в тяжелых условиях, таких как защитные оболочки АЭС, высотные и сверхвысотные здания, мосты, тоннели, морские сооружения и т.д.

Оценка огнестойкости железобетонных изгибаемых элементов на основе фибробетонов разного состава проведена по их расчетным пределам огнестойкости в [6]. В качестве базовых были выбраны изгибаемые железобетонные элементы с разным процентом армирования стальной арматурой класса А400 на основе бетона класса В25 с гранитным заполнителем. Сечение элементов прямоугольное с размерами 300x700x650 мм. Для сравнения рассмотрены аналогичные элементы на основе такого же бетона, но с дисперсным армированием стальной и базальтовой фиброй. Результаты оценочных расчетов огнестойкости изгибаемых элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Несущая способность и предел огнестойкости изгибаемых железобетонных элементов с фиброармированием

Диаметр арматуры, мм		22	28	36	40
Суммарная площадь арматуры, A_s , $м^2$		0,00114	0,001847	0,003054	0,003768
Процент армирования, %		0,5	1,0	1,5	2,0
Несущая способность, M , $кН \cdot м$	Без фиброармирования	152	312	476	605
	Стальная фибра	219	395	542	676
	Базальтовая фибра	200	365	525	672
Предел огнестойкости, τ , мин.	Без фиброармирования	105	99	92	80
	Стальная фибра	95	94	91	83
	Базальтовая фибра	100	98	95	90

Из приведенной таблицы можно сделать вывод, что использование фибробетонов и армирование увеличивает несущую способность изгибаемого элемента и, причем особенно, при больших нагрузках.

Позитивно сказывается использование фибробетонов и на огнестойкости изгибаемого элемента. Этот эффект нагляднее проявляется при больших нагрузках.

Установлено, что бетон с базальтовой фиброй наименее чувствителен к нагреву. Бетон со стальной фиброй в работе [4] по чувствительности к нагреву сравним с обычным бетоном. Это можно объяснить тем, что за время прогрева стальной арматуры до критической температуры расчётная высота сжатой зоны фибробетона остается большей, чем у обычного бетона.

Расчеты [4,5] показали, что дисперсное армирование железобетонного изгибаемого элемента стальной или базальтовой фиброй (или в отдельных, наиболее напряженных элементах железобетонной фермы, стальной фиброй) увеличивает его несущую способность, повышает его предел огнестойкости, особенно при больших рабочих нагрузках и при увеличении процента армирования. Здесь преимуществом фибробетона является возможность его применения для значительного усиления ферм при увеличении рабочей нагрузки без изменения их внешнего вида и сечения элементов. Также установлено, что экономичность сталефибробетона повышается за счет снижения веса рабочей арматуры и при этом обеспечивается требуемым пределом огнестойкости благодаря повышению пределов огнестойкости ее отдельных элементов.



Рисунок 1 - Стальная проволочная волнистая фибра

В [6] изучено воздействие высоких температур при пожаре на изменение прочности при изгибе сталефибробетонов с высокопрочной цементно-песчаной матрицей при различных процентах армирования фиброй разной прочности, вида и диаметра. Установлено, что в диапазоне температур от 20 до 1100 С прочность на растяжение при изгибе зависит от всех перечисленных характеристик фибры.

Экспериментальная часть. В соответствии с СТО 36554501-006-2006 [7] при расчете железобетонных конструкций на огнестойкость необходимо знание теплофизических характеристик бетона. Теплофизические свойства сталефибробетона (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость) зависят от объемного содержания фибры и влажности материала [8]. Поэтому были проведены исследования с целью определения коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости сталефибробетона в зависимости от процентного содержания фибры. Нами были испытаны образцы из сталефибробетона со стальной проволочной

фибры. Нами были испытаны образцы из сталефибробетона со стальной проволочной

ной волнистой фиброй ФСПВ 0,3х15 (т.е. длина волокон фибры 15 мм, а диаметр 0.3 мм) (рис. 1). Были испытаны образцы сталефибробетона 250×250×30 ммс содержанием фибры по объему 1.5; 3.0 и 6.0 %, а также матрица (содержание фибры 0 %). Теплофизические характеристики образцов с содержанием фибры сравнивались с данными по матрице. Сталефибробетонные образцы изготавливались на цементно-песчаной матрице.

Определение коэффициента теплопроводности

При определении коэффициента теплопроводности сталефибробетона при стационарном тепловом режиме по стандартизированной методике по ГОСТ 7076 -99 [9] была использована установка ПИТ 2.1. Образцы фибробетона были перед испытанием высушены до постоянной массы.

Результаты исследований показали, что коэффициент теплопроводности λ сталефибробетона зависит от процентного содержания фибры и уменьшается с ростом процента содержания фибры по объему μ_{fv} (рис.2). Для данных результатов эту зависимость можно описать уравнением вида:

$$\lambda = -0,037\mu_{fv} + 1,006$$

Предполагаем, что на теплопроводность фибробетона влияют воздушные промежутки между матрицей и фиброй. Поэтому с увеличением процентного содержания фибры увеличивается количество воздушных промежутков и происходит уменьшение коэффициента теплопроводности сталефибробетона.

Определение удельной теплоемкости

Для определения теплоемкости образцов сталефибробетона была предложена следующая методика. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 7076 -99. Наряду с исследуемыми образцами фибробетона использовали эталонный образец с известной теплоемкостью - оптическое стекло. Размеры образцов и эталона были одного порядка. Электрический сушильный шкаф имел температуру прогрева 100°C. Данная методика предусматривает использование универсальной системы температурного мониторинга во времени.

В прогретый до заданной температуры (90°C) сушильный электрошкаф помещали на 4 часа, исследуемый образец и эталон, которые были снабжены запрограммированными контактными регистраторами температуры -термохронами. Затем они вынимались и охлаждались в одинаковых условиях до комнатной температуры. (20±2)°C. Считывая с помощью персонального компьютера информацию с регистраторов температуры, определяли время остывания для исследуемого образца и эталона. Термохроны позволяли регистрировать температуру прогрева образцов и эталона через определенные, заданные нами заранее промежутки времени (2-5мин.) и сохранять полученную информацию в собственной энергонезависимой памяти. Диапазон регистрируемых температур регистраторов температуры составлял от «-40°C» до «+85°C», поэтому был выбран электрошкаф с прогревом до 100°C.

Регистраторы температуры приклеивались к образцам в соответствии с ГОСТ 19783-74[10] с помощью кремнийорганической теплопроводной пасты, которая обеспечивала эффективный тепловой контакт между двумя соприкасающимися поверхностями, исследуемым образцом и регистратором температуры. Рабочая температура для такой пасты находится в интервале от «-40» до «+180»°C.

Для определения влияния наличия фибры, ее процентного содержания в образцах и для получения более полной картины прогрева образца, а также более достоверных значений теплоемкости, приклеивали на поверхность каждого образца по пять термохрон (в центре поверхности и по диагоналям). По ним определяли средние значения времени и температур нагрева и остывания образцов, которые использовались при определении значений теплоемкости (рис.3).

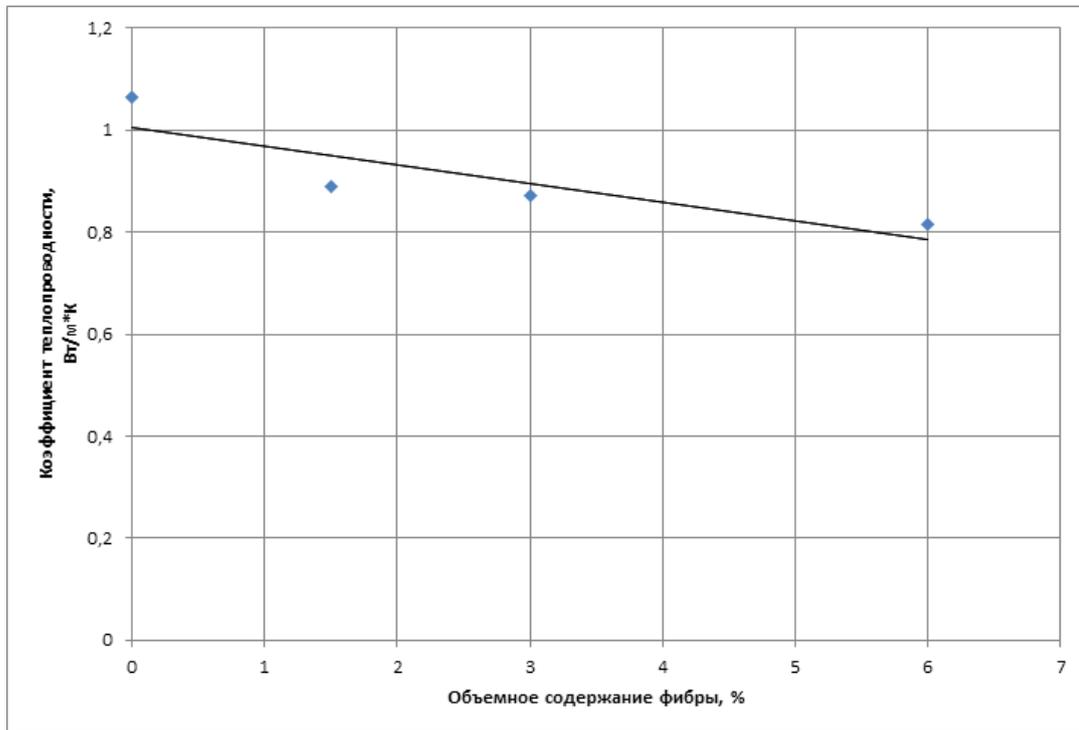


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента теплопроводности λ сталефибробетона от объемного содержания фибры μ_{fv}



Рисунок 3 - Образцы из фибробетона и оптического стекла с термохронами

Показания по изменению значений температуры в образцах и эталоне во времени расшифровывали с использованием программы на персональном компьютере.

Для вычисления теплоёмкости образцов предложена следующая формула:

$$C_{обр} = C_{эт} \frac{m_{эт} t_{обр}}{m_{обр} t_{эт}},$$

где $C_{эт}$ - коэффициент теплоёмкость эталона, Дж/(кг*К);

$m_{эт}$ - масса эталона, кг;

$m_{обр}$ - масса образца, кг;

$t_{обр}$ - время остывания образца, с;

$t_{эт}$ - время остывания эталона, с.

Результаты эксперимента показали, что удельная теплоемкость сталефибробетона зависит от процентного содержания фибры и уменьшается с ростом процента содержания фибры по объему μ_{fv} (рис.4). Для данных результатов эту зависимость можно описать уравнением вида:

$$C = -17,3\mu_{fv} + 958,2$$

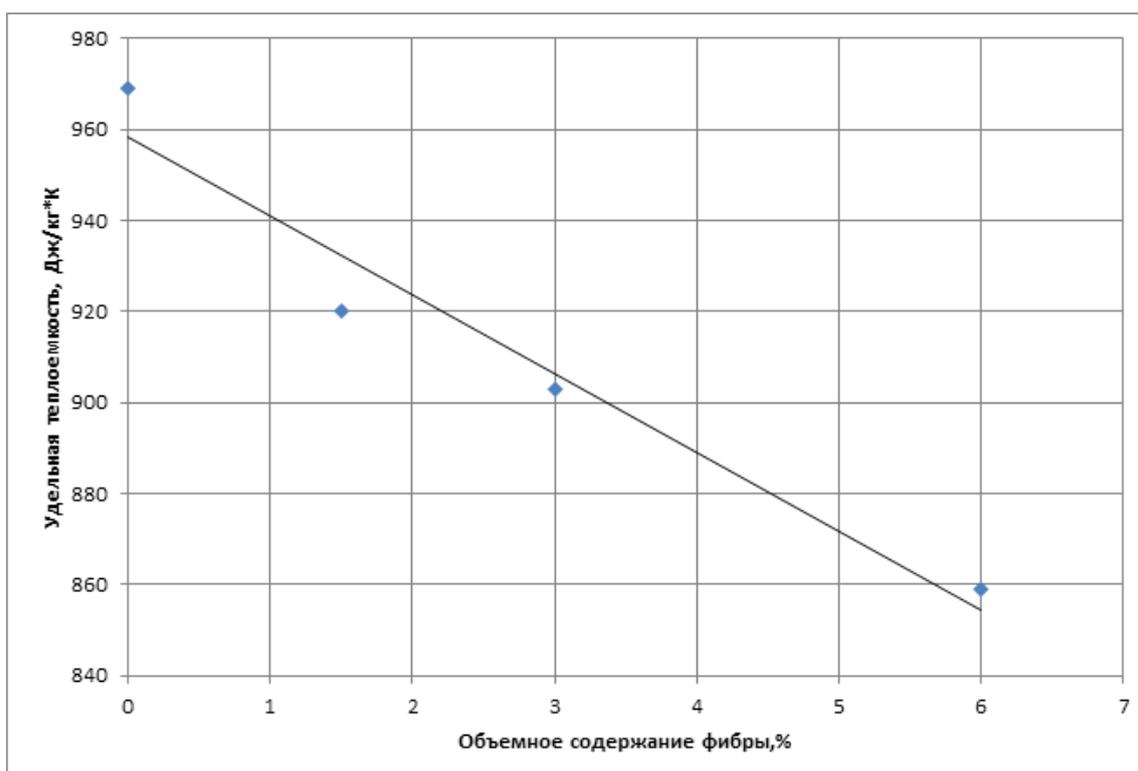


Рисунок 4 - Зависимость удельной теплоемкости Сталефибробетона от объемного содержания фибры μ_{fv}

Вывод. Установлено, что коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоемкость Сталефибробетона зависят от процентного содержания фибры и уменьшаются с ростом процента содержания фибры по объему μ_{fv} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н.И., ТравушВ.И., КаприеловС.С., Мишина А.В., Андрианов А.А., БезгодовИ.М. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона // Строительные науки. -2013. - №1.-С. 106-113.
2. Баженов Ю.М. Технология бетонов XXI века /Ю.М.Баженов// Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. - Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова.- 2005.-С.9-19.
3. ПухаренкоЮ.В. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства / Ю.В.Пухаренко// Промышленное и гражданское строительство. --2007. - №10.
4. Васильченко А.В.] Васильченко А.В. Оценка огнестойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных фиброматериалами /А.В.Васильченко// Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации чрезвычайных ситуаций, - 2014. -№1. - С.178-180.
5. Васильченко А.В., И.М.Хмыров] А.В. Васильченко, И.М. Хмыров Оценка огнестойкостижелезобетонной фермы при использованиифибробетона в ее отдельных элементах/А.В.Васильченко// «Проблемы пожарнойбезопасности», -2014. - Выпуск 36. -С. 58-62.
6. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., СултыговаП.С. Влияние характеристик стальной фибры и ее содержание в сталефибробетоне на его огнестойкость //Вестник гражданский инженеров СПбГАСУ. - 2017. - №5(64) - С.38-46
7. СТО36554501-006-2006 Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. - М.-2006-81с.
8. КоледаЕ.А., ЛеоновичС.Н., ЛатышА.В. Анализ физико-механических характеристик сталефибробетона//Материалы XXмеждународного научно-методического семинара. -Гродно. ГрГУим. Я.Купалы. - 2016.- С.248-253.

9. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.
10. ГОСТ 19783-74 Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия.

Умнякова Нина Павловна
НИИСФРААСН, г. Москва
Кандидат технических наук,
Заместитель директора по научной работе РААСН
E-mail: n.umniakova@mail.ru

Потапова Галина Алексеевна
НИИСФРААСН, г. Москва
Главный метролог НИИСФРААСН
E-mail: niisf322f@mail.ru

Потапова Евгения Дмитриевна
НИИСФРААСН, г. Москва
Инженер НИИСФРААСН
E-mail: niisf322f@mail.ru

Султыгова Пятимат Суламбековна
Ингушский государственный университет, г. Магас
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Общая физика»
E-mail: sultygova@yandex.ru

UMNYAKOVA N.P., POTAPOVA G.A., POTAPOVA E.D., SULTYGOVA P.S.

INVESTIGATION OF THERMAL PROTECTIVE QUALITY OF STEEL-FIBROBETON

To increase the efficiency of reinforced concrete structures and increase the strength characteristics, discrete fibers (fibers) of various origins are introduced into the concrete composition. When calculating reinforced concrete structures for fire resistance, it is necessary to know the thermal physical characteristics of concrete. The paper presents the results of the experimental determination of the thermal conductivity and specific heat of specimens made of steel fiber-reinforced concrete with steel wire wavy fiber, depending on the percentage of fiber content in volume 1.5; 3.0 and 6.0%. The samples of the matrix (fiber content 0%) were also tested.

A technique and a formula for determining the specific heat of steel-fiber-concrete samples using contact temperature recorders are proposed. The results of the research showed that the coefficient of thermal conductivity and the specific heat of steel fiber-reinforced concrete depend on the percentage of fiber and decrease with increasing percentage of fiber content by volume.

Keywords: *fire resistance, steel fiber-reinforced concrete, fiber, thermal conductivity, specific heat*

REFERENCES

1. Karpenko N.I., Travush V.I., Kapriyev S.S., Mishina A.V., Andrianov A.A., Bezgodov I.M. Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh svoystv vysokoprochnogo stalefibrobetona // Stroitel'nyye nauki. -2013. - №1.- S. 106-113.
2. Bazhenov YU.M. Tekhnologiya betonov XXI veka /YU.M.Bazhenov// Novyye nauchnyye napravleniya stroitel'nogo materialovedeniya: materialy dokladov Akademicheskikh chteniy RAASN. - Belgorod: Izd-vo BG TU im. V.G.Shukhova.- 2005.-S.9-19.
3. Pukharenko YU.V. Effektivnyye fibroarmirovannyye materialy i izdeliya dlya stroitel'stva / YU.V.Pukharenko// Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. --2007. - №10.
4. Vasil'chenko A.V.] Vasil'chenko A.V. Otsenka ognestoykosti izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh fibromaterialami /A.V.Vasil'chenko// Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy, - 2014. -№1. - S.178-180.
5. Vasil'chenko A.V., I.M.Khmyrov] A.V. Vasil'chenko, I.M. Khmyrov Otsenka ognestoykostizhelezobetonnoy fermy pri ispol'zovanii fibrobetona v yeye otdel'nykh elementakh/A.V.Vasil'chenko// «Problemy pozharnoy bezopasnosti», -2014. - Vypusk 36. -S. 58-62.
6. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. Ye., Sultygova P.S. Vliyaniye kharakteristik stal'noy fibry i yeye sodержaniye v stalefibrobetone na yego ognestoykost' //Vestnik grazhdanskiy inzhenerov SPbGASU. - 2017. - №5(64) - S.38-46

7. STO36554501-006-2006 Pravila po obespecheniyu ognestoykosti i ognesokhrannosti zhelezobetonnykh konstruksiy. - M.-2006-81s.
8. KoledaE.A., LeonovichS.N., LatyshA.V. Analiz fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik stalefibrobetona//Materialy XXmezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminar. -Grodno. GrGUim. YA.Kupaly. - 2016.- S.248-253.
9. GOST 7076-99 Materialy i izdeliya stroitel'nyye. Metod opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo so-protivleniya pri statsionarnom teplovom rezhime.
10. GOST 19783-74 Pasta kremniyorganicheskaya teploprovodnaya. Tekhnicheskiye usloviya.

Umnyakova Nina Pavlovna

SRIBP RAACS, Moscow
Candidate of Technical Sciences,
Deputy Director for Scientific Work of the RAACS
E-mail: n.umniakova@mail.ru

Potapova Galina Alekseevna

SRIBP RAACS, Moscow
Chief Metrologist SRIBP RAACS
E-mail: niisf322f@mail.ru

Potapova Evgenia Dmitrievna

SRIBP RAACS, Moscow
Engineer SRIBP RAACS
E-mail: niisf322f@mail.ru

Sulygova Pyatimat Sulambekovna

Ingush State University, Magas
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
the department "General Physics"
E-mail: sulygova@yandex.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 23.06.2018 г.
Дата выхода в свет 30.06.2018 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 7,1.
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.