

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Инженерно-строительный институт

Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства

на правах рукописи

**ФАМ ТХЭ ХИЕН**

**ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОМОДУЛЬНОГО  
БЕТОНА**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

по основным результатам научно- квалификационной работы (диссертации)

Направление подготовки 08.06.01 Техника и Технологии Строительства

---

*Код и наименование*

Специальность 05.23.01 Строительные Конструкции, Здания и Сооружения

---

*Код и наименование*

Санкт-Петербург

2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе промышленно-гражданского и дорожного строительства. Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ:

*Лазарев Юрий Георгиевич  
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

Научный руководитель:

*Барабаничиков Юрий Германович  
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

Рецензенты:

*Семенов Кирилл Владимирович  
К.т.н, доцент ВШПГиДС*

*Ватин Николай Иванович  
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

*Иванов Михаил Алексеевич  
К.т.н, доцент, зав. Каф.  
«Проектирование объектов  
использования атомной энергии»  
Санкт-Петербургский филиал  
АНО ДПО «Техническая академия  
Росатома»*

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** Бетон используется практически во всех строительных работах. Однако недостаток этого материала является его малой растяжимостью. При бетонировании монолитных конструкций важной проблемой является обеспечение способности бетона противостоять образованию трещин, вызываемых неравномерностью температурных и усадочных деформаций. Чем более высокие значения деформации растяжения до разрыва выдерживает бетон, тем выше трещиностойкость конструкции. Предельная растяжимость бетона складывается из трех видов предельных деформаций при растяжении: упругой  $R_{bt}/E_{bt}$  ( $R_{bt}$  и  $E_{bt}$  – соответственно, предел прочности и модуль упругости при растяжении), пластической  $\varepsilon_1$  и деформации ползучести  $\varepsilon_2$ . Для повышения трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций перспективным направлением является повышение предельной растяжимости бетона путём повышения ее главного слагаемого – отношение  $R_{bt}/E_{bt}$ . Этого можно достигнуть двумя путями: повышая прочность при постоянном модуле упругости или понижая модуль упругости при постоянной прочности. Способы повышения прочности бетона в достаточной мере разработаны. Влияние различных факторов на модуль упругости изучено в меньшей степени.

При анализе проблемы трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций выявлено тем, что одна из возможных важнейших факторов - недооценка влияния модуля упругости при растяжении бетона, и данные по такому направлению крайне ограничены. Кроме того, в расчетах усилий трещинообразования обычно принимают модуль упругости на растяжение равным модулю упругости на сжатие, что зачастую приводило к большим расхождениям между расчетными значениями и натурными данными. Величина предельной упругой деформации бетона  $R_{bt}/E_{bt}$  определяется по контрольным образцам является важной характеристикой для оценки трещиностойкости и исследования термонапряженного состояния бетонных и железобетонных конструкций.

Таким образом, проблема разработки состава и способа получения бетона с высокой предельной упругой деформацией и совершенствования бетонных и железобетонных конструкций, стойких к трещинообразованию является актуальной задачей, решение которой предполагается в настоящей работе.

**Степень разработанности темы исследования.** В работах по изучению трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций рассмотрены теоретические и практические исследования по бетону, которые прямо или косвенно могут быть использованы в трактовке трещиностойкости бетона и определяющих ее факторов. Решение проблемы

трещиностойкости вызвано тем, что трещиностойкость – комплексное свойство бетона. Большая часть исследований посвящена усадке и связи ее с трещинообразованием в цементном камне и растворе.

**Цель исследования:** Разработка конструктивных решений для повышения трещиностойкости железобетонных конструкций на основе применения бетона с высокой упругой предельной деформацией (низкомодульного бетона).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие

**Задачи исследования.**

1. Экспериментально исследовать влияние различных факторов на прочность и модуль упругости бетона при осевом сжатии и растяжении.

2. Сопоставить различные виды составов бетона и выбрать оптимальный вариант с высокой предельной упругой деформацией (низкомодульного бетона).

3. Выполнить расчеты термонапряженного состояния конструкций, изготовленных из традиционного бетона и из низкомодульного бетона при условиях максимально приближенных к реальным. Произвести сравнительные анализы.

4. Разработать рекомендации по применению бетона с высокой предельной упругой деформацией (низкомодульного бетона) в строительных конструкциях.

**Объект исследования.** Тонкостенные железобетонные элементы конструкций из бетона с высокой упругой предельной деформацией (или низкомодульного бетона), подвергающие температурным воздействиям.

**Предмет исследования.** Термонапряженное состояние конструкции с применением низкомодульного бетона.

**Научная новизна диссертационной работы:**

1. Экспериментальные данные о влиянии различных факторов на значение соотношения прочности к модулю упругости ( $R/E$ ) бетона при кратковременном нагружении.

2. Экспериментально установлена корреляционная связь между прочностью и модулем упругости для исследованных бетонов.

3. Предложено конструктивное решение вопроса повышения термической трещиностойкости бетона.

4. Разработаны рекомендации по повышению термической трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в данной работе были использованы методы физико-математического моделирования и расчета, стандартные методы механических испытаний материалов, расчетный метод оценки трещиностойкости строительных конструкций.

**Теоретическая значимость диссертационной работы.** Получены новые результаты экспериментальных исследований низко модульных бетонов для применения в тонкостенных конструкциях.

**Практическая значимость диссертационной работы.** Предложен способ повышения трещиностойкости строительных конструкций. Разработаны соответствующие рекомендации.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований по влиянию на прочность и модуль упругости состава бетона, вида заполнителя, органических и минеральных добавок.
2. Результаты расчётных исследований, направленных на создание трещиностойких конструкций с применением низко модульного бетона.
3. Конструктивное решение по обеспечению трещиностойкости тонкостенных конструкций.

**Достоверность и апробация результатов работы**

Основные теоретические положения и численные результаты диссертационной работы подтверждены апробацией на следующих конференциях и семинарах:

1. XLVIII Конференции «Неделя науки СПбПУ» с 18–23 ноября 2019 г.;
2. Международной конференции «Устойчивые энергетические системы: инновационные перспективы - SES 2020». Санкт–Петербург 19–20 ноября 2020 г.;

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации отражены в 3 научных работах, в том числе 1 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК и 1 статья в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** к диссертации изложены актуальность работы, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, представлена информация об апробации работы и публикациях.

**В первой главе** представлен краткий анализ существующих работ, посвященных исследованию по деформативности и трещиностойкости бетона и определяющих ее факторов. Анализировались работы, в которых приводятся сведения о современных проблемах трещинообразования в строительных конструкциях. К таким исследованиям относятся работы по микротрещинообразованию в цементном камне и бетоне. А также прямые измерения усадки бетона, модуля упругости, прочности на сжатие и растяжение и деформативности бетона (работы Васильева П.И., Стольников В.В., Байкова В.М., Ваганова А.И., Бондаренко В.М., Белова В.В. Саталкина А.В. Шейкина А.Е.). Как показали исследования, основное значение в этом

отношении имеет деформативная способность бетона, связанная с механизмом образования трещин.

Рассмотрены также существующие работы в области разномодульности бетона, т.е. отличие между модулями упругости бетона при растяжении и сжатии (работы Карапетян К.С., Neville A.M. and Brooks J.J., Isamu Yoshitake). При расчете трещиностойкости железобетонных конструкций обычно принимают, что эти значения равны, но по данным исследователей они существенно отличаются. Коэффициент разномодульности  $k = E_{bt}/E_b$  для разных видов бетона зависит от большого количества факторов и изменяется в довольно широких пределах, обычно для тяжелого бетона этот коэффициент в среднем равен 1,2, что соответствует полученным экспериментальным данным и свидетельствует о необходимости учитывать это неравенство при расчете усилий трещинообразований железобетонных конструкций.

В зависимости от конструктивных особенностей и условий эксплуатации зданий и сооружений факторы, вызывающие нарушение монолитности и появление видимых трещин в бетоне различны, а их действие проявляется с различной интенсивностью. Во всех случаях наряду с прочностными характеристиками одним из важнейших свойств, определяющих трещиностойкость бетона, является его способность деформироваться без существенных нарушений монолитности под действием различных факторов. Величина предельной деформации бетона (растяжимость) определяется на образцах в лабораторных условиях и является важной характеристикой при проектировании состава бетона и расчетов термонапряженного состояния конструкций (работы Бергена Р.И., Панарина Н.Я., Neville A.M. Филиппа А.П.). В массивных бетонных конструкциях опасность представляют внутренние температурные перепады, при которых расширение ядра сдерживается холодным внешним слоем. Последний слой подвергается растрескиванию, если вынужденные деформации растяжения превышают предельную растяжимость бетона. А в тонких и протяженных железобетонных конструкциях (стенах), возводимых на затвердевшем бетонном основании при твердении, наблюдается образование сквозных вертикальных трещин, начинающихся в зоне контакта с основанием и распространяющихся вверх, не редко на всю высоту стены. Опасность представляет, главным образом, процесс остывания стены, когда температурная деформация и усадка действуют в одном направлении и вызывают растягивающие напряжения (работы Семенова К.В., Зимица С.С., Ямковы Е.В.).

**Во второй главе** представлены характеристики используемых материалов, характеристики опытных образцов, изложены методики проведения экспериментальных и теоретических исследования, методы обработки полученных результатов.

*Характеристика исходных материалов:* Используются портландцемент Цемент I 42.5 Н, цемент общестроительного назначения, нормального твердения по ГОСТ 31108-2016

производства ОАО Heidelbergcement «сланцевский цементный завод – Цесла»; Минеральные добавки: Микрокремнезем конденсированный МКУ-85 по ТУ 5743-048-02495332-96, Производитель ОСП «Юргинский ферросплавный завод», шлак доменный гранулированный молотый, производства ООО «Мечел-материалы»; песок для строительных работ по ГОСТ 8736-2014 намывный высший сорт карьера «Сестринский» с модулем крупности 2,5; щебень гранитный фракции 5 – 10 и 5 – 20 мм марки по прочности не менее 1200 по ГОСТ 8267-93 ЗАО «ЛСР-Базовые материалы Северо-Запад»; керамзитовый гравий, фракций 0 – 20 мм, изготовитель ООО «СУОР» (г. Новочебоксарск) марка по насыпной плотности М900, марка по прочности П250; наноцеллюлозе-добавка Pro-Flowstab, производитель ООО «Bang & Bonsomer»; суперпластификатор: МС – Технифлоу 178 Винтер производитель «МС - Баухеми» по ТУ 20.59.57–024-51552155-2018, Sika ViscoCrete 571 и Sika ViscoCrete E78; в качестве воздухововлекающей добавки использованы Sika AER 200 – C RC/A и SikaControl – 95 Aer производитель ООО «Зика» по ТУ 20.59.59–036-13613997-2019.

*Образцы:* Экспериментальные исследования проводились на образцах, изготовленных из мелкозернистого, тяжелого и низко модульного бетона на основе керамзитового гравия. Было испытано более 60 составов тяжелого бетона, более 25 составов керамзитобетона. Расход цемента в указанных бетонах варьировался от 260 до 475 кг/м<sup>3</sup>, Водоцементное отношение от 0,35 до 0,66.

*Методика экспериментальных исследований:* Экспериментальные исследования проводились в аккредитованной в системе Росаккредитации научно-испытательной лаборатории «Политех-СКИМ-Тест» Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, Россия.

Бетонные образцы выдерживались в формах в течение одних суток, после чего производили их распалубку, маркировали и подвергали контрольному обмеру. Хранение и испытание образцов в возрасте 7 и 28 суток производилось согласно ГОСТ 10180–2012.

Программа определения характеристик бетона включала три группы экспериментов:

- Определение физико-механических характеристик (предела прочности, модуля упругости) бетона при кратковременном осевом сжатии, растяжении и изгибе: (рис. 1);
- Определение усадочных деформаций и экзотермии бетона (рис. 2);
- Определение водонепроницаемости и морозостойкости (рис. 3).



а) При сжатии

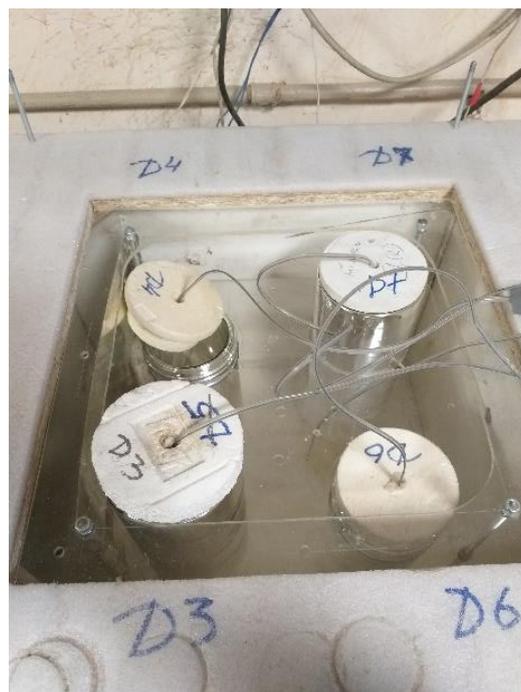


б) При растяжении

Рис .1. Схема устройства для определения модуля упругости бетона



а) Определение усадки



б) Определение экзотермии

Рис .2. Схема устройства для определения температурно-усадочной деформации и экзотермии бетона

Прочность и модуль упругости на осевое сжатие и растяжение определялись на образцах кубах с размерами 70x70x70 мм, на образцах цилиндрах с размерами 100x200 мм и на образцах призмах 70x70x280 мм согласно ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 24452-80. Усадочные деформации бетона исследовались на образцах-призмах размерами 40x40x160 мм согласно ГОСТ 24544-2020.

Исследование по экзотермии бетона проводилось на образцах-цилиндрах размерами 50x100 мм полуадиабатическим методом.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на свойства бетонов с целью разработки метода повышения отношения прочности бетона к модулю упругости. Приведены результаты испытаний усадочной деформаций, тепловыделения, характеристик прочности и деформативности при осевом сжатии и растяжении.

Были испытаны ряд составов бетона, модифицированных органическими и минеральными добавками, такими как наноцеллюлоза (добавка Pro-Flowstab), стабилизатор Centrament Stabi M15, MC-Adhesive, метакаолин и микрокремнезем. Установлено, что указанные добавки оказывают незначительное влияние на деформационные свойства по сравнению с контрольными образцами, не содержащими добавок. Установлено, что при использовании указанных добавок модуль деформации в основном линейно коррелирует с прочностью.

**Прочность при сжатии, растяжении.** Выполнены экспериментальные исследования по влиянию указанных добавок на прочностные свойства бетонных образцов кубов и призм. Результаты испытаний представлены на рис. 3 и рис. 4.

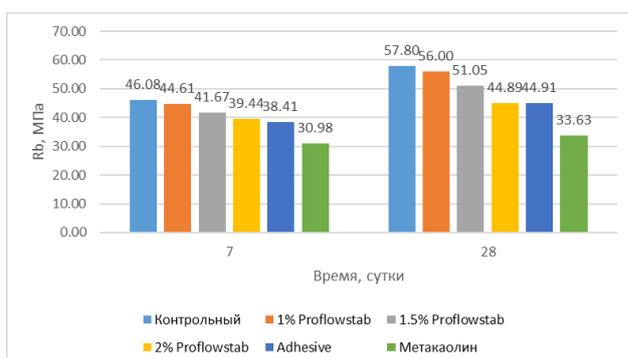


Рис. 3. Предел прочности при сжатии в зависимости от видов добавок.

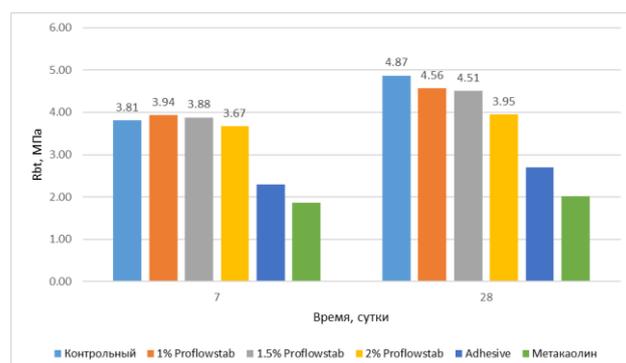


Рис. 4. Предел прочности при растяжении в зависимости от видов добавок.

**Модуль упругости при растяжении, предельная упругая деформация.** Результаты испытаний представлены на рис. 5 и рис. 6.

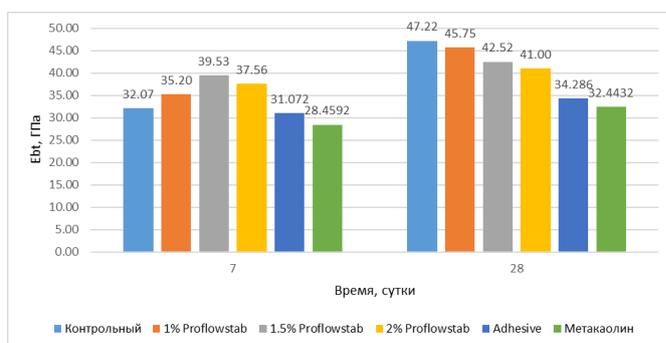


Рис. 5. Модуль упругости при растяжении в зависимости от видов добавок.

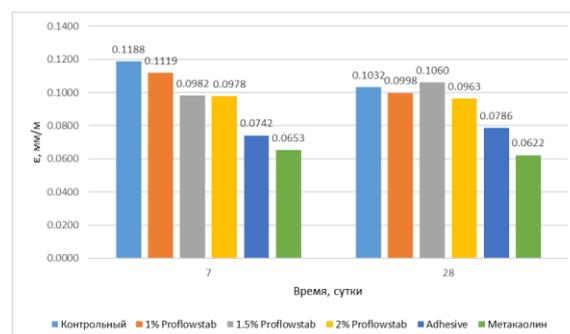


Рис. 6. Значение соотношения R/E в зависимости от видов добавок.

На основании результатов экспериментальных исследований, установлено, что значительное влияние на модуль деформации оказывает вид и свойства использованных заполнителей, среди которых наибольшее значение отношения прочности к модулю упругости получено в случае керамзитобетона. Чем меньше модуль деформации зерен, тем ниже модуль деформации бетона. В связи с этим, были исследовали два вида бетона, приготовленных из одних и тех же материалов, отличающихся видом крупного заполнителя. В случае обычного бетона применяли гранитный щебень, в другом – керамзитовый гравий.

Варьируемые факторы и пределы варьирования для обычного бетона: Расход цемента  $C = 260-470 \text{ кг/м}^3$ ; водоцементное отношение  $W/C = 0,35-0,66$ ; доля песка от массы заполнителей  $g = 0,420-0,564$ ; содержание шлака  $Sl = 0-52,8 \%$  от массы цемента; содержание микрокремнезема  $MS = 0-15,6 \%$  от массы цемента; Содержание добавки суперпластификатора  $SP = 0-2,14 \%$  от массы цемента не включалось в факторы варьирования, так как существует корреляционная связь с  $W/C$ .

Варьируемые факторы и пределы варьирования керамзитобетона: Расход цемента  $C = 430-550 \text{ кг/м}^3$ ; водоцементное отношение  $W/C = 0,31-0,51$ ; объемная доля керамзитового гравия  $E_x = 0,13-0,67$ ; содержание шлака  $Sl = 0-22,7 \%$  от массы цемента; содержание микрокремнезема  $MS = 8,6-10,4 \%$  от массы цемента; содержание воздухововлекающей добавки  $AER = 0-0,35 \%$  от массы цемента. Содержание добавки суперпластификатора  $SP = 1,05-1,46 \%$  от массы цемента не включалось в факторы варьирования, так как существует корреляционная связь с  $W/C$ .

Влияние независимых параметров состава на прочность ( $R_{28}$ ), модуль упругости ( $E_{28}$ ) и отношение предела прочности к модулю упругости ( $R_{28}/E_{28}$ ) бетона и керамзитобетона определяли многофакторным анализом на основе линейной регрессии с помощью программного пакета Excel. Результаты статистической обработки данных приведены соответственно в табл. 1. И табл. 2.

Таблица 1 – Показатели правомерности линейной гипотезы многофакторной регрессии для зависимости прочности, модуля упругости и отношения ( $R_{28}/E_{28}$ ) от расхода компонентов бетонной смеси

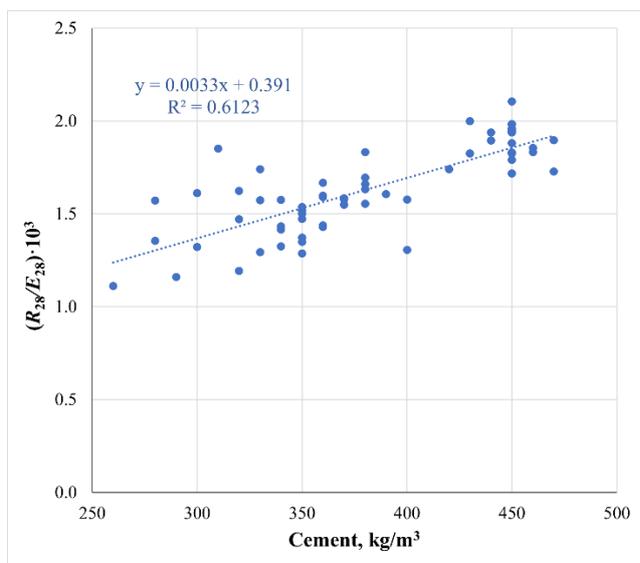
| Свойство                    | $R^2$  | F-статистика | Значимость F | Факторы | Коэффициенты | Стандартная ошибка | t-статистика | P-значение |
|-----------------------------|--------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------------|--------------|------------|
| Прочность ( $R_{28}$ ), МПа | 0,9067 | 106,9        | 4,77E-27     | $C$     | 0,075        | 0,032              | 2,31         | 2,46E-02   |
|                             |        |              |              | $W/C$   | -100,8       | 18,56              | -5,43        | 1,30E-06   |
|                             |        |              |              | $r$     | 35,16        | 15,75              | 2,23         | 0,030      |
|                             |        |              |              | $Sl$    | -0,048       | 0,044              | -1,08        | 0,283      |

|   |        |      |          |            |        |       |       |          |
|---|--------|------|----------|------------|--------|-------|-------|----------|
|   |        |      |          | <i>MS</i>  | 0,242  | 0,176 | 1,38  | 0,175    |
| Модуль упругости ( $E_{28}$ ), ГПа            | 0,8163 | 48,9 | 5,04E-19 | <i>C</i>   | -0,017 | 0,016 | -1,06 | 0,294    |
|   |        |      |          | <i>W/C</i> | -58,7  | 8,98  | -6,54 | 2,12E-08 |
|   |        |      |          | <i>r</i>   | -25,2  | 7,62  | -3,31 | 0,002    |
|   |        |      |          | <i>SI</i>  | 0,028  | 0,021 | 1,30  | 0,198    |
|   |        |      |          | <i>MS</i>  | 0,056  | 0,085 | 0,654 | 0,516    |
| Отношение ( $R_{28}/E_{28}$ )·10 <sup>3</sup> | 0,7585 | 34,6 | 8,31E-16 | <i>C</i>   | 0,006  | 0,001 | 4,56  | 2,88E-05 |
|   |        |      |          | <i>W/C</i> | 0,001  | 0,002 | 0,654 | 0,516    |
|   |        |      |          | <i>r</i>   | 0,003  | 0,001 | 2,48  | 0,016    |
|   |        |      |          | <i>SI</i>  | 0,002  | 0,001 | 1,76  | 0,084    |
|   |        |      |          | <i>MS</i>  | 0,002  | 0,002 | 1,51  | 0,136    |

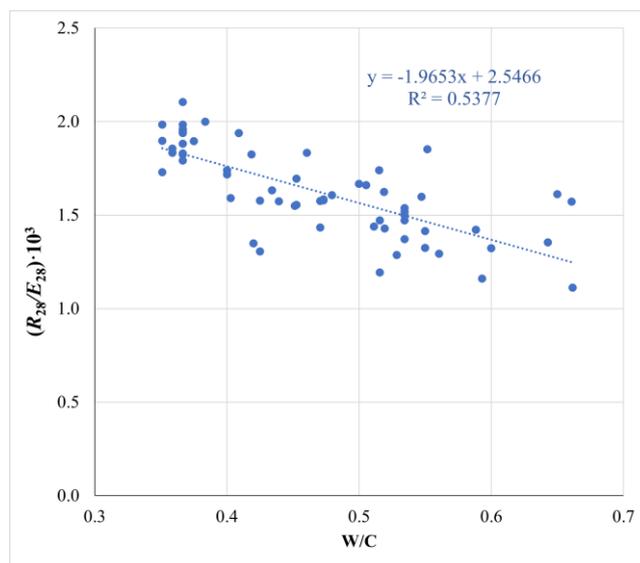
Таблица 2 – Показатели правомерности линейной гипотезы многофакторной регрессии для зависимости прочности, модуля упругости и отношения ( $R_{28}/E_{28}$ ) от расхода компонентов в керамзитобетонной смеси

| Свойство                                      | $R^2$  | F-статистика | Значимость F | Факторы    | Коэффициенты | Стандартная ошибка | t-статистика | P-значение |
|---|--------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------------|--------------|------------|
| Прочность ( $R_{28}$ ), МПа                   | 0,8822 | 22,5         | 1,93E-07     | <i>C</i>   | 0,07         | 0,02               | 4,51         | 0,0003     |
|   |        |              |              | <i>W/C</i> | -33,47       | 9,44               | -3,54        | 0,0023     |
|   |        |              |              | <i>Ex</i>  | -11,91       | 2,58               | -4,61        | 0,0002     |
|   |        |              |              | <i>SI</i>  | -0,09        | 0,07               | -1,18        | 0,255      |
|   |        |              |              | <i>MS</i>  | 0,41         | 1,21               | 0,34         | 0,741      |
|   |        |              |              | <i>AER</i> | -1,12        | 4,25               | -0,26        | 0,796      |
| Модуль упругости ( $E_{28}$ ), ГПа            | 0,7537 | 9,18         | 1,11E-04     | <i>C</i>   | 0,042        | 0,012              | 3,53         | 0,002      |
|   |        |              |              | <i>W/C</i> | -7,05        | 7,06               | -0,999       | 0,331      |
|   |        |              |              | <i>Ex</i>  | -5,93        | 1,93               | -3,07        | 0,007      |
|   |        |              |              | <i>SI</i>  | -0,094       | 0,055              | -1,71        | 0,104      |
|   |        |              |              | <i>MS</i>  | 1,84         | 0,907              | 2,03         | 0,057      |
|   |        |              |              | <i>AER</i> | -4,44        | 3,18               | -1,40        | 0,180      |
| Отношение ( $R_{28}/E_{28}$ )·10 <sup>3</sup> | 0,5146 | 3,18         | 2,63E-02     | <i>C</i>   | -0,0007      | 0,001              | -0,721       | 0,480      |
|   |        |              |              | <i>W/C</i> | -1,08        | 0,543              | -1,99        | 0,062      |
|   |        |              |              | <i>Ex</i>  | -0,038       | 0,149              | -0,253       | 0,803      |
|   |        |              |              | <i>SI</i>  | 0,006        | 0,004              | 1,30         | 0,210      |
|   |        |              |              | <i>MS</i>  | -0,190       | 0,070              | -2,72        | 0,014      |
|   |        |              |              | <i>AER</i> | 0,388        | 0,245              | 1,59         | 0,130      |

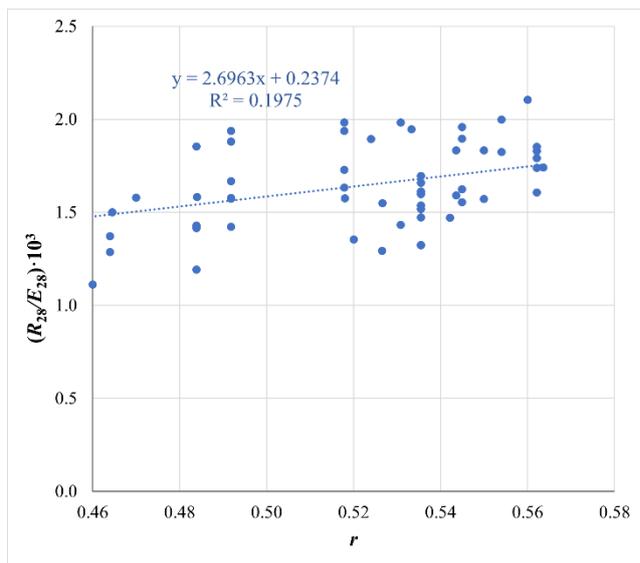
Графики парных регрессий для зависимости отношения  $R_{28}/E_{28}$  бетона и керамзитобетона от значимых факторов приведены соответственно на рис. 7 и рис. 8



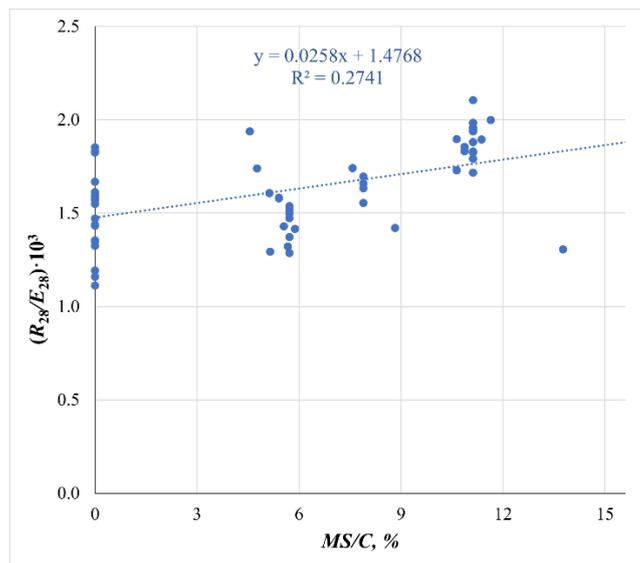
(a)



(б)

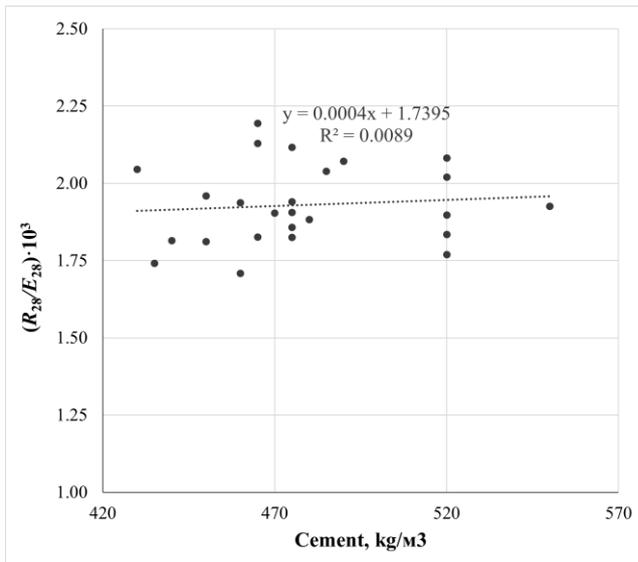


(в)

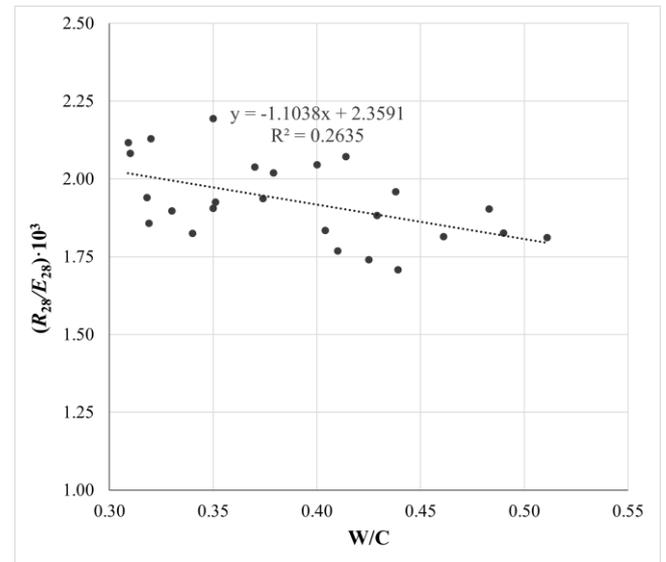


(г)

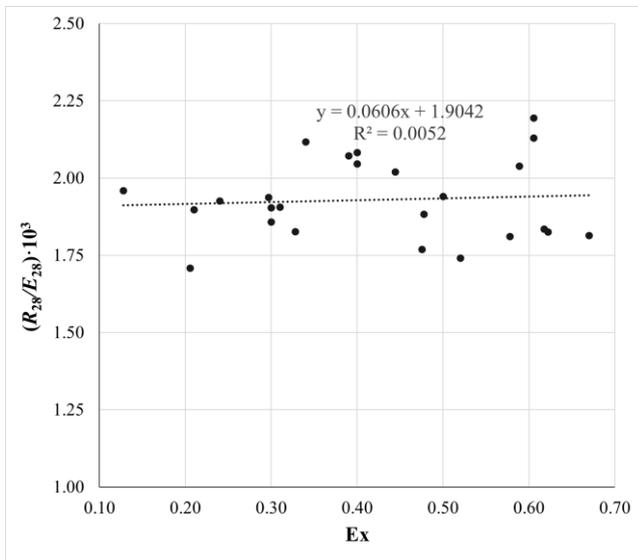
Рис. 7. Графики парных регрессий для зависимостей соотношения  $R_{28}/E_{28}$  бетона от (а) расхода цемента, (б) водоцементного отношения, (в) доли песка, (г) содержания микрокремнезема от массы цемента.



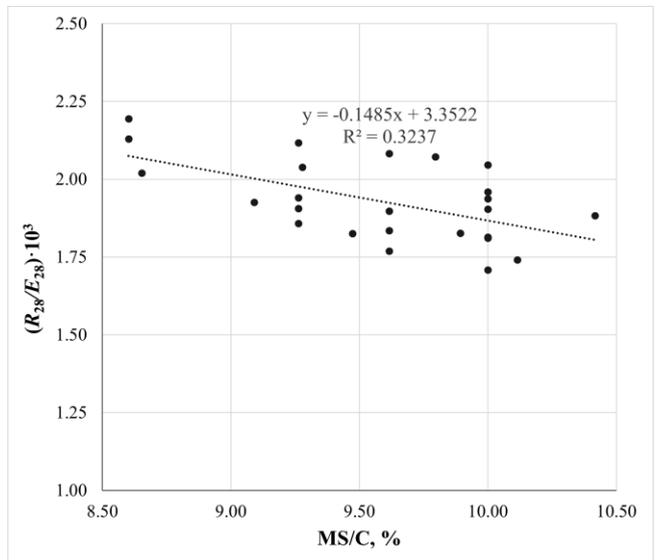
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 8. Графики парных регрессий для зависимостей соотношения  $R_{28}/E_{28}$  керамзитобетона от (а) расхода цемента, (б) водоцементного отношения, (в) объемной доли керамзитового гравия, (г) содержания микрокремнезема от массы цемента.

Для анализа результатов статистической обработки данных исследований для бетона и керамзитобетона в табл. 3 и табл. 4 соответственно приведены значения коэффициентов уравнений регрессии, а также частных коэффициентов эластичности  $\varepsilon_i$ , вычисляемых по формуле:

$$\varepsilon_i = b_i \cdot \bar{x}_i / \bar{y}_i$$

где  $b_i$  – коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии;

$\bar{x}_i$  – среднее значение данного фактора;

$\bar{y}_i$  – среднее значение функции отклика.

Таб. 3. Степень влияния факторов на свойства бетона

| Функция отклика | Коэффициенты            | Факторы  |            |          |           |           |
|-----------------|-------------------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|
|                 |                         | <i>C</i> | <i>W/C</i> | <i>r</i> | <i>Sl</i> | <i>MS</i> |
|                 |                         | X1       | X2         | X3       | X4        | X5        |
| $R_{28}$        | Множественной регрессии | 0,075    | -100,8     | 35,16    | -0,048    | 0,242     |
|                 | Парной регрессии        | 0,236    | -154,1     | 73,5     | -0,06     | 1,9       |
|                 | Эластичности            | 0,452    | -0,759     | 0,290    | -0,017    | 0,022     |
| $E_{28}$        | Множественной регрессии | -0,017   | -58,7      | -25,2    | 0,028     | 0,056     |
|                 | Парной регрессии        | 0,069    | -49,6      | -16,300  | 0,052     | 0,542     |
|                 | Эластичности            | -0,164   | -0,724     | -0,341   | 0,016     | 0,008     |
| $R_{28}/E_{28}$ | Множественной регрессии | 0,0063   | 0,0012     | 0,0028   | 0,0021    | 0,0024    |
|                 | Парной регрессии        | 0,003    | -1,97      | 2,70     | -0,003    | 0,026     |
|                 | Эластичности            | 1,470    | 0,0004     | 0,001    | 0,029     | 0,008     |

Таб. 4 Степень влияния факторов на свойства керамзитобетона

| Функция отклика   | Коэффициенты            | Факторы  |            |           |           |           |            |
|-------------------|-------------------------|----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|                   |                         | <i>C</i> | <i>W/C</i> | <i>Ex</i> | <i>Sl</i> | <i>MS</i> | <i>AER</i> |
|                   |                         | X1       | X2         | X3        | X4        | X5        | X6         |
| $R_{28}'$         | Множественной регрессии | 0,071    | -33,47     | -11,91    | -0,087    | 0,41      | -1,12      |
|                   | Парной регрессии        | 0,106    | -53,6      | -13,5     | -0,214    | -4,22     | -21,9      |
|                   | Эластичности            | 0,954    | -0,366     | -0,141    | -0,026    | 0,110     | -0,0049    |
| $E_{28}'$         | Множественной регрессии | 0,042    | -7,05      | -5,93     | -0,094    | 1,84      | -4,44      |
|                   | Парной регрессии        | 0,0512   | -17,9      | -7,60     | -0,068    | -0,894    | -10,4      |
|                   | Эластичности            | 1,08     | -0,149     | -0,136    | -0,055    | 0,956     | -0,037     |
| $R_{28}'/E_{28}'$ | Множественной регрессии | -0,00065 | -1,08      | -0,038    | 0,0055    | -0,190    | 0,388      |
|                   | Парной регрессии        | 0,0004   | -1,10      | 0,061     | -0,0050   | -0,149    | -0,132     |
|                   | Эластичности            | -0,162   | -0,218     | -0,0082   | 0,031     | -0,941    | 0,031      |

Сравнение трех коэффициентов при каждом факторе, приведенных в табл. 3 и табл. 4 установлено, что для бетона по убыванию степени влияния факторы можно расположить следующим образом: по влиянию на прочность – *W/C*, *C*, *r*, *MS*, *Sl*; на модуль упругости – *W/C*, *r*, *C*, *Sl*, *MS*; на отношение  $R_{28}/E_{28}$  – *C*, *Sl*, *MS*, *r*, *W/C*. И соответственно для керамзитобетона: на прочность – *C*, *W/C*, *Ex*, *MS*, *Sl*, *AER*; на модуль упругости – *C*, *MS*, *W/C*, *Ex*, *Sl*, *AER*; на отношение  $R_{28}'/E_{28}'$  – *MS*, *W/C*, *C*, *Ex*, *Sl*, *AER*.

Степень влияния факторов удобно оценивать по значению частного коэффициента эластичности, который показывает, на сколько процентов в среднем изменяется функция отклика при изменении среднего значения данного фактора на 1 %. Например, в табл. 5 и табл. 6

приведены приращения функций  $R_{28}$ ,  $E_{28}$  и  $R_{28}/E_{28}$  для бетона и  $R_{28}'$ ,  $E_{28}'$  и  $R_{28}'/E_{28}'$  для керамзитобетона соответственно при увеличении значений каждого из факторов на 1 %.

Таб. 5 Приращения функций  $R_{28}$ ,  $E_{28}$  и  $R_{28}/E_{28}$  бетона при увеличении значений факторов на 1%

| Приращение \ Факторы | C      | W/C     | r        | SI     | MS     |
|----------------------|--------|---------|----------|--------|--------|
| $R_{28}$ , МПа       | 0,282  | -0,473  | 0,181    | -0,011 | 0,014  |
| $E_{28}$ , ГПа       | -0,063 | -0,276  | -0,130   | 0,006  | 0,003  |
| $R_{28}/E_{28}$      | 0,024  | 5,8E-06 | 1,46E-05 | 0,0005 | 0,0001 |

Таб. 6 Приращения функций  $R_{28}'$ ,  $E_{28}'$  и  $R_{28}'/E_{28}'$  керамзитобетона при увеличении значений факторов на 1%

| Приращение \ Факторы | C       | W/C     | $E_x$    | SI      | MS     | AER     |
|----------------------|---------|---------|----------|---------|--------|---------|
| $R_{28}'$ , МПа      | 0,339   | -0,130  | -0,050   | -0,0093 | 0,039  | -0,0017 |
| $E_{28}'$ , ГПа      | 0,199   | -0,027  | -0,025   | -0,010  | 0,177  | -0,0069 |
| $R_{28}'/E_{28}'$    | -0,0031 | -0,0042 | -0,00016 | 0,00059 | -0,018 | 0,00061 |

Результаты проведенных испытаний показывают, что для каждого вида бетона существует определенная корреляционная связь между прочностью и модулем упругости, которая показана на рис. 9.

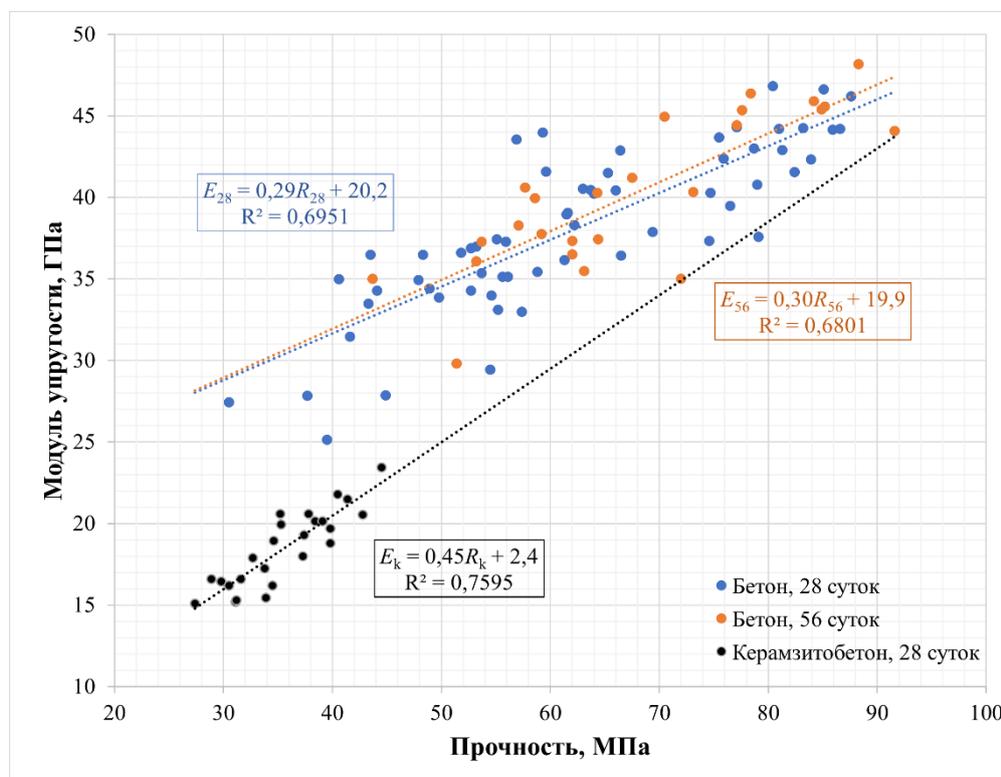


Рис. 9. График линейной корреляции между прочностью и модулем упругости бетона и керамзитобетона.

С точки зрения трещиностойкости бетона большое значение имеет отношение прочности к модулю упругости  $R/E$ , так как оно показывает предельное значение упругой деформации до разрушения. Это отношение растет с увеличением прочности бетона, однако фактор заполнителей переводит все значения  $R/E$  на другой уровень корреляции. При этом существенным является не количество заполнителей, а их качество. Так бетон на керамзитовом гравии при одинаковой прочности имеет более низкий модуль упругости, чем бетон на плотном заполнителе. В связи с этим низко модульный бетон был разработан на основе заполнителя из керамзитового гравия. Несмотря на то, что керамзит – легкий заполнитель, свойства бетона соответствуют заданным значениям. Замена обычного бетона на керамзитобетон может быть целесообразной для тонкостенных конструкций, невысоких классов бетона до В40-45, имеющих жесткие связи с другими элементами. Такими конструкциями являются стены и перекрытия жилых и общественных зданий.

Результаты испытания бетонов на линейную усадку приведены на рисунок 10.

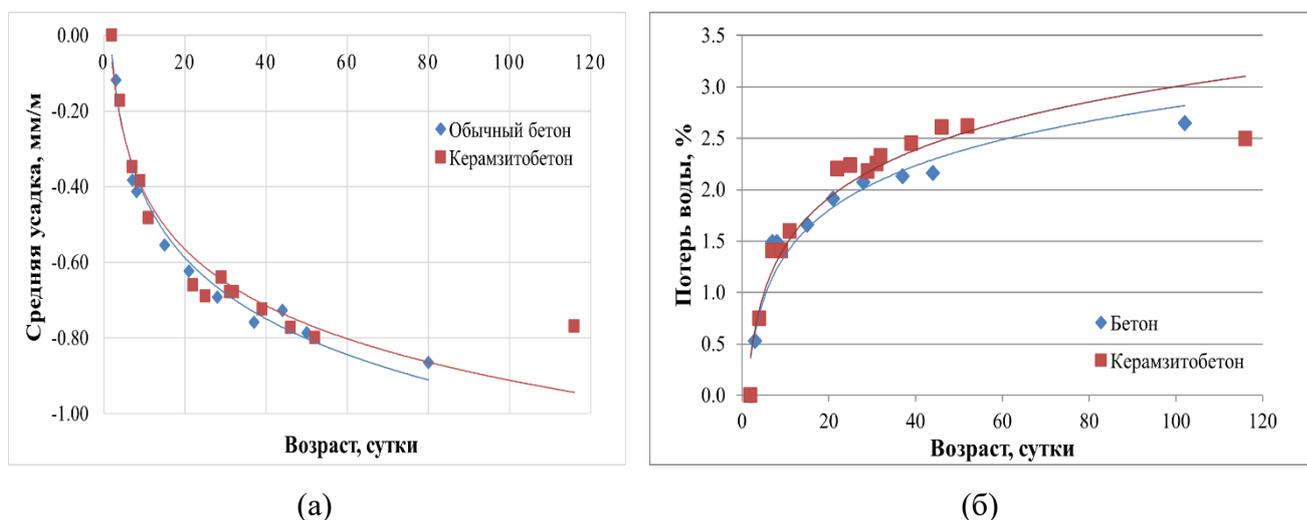


Рис.10. Деформация воздушной усадки (а) и количество испаряемой воды (б) бетона и керамзитобетона в зависимости от возраста.

Как видно из рисунка 10, деформация воздушной усадки у керамзитобетона меньше по сравнению с бетоном на плотном заполнителе. При этом скорость испарения воды у керамзитобетона больше, чем у эталона. Значит, что для достижения одинакового значения усадки образцы керамзитобетона должны потерять большее количество воды.

**В четвертой главе** представлены результаты численных исследований трещиностойкости и характеристики напряженно-деформированного состояния железобетонных тонкостенных конструкций с применением низко модульного бетона (керамзитобетона), имеющей жесткую связь с бетонным основанием в строительном и эксплуатационном периодах.

При твердении свежеложенного бетона таких конструкций зачастую наблюдается образование сквозных вертикальных трещин, начинающихся в зоне контакта с основанием и

распространяющихся вверх, нередко на всю высоту стены. Поэтому предлагается для обеспечения трещиностойкости заменить бетон нижнего слоя стены, контактирующего с основанием, низко модульным бетоном. Конструктивная схема исследования представлена на рисунке 11. Высота заменяемого слоя согласно результату расчета напряженного состояния тонкостенных конструкций Семенова К.В. и Зимины С.С. составляет четверть высоты стены. Так как в данной зоне главные напряжения и деформации растяжения достигают своих наибольших значений.

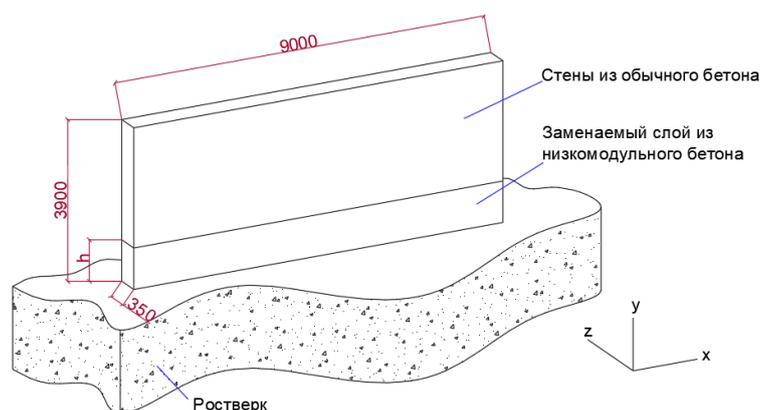


Рис. 11. Конструктивная схема стены жестко закрепленной на фундаментной плите

Моделирование стенки на предмет анализа причин образования и развития в ней трещин произведено в двух комплексных программах: ANSYS (МКЭ) в пространственной постановке и программа «TERM» разработана на кафедре строительных конструкций и материалов СПбПУ. В программе TERM используется метод конечных разностей (МКР). Расчетная модель в программе ANSYS приведена на рис.12.

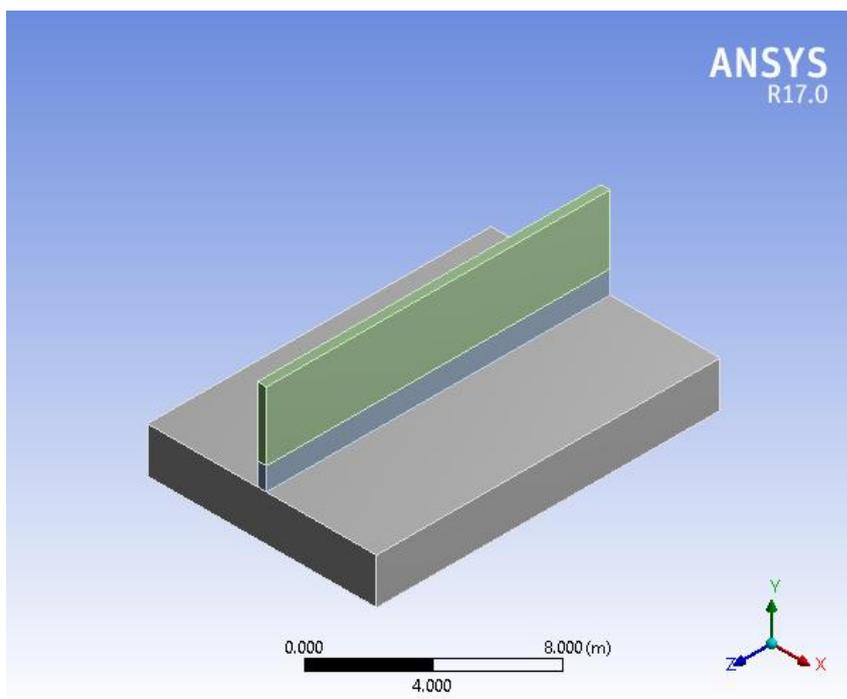


Рис. 12. Расчетная схема (модель) стены.

Важной особенностью программы TERM является способность осуществлять учет влияния температуры на деформативные и теплофизические характеристики бетона, что представляется чрезвычайно актуальным для задач строительного периода. Алгоритм данной программы состоит из двух частей: Определение температуры и термонапряжений. В первой части программ решается задача определения нестационарных температурных полей в бетонной конструкции, находящейся в контакте с основанием и другими элементами. Решается неоднородное дифференциальное уравнение теплопроводности. Вторая часть, программа рассчитывает значения термонапряжений для плит и стен, т. е. когда другие размеры должны превышать толщину конструкции не менее чем в 4 раза. Для таких конструкций с достаточной степенью точности можно рассматривать одномерную расчетную схему, при которой напряжение и температура являются функциями только одной пространственной координаты.

Согласно СП 41.13330.2012 для оценки термической трещиностойкости бетонной конструкции используются два критерия, основанные на разных физических предпосылках образования трещин. Первый критерий, предложенный П.И. Васильевым, предполагает трещинообразование в бетоне следствием недостаточной способности бетона деформироваться под действием растягивающих напряжений. Этот критерий характеризуется соотношением:

$$\sigma(t) \leq \gamma_{cm} \cdot \gamma_h \cdot \varepsilon_{lim} \cdot \varphi(t) \cdot E_t(t) \quad (4.1)$$

где  $\sigma(t)$  - температурные напряжения в момент времени  $t$ ,  $\gamma_h$  - коэффициент, учитывающий зависимость напряжений от градиента температурных деформаций и принимаемый в соответствии с графиком СП 41.13330.2012,  $\varepsilon_{lim}$  - предельная растяжимость бетона, определяемая по СП 41.13330.2012,  $\varphi(t)$  - коэффициент, учитывающий зависимость  $\varepsilon_{lim}$  от возраста, определяемый по СП 41.13330.2012,  $\gamma_{cm}$  - коэффициент условий работы, равный для массивных сооружений 1,1, для остальных – 1,0,  $E_b(t)$  - модуль упруго-мгновенных деформаций бетона. СП 41.13330.2012 предлагает использовать формулу (4.1) для сооружений I и II классов в технико-экономическом обосновании, а для сооружений III и IV классов - во всех случаях при расчете по образованию (недопущению) трещин.

1. Первый критерий можно записать в деформационном представлении:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_b(t)} \leq \varepsilon_{lim}(t) = \gamma_{cm} \cdot \gamma_h \cdot \varepsilon_{lim} \cdot \varphi(t) \quad (4.2)$$

2. Второй критерий предложен Л.П.Трапезниковым. В этом случае условие трещиностойкости записывается как вторая группа предельных состояний:

$$A(t) \leq \frac{[\gamma_{cm} \psi(t) R_{btm}]^2}{2E_b(t)} \quad (4.3)$$

где  $R_{btн}$  - нормативное сопротивление бетона растяжению, определяемое по СП 41.13330.2012,  $A(t)$  - работа растягивающих напряжений  $\sigma(\tau)$  на соответствующей разности полных и вынужденных температурных деформаций  $\alpha T(\tau)$  в бетоне;  $\psi(t)$  - коэффициент, учитывающий зависимость прочности бетона на осевое растяжение от возраста  $\tau$  и принимаемый в соответствии с СП 41.13330.2012. Величину  $A(t)$  СП рекомендует определять как:

$$A(t) = \int_0^t \sigma^+(\tau) \frac{d[\varepsilon(\tau) - \alpha T(\tau)]}{d\tau} d\tau \quad (4.4)$$

где  $\tau$  – текущее время;  $T(\tau)$  – температура бетона в момент времени  $\tau$ ;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения бетона;  $\varepsilon(\tau)$  – деформации бетона, определенные с учетом переменных во времени модуля упругости и ползучести бетона;  $\sigma^+(\tau)$  - растягивающие напряжения в бетоне:

$$\sigma^+(\tau) = \sigma(\tau) \text{ при } \sigma(\tau) > 0 \quad (4.5)$$

$$\sigma^+(\tau) = 0 \text{ при } \sigma(\tau) \leq 0 \quad (4.6)$$

где  $\sigma(\tau)$  - напряжения в бетоне, определенные с учетом переменных во времени модуле упругости и ползучести бетона.

Основные характеристики материалов, задаваемые в модели в программе ANSYS:

- В качестве традиционного бетона в расчетах принимают бетон классом В45 по СП 63.13330.2012 и равнопрочный керамзитобетон.

- Плотность тяжелого бетона и керамзитобетона;

- Начальный модуль деформации (модуль упругости) бетона и керамзитобетона стенки назначен как средний модуль, установившийся через трое суток после начала набора прочности, средний модуль рассчитан с помощью программы TERM. Модуль деформации бетона плиты назначен в соответствии с его классом по СП 63.13330.2012;

- Коэффициент относительного линейного температурного расширения бетона стенки и плиты по экспериментальным данным научно-испытательной лабораторией "Политех-СКИМ-Тест;

- Коэффициент поперечной деформации бетона стенки и плиты (коэффициент Пуассона) по СП 63.13330.2012.

В расчетной модели задавались следующие нагрузки и воздействия:

- Нагрузка от собственного веса всей конструкций (стенки и фундамента);

- Температурное воздействие от разогревания и охлаждения бетонной смеси в процессе ее набора прочности. Температурное воздействие задавалось в соответствии с картиной распределения температурных полей, полученных в программе TERM в зависимости от времени. В расчетной модели принята разница температур между начальной и температурой на третьи сутки твердения.

- Внешняя нагрузка, распределенная по верхней поверхности стены при эксплуатации.

В качестве критериев трещинообразования приняты:

- Достижение величины главных растягивающих напряжений своего предельного значения.

В качестве предельного значения принято значение расчетного сопротивления бетона растяжению (по II группе предельных состояний)  $R_{bt,ser}=2,25$  МПа по СП 63.13330.2012, а керамзитобетона в соответствии с экспериментальными данными.

- Достижение величины главных относительных линейных деформаций своего предельного значения. В качестве предельных значений приняты: значение предельной деформации бетона  $\epsilon_{bt0} = 0,0001$  в соответствии с СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» и значение предельной деформации бетона через трое суток после начала набора прочности  $\epsilon_{bt0} (3 \text{ суток}) = 0,00005$  в соответствии с СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений».

## ВЫВОДЫ

По результатам исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Получены экспериментальные данные исследований прочностных и деформационных свойств бетонов. Был испытан ряд составов бетона, модифицированных добавками, такими как добавка наноцеллюлозы Pro-Flowstab, Стабилизатор Centrament Stabi M15, MC-Adhesive, метакаолин и микрокремнезем. Установлено, что указанные добавки оказывают незначительное влияние на деформационные свойства по сравнению с контрольными образцами, не содержащими добавок. Установлено, что при использовании указанных добавок модуль деформации в основном линейно коррелирует с прочностью.
2. Установлено, что значительное влияние на модуль деформации оказывает вид и свойства заполнителей. Чем ниже модуль деформации зерен, тем ниже модуль деформации бетона.
3. Зависимость между прочностью и модулем упругости обычного и керамзитового бетона существует линейная корреляция. При одинаковых значениях предела прочности модуль упругости у керамзитового бетона имеет значительное отклонение в меньшую сторону по сравнению с модулем упругости обычного бетона.
4. Разработан состав низкомодульного бетона на основе заполнителя из керамзитового гравия при сохранении основных заданных свойств.
5. Результаты численных исследований термонапряженного состояния тонкостенных конструкций свидетельствуют о необходимости мероприятий по обеспечению трещиностойкости стены в зоне сопряжения ее с основанием.
6. На основании результатов численных исследований термонапряженного состояния предложено конструктивное решение по обеспечению трещиностойкости стены на

железобетонном основании, путем частичной замены бетона в нижней четверти высоты стены бетоном с более высокой предельной упругой деформацией.

7. Разработаны рекомендации по повышению термической трещиностойкости тонкостенных строительных конструкций путём применения бетона с высокой предельной упругой деформацией в контактной зоне, где главные напряжения и деформации растяжения достигают своих наибольших значений.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. Барабанщиков Ю.Г., Фам Т.Х. Стабилизатор центрамент штаби М15 и его влияние на трещиностойкость бетона // В сборнике: конференции XLVIII «Неделя науки СПбПУ». Секция «строительство и архитектура». Инженерно-строительный институт. 2019.
2. Barabanshchikov Yu.G., Pham The Hien, Akimov S.V. Effect of metakaolin and MC Adhesive additives on the mechanical properties of concrete // Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives – SES 2020.
3. Barabanshchikov Yu.G., Pham The Hien. The influence of concrete composition on the ratio of strength to elastic modulus as a criterion of crack resistance // Construction of Unique Buildings and Structures; 97 article No 9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4. 2021.

Аспирант \_\_\_\_\_ Фам Т.Х.