



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.00

УДК 51-7: 539.4.019:539.411:532.546:532:685

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДВУХУРОВНЕВОЙ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ НА ВЕЛИЧИНУ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ БЕТОНОВ

И.С. Коноваленко^{1,2}, Е.В. Шилько^{1,3}, И.С. Коноваленко²

¹Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 13 апреля 2020 г.
Принята: 17 февраля 2020 г.
Опубликована: 30 марта 2020 г.

Ключевые слова:

водонасыщенный высокопрочный бетон, двухмасштабная пористость, компьютерное моделирование, дискретные элементы, разрушение, динамическая прочность, пороупругость, проницаемость, фильтрация.

АННОТАЦИЯ

Многие инфраструктурные объекты из бетонов, такие как дамбы, опоры мостов, основания портовых сооружений и морских буровых платформ, работают в условиях длительного контакта с водой. Наличие проницаемой трещинно-поровой структуры обуславливает функционирование поверхностных слоев таких бетонных элементов в условиях водонасыщения. При динамических воздействиях со стороны плавучих объектов поровая жидкость способна оказывать значимое механическое влияние на напряженно-деформированное состояние и прочностные характеристики поверхностных слоев, что важно учитывать при оценке интенсивности их изнашивания и прогнозировании ресурса работы.

Настоящая работа посвящена теоретическому изучению и обобщению закономерностей механического влияния поровой жидкости на величину динамической прочности высокопрочных бетонов, обладающих двухмасштабной поровой структурой. Акцент в исследовании делается на анализе вкладов каждой из поровых подсистем в интегральный механический эффект жидкости. Для проведения такого анализа развита связанная гидромеханическая модель, учитывающая композиционную структуру бетона, наличие в цементном камне порового пространства двух различных масштабов, взаимовлияние поровой жидкости и твердофазного каркаса на основе модели пороупругости Био, а также фильтрацию жидкости в поровом пространстве. Развита модель реализована в рамках развиваемого авторами численного метода однородно деформируемых дискретных элементов.

С использованием развитой модели проведены численные исследования зависимости величины прочности на сжатие представительных объемов бетона мезоскопического масштаба от скорости деформации, размеров образца, вязкости поровой жидкости и параметров поровой структуры. Результаты моделирования показали возможность объединения полученных зависимостей в единую (обобщенную) кривую в терминах комбинированного безразмерного параметра, смысл которого аналогичен числу Дарси. Выявлены два ключевых фактора, контролирующие вид и параметры единой кривой динамической прочности. Первый фактор – мобильность поровой жидкости в сети капиллярных пор, которая определяет скорость выравнивания напряжений в пористом каркасе за счет фильтрации. Он определяет нелинейный характер изменения прочности со скоростью нагружения, который однозначно характеризуется логистической зависимостью динамической прочности от «числа Дарси». Второй фактор – интегрированность крупных микропор в сеть мелких капиллярных пор-каналов. Он определяет величину снижения концентрации напряжений в микропорах за счет фильтрации «избыточной» поровой жидкости в капиллярную поровую сеть. Установлено, что вклады перечисленных факторов в изменение величины динамической прочности водонасыщенного бетона являются аддитивными и приблизительно равнозначными, а величина их суммарного вклада достигает 25 %.

© ПНИПУ

© Коноваленко Игорь Сергеевич – к.ф.-м.н., н.с., e-mail: igkon@ispms.tsc.ru, [ID](#):

Шилько Евгений Викторович – д.ф.-м.н., проф., зав. лаб., e-mail: shilko@ispms.tsc.ru, [ID](#):

Коноваленко Иван Сергеевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: ivkon@tpu.ru, [ID](#):

Igor S. Konovalenko – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, e-mail: igkon@ispms.tsc.ru, [ID](#):

Evgeny V. Shilko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory, e-mail: shilko@ispms.tsc.ru, [ID](#):

Ivan S. Konovalenko – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: ivkon@tpu.ru, [ID](#):



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF A TWO-SCALE PORE STRUCTURE ON THE DYNAMIC STRENGTH OF WATER-SATURATED CONCRETE

Ig.S. Konovalevko^{1,2}, E.V. Shilko^{1,3}, Iv.S. Konovalevko²

¹Institute of Strength Physics and Materials Science, Tomsk, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 13 April 2020
Accepted: 17 February 2020
Published: 30 March 2020

Keywords:

water-saturated high-strength concrete, two-scale porosity, computer simulation, discrete elements, fracture, dynamic strength, poroelasticity, permeability, filtration.

ABSTRACT

Many infrastructural concrete facilities, such as dams, bridge footings, foundations of port facilities and offshore drilling platforms, operate under the condition of permanent contact with water. The permeable fractured-porous structure of concrete determines the water-saturated state of the surface layers of such concrete elements. Under dynamic contact loading, the pore fluid is capable of exerting a significant mechanical influence on the local stress-strain state and strength characteristics of the surface layers of concrete. This has to be taken into account when assessing the intensity of wear of surface layers and predicting the service life of the concrete element. The aforesaid determines the relevance of the study aimed at identifying the influence of the pore fluid and the characteristics of the pore structure of concrete on the strength and fracture pattern under quasi-static and dynamic compressive loading.

The present work is devoted to the theoretical study and generalization of the laws of mechanical influence of pore fluid on the dynamic strength of high-strength concrete with a two-scale pore structure. The emphasis in the study is on analyzing the contributions of each of the pore subsystems to the integral mechanical effect of the fluid. To carry out such an analysis, a coupled hydromechanical model is developed. It takes into account the compositional structure of concrete, the presence of a pore space in a cement stone of two different scales, the interaction of a pore liquid and a solid-phase skeleton based on the Bio poroelasticity model, as well as fluid filtration in a pore space.

Using the developed model, numerical studies of the dependence of the compressive strength of representative volumes of concrete of mesoscopic scale on the strain rate, sample size, pore fluid viscosity, and pore structure parameters were performed. The simulation results showed the possibility of combining the obtained dependencies into a generalized (master) curve in terms of a combined dimensionless parameter, which has the meaning similar to the Darcy number. We identified two key factors that control the type and parameters of a master curve of the dynamic strength of concrete. The first factor is the mobility of the pore fluid in the network of capillary pores. It determines the rate of stress equalization in the porous skeleton due to fluid flow. The second factor is the interconnection of large micropores with the network of small capillary pore channels. It determines the magnitude of the decrease in stress concentration in micropores by filtering the "excess" pore fluid into the capillary pore network. It is shown that the contributions of these two factors to the amplitude of variation of the dynamic strength of water-saturated concrete are additive, and their total contribution reaches 25 %.

© PNRPU

Введение

Большое количество искусственных и естественных материалов обладают, помимо композиционного состава, многоуровневой поровой структурой. В зависимости от условий функционирования материала его поры могут быть пустыми или содержать поровую жидкость (например, воду). Широко распространенными и хорошо известными представителями класса пористых водонасыщенных композитов являются горные породы, бетоны, костные ткани. Известно, что присутствующая в порах этих материалов вода или водный раствор способны оказывать значительное влияние на их механические свойства. В частности, поровая жидкость полагается ответственной за многочисленные явления преждевременного разрушения вмещающего материала при нагрузках, существенно меньших, чем предельно допустимые для этих же материалов, не насыщенных жидкостью [1–5].

Влияние поровой воды на механические характеристики (в частности, снижение прочности) пористых водонасыщенных композитов проявляется по-разному на различных временных масштабах. Так, на длительных временных промежутках вода приводит к развитию различных дефектов в твердофазном каркасе и его физико-химической деградации, известной как адсорбционное понижение прочности. Данный эффект определяет, в частности, снижение статической прочности цементного камня и бетона [3, 6, 7]. Другим важным фактором, определяющим механические свойства бетона в условиях динамического изменения напряженного состояния (т.е., на малых временных интервалах, когда скорость роста нагрузки превосходит скорость перераспределения флюида в твердофазном каркасе), является механическое влияние воды. Оно заключается в распирающем действии порового давления на твердофазный каркас и проявляется в снижении макроскопической прочности и повышении эффективного модуля всесто-

ронного сжатия материала (а также других упругих модулей, связанных с ним) [8–10]. При этом, ввиду высокой подвижности воды, ее механическое влияние на напряженное состояние и механические характеристики пористого материала проявляется практически во всем интервале скоростей деформирования, в том числе в интервале скоростей, при которых материал каркаса является нечувствительным к динамике нагружения [9, 10]. Действительно, при механическом нагружении свободная (химически не связанная) вода перераспределяется в системе связанных несплошностей материала, что является важным каналом перераспределения и релаксации локальных напряжений. Данное влияние может быть значимым уже при малом объемном содержании воды в материале, составляющем несколько процентов.

Механическое влияние поровой жидкости на эффективные динамические механические свойства наиболее критично для пористых материалов с хрупким каркасом. Величина вклада поровой жидкости в напряженное состояние и прочность хрупкого каркаса в значительной степени определяется, помимо объемного содержания жидкости и динамики нагружения, и параметрами поровой структуры (распределением пор по размерам, характерными масштабами пор, их связанностью и т.д.). Эта проблема актуальна не только для горных пород [11], но и для искусственных композиционных конструкционных материалов, включая тяжелые высокопрочные бетоны. Тяжелые бетоны традиционно применяются в качестве строительного материала для наиболее ответственных элементов дамб, плотин, опор различных мостов, вышек, портовых сооружений. Тяжелые бетоны характеризуются наличием двухмасштабной поровой структуры. Поскольку влияние поровой жидкости на величину напряжений и прочность каркаса во многом определяется возможностью ее перераспределения в поровом пространстве, каждая из поровых подсистем в бетоне вносит свой вклад в интегральный механический эффект жидкости. Отметим, что при этом важную роль играет степень связности поровых систем различных масштабов.

Бетоны характеризуются кратно более высокими значениями прочности на сжатие в сравнении с прочностью на растяжение и традиционно предназначаются для функционирования в условиях действия сжимающих нагрузок. «Распирающее» влияние порового флюида на напряженное состояние каркаса также наиболее значительно в условиях сжатия. В связи со сказанным актуальной задачей является исследование и обобщение влияния порового флюида на величину динамической прочности на сжатие высокопрочных бетонов, в том числе выявление вклада каждой из поровых подсистем и их взаимной связанности. Результаты такого исследования имеют не только фундаментальную значимость, но и широкий спектр практических приложений. В частности, они могут быть востребованы при решении задач определения «оптимальных»

параметров внутренней структуры бетонов, функционирующих в условиях влагонасыщения или в водной среде. Другим перспективным приложением, которое заслуживает отдельного упоминания, является оценка механического влияния воды на деградацию поверхностных слоев и износ поверхностных слоев бетонных элементов конструкций в крупных водоемах северных широт, в том числе в условиях арктического климата [12]. Такие опорные бетонные элементы находятся в условиях длительного контактного нагружения протяженными (десяtkи километров) ледовыми плитами толщиной до 1–2 м. При динамических подвижках ледовых массивов со скоростями до нескольких метров в секунду (например, при «льдотрясениях») локальные давления в пятнах контакта могут кратковременно достигать десятков мегапаскалей и даже превышать величину прочности бетона на одноосное сжатие. В условиях динамического нагружения поровое давление в поверхностных областях бетона в окрестностях пятен контакта многократно возрастает вследствие относительно низкой скорости фильтрации в поровых каналах и может провоцировать локальное разрушение. Определение условий локального разрушения при динамическом контактном (сжимающем) нагружении и оценка соответствующих значений динамической прочности актуальны для разработки и параметризации статистических моделей абразии бетонных сооружений массивными плавучими объектами (ледовыми массивами или массивными судами) [13–15].

Традиционными способами изучения динамического механического поведения водонасыщенных материалов в условиях сжатия являются лабораторные эксперименты [16–19] и мониторинг крупномасштабных объектов, функционирующих в водонасыщенном состоянии [15, 20–22]. Перспективной альтернативой является компьютерное моделирование динамического нагружения представительных образцов бетонов с использованием связанных механических моделей, учитывающих деформацию каркаса, перераспределение (фильтрацию) порового флюида и взаимовлияние этих процессов. Очевидным преимуществом такого подхода является возможность не только качественного, но и количественного определения вкладов различных факторов поровой структуры в механическое поведение (включая разрушение) и динамическую прочность водонасыщенного бетона.

В настоящей работе решение поставленной задачи осуществлялось путем компьютерного моделирования одноосного сжатия флюидонасыщенных представительных образцов бетона с двухмасштабной поровой структурой гибридным методом однородно деформируемых проницаемых дискретных элементов [23, 24]. Применялась связанная механическая модель водонасыщенных хрупких материалов, основанная на принципах модели пороупругости Био. Отметим, что применяемая модель учитывает механическое взаимовлияние твердофазного каркаса и порового флюида (через де-

формацию порового пространства и соответствующее изменение порового давления), а также фильтрацию флюида в поровом пространстве [25].

Решение задачи осуществлялось в два этапа. На первом этапе исследовалась зависимость величины динамической прочности водонасыщенного бетона на сжатие от параметров, определяющих мобильность флюида в поровом пространстве, и анализировалась возможность построения обобщенной зависимости в терминах комбинированного безразмерного параметра. Далее исследовались вклады микропоровой и капиллярной составляющих порового пространства (а также их интегрированности в единую проницаемую сеть) в величину динамической прочности бетонов.

1. Объект исследования

Объектом изучения являлись мезомасштабные образцы тяжелого высокопрочного бетона, поровое пространство которых полагалось насыщенным жидкостью (в качестве «базовой» жидкости рассматривалась вода). Исходное значение порового давления жидкости полагалось равным атмосферному давлению. Под мезомасштабом здесь подразумевается характерный масштаб ключевых элементов внутренней структуры: агрегатов миллиметровых линейных размеров и «микропор» с характерными размерами сотни микрометров. На мезоскопическом уровне описания структура бетона представляет собой матрицу цементного камня (например, на основе высокопрочного бездобавочного портландцемента ПЦ 600 ДО, ПЦ 500 ДО) с упрочняющими крупными агрегатами заполнителя (щебень базальта и диабаз).

Цементный камень является основным компонентом высокопрочных бетонов, его объемное содержание варьируется в интервале 30–60 %. В качестве заполнителя в работе рассматривался щебень базальта, который полагался однородным изотропным беспористым (непроницаемым) материалом. Типичная форма включений заполнителя (частиц базальтового щебня) – равноосная, средний размер включений – 10–15 мм.

Одним из ключевых структурных параметров цементного камня, определяющих его эффективные прочностные и упругие свойства, является пористость. В зависимости от технологических режимов приготовления цементного камня и свойств компонентов его пористость может быть различной как в качественном, так и в количественном отношении. В качественном отношении, различие может наблюдаться, в частности, по типу поровой структуры: например, одно- и двухмасштабная, сообщающаяся и изолированная пористость. В количественном отношении различие может касаться, в частности, величины объема порового пространства (приходящегося на пористость определенного масштабного уровня) и проницаемости (диаметра поровых каналов). В соответствии с литературными данными тяжелый бетон характеризуется двухуровневой поровой структурой, капиллярная пористость достигает

~6 % объема цементного камня, содержание микропор – до 4 % объема [26–28]. Характерный размер микропор составляет сотни микрометров, их форма, как правило, является округлой. Поперечные размеры капиллярных каналов-пор могут варьироваться в широких пределах (от 0,05 до 15 мкм), что определяется различными факторами, в частности, условиями приготовления и твердения бетона, а также соотношением воды и цемента. Изменение размеров этих пор является следствием отложения продуктов гидратации цемента в каналах-порах при затвердевании бетона, которое может приводить к многократному сужению их характерного просвета и соответствующему снижению проницаемости цемента (до 1–2 порядков величины) [26, 29, 30].

Просветность капилляров определяет мощность перераспределения поровой жидкости, обусловленного градиентом порового давления. Действительно, перераспределение жидкости в поровом пространстве материала способствует уменьшению максимальных локальных значений «распирающего» порового давления на каркас. В случае снижения характерного диаметра каналов уменьшается плотность мощности потока жидкости, что определяет более высокие значения порового давления. Другими словами, при одной и той же величине скорости внешнего механического нагружения в материале с меньшим характерным диаметром каналов поровое давление возрастает быстрее, и, соответственно, разрушение начинается при меньшем значении приложенной нагрузки. Сказанное определяет актуальность анализа влияния поперечного размера капилляров на динамическое поведение и величину динамической прочности водонасыщенного бетона. Отметим, что другими существенными факторами являются объемное содержание микропор в цементном камне и их связанность с капиллярной поровой системой. В частности, при интенсивном отложении продуктов гидратации цемента на стенках микропор может происходить «закупоривание» выходов капиллярных каналов, т.е. изоляция микропорового пространства.

В соответствии со сказанным выше в работе исследовалось динамическое поведение модельных образцов бетона в условиях одноосного сжатия при различных значениях капиллярной проницаемости, содержания микропор и степени их «закупоренности». Рассмотрены несколько характерных случаев поровой структуры цементного камня. В первом случае его поровая сеть содержит только капиллярные поры. Во втором – поровое пространство содержит, помимо капиллярной сети, и микропоры, связанные с капиллярной пористостью в единую фильтрационную систему. В третьем случае микропоры полагаются «закупоренными», т.е. не сообщающимися с сетью капилляров (данный случай соответствует интенсивному отложению продуктов гидратации цемента на стенках микропор и «закупориванию» выходов капиллярных каналов). Во всех случаях поровое пространство цементного камня было заполнено водой (в том числе «закупоренные» микропоры).

2. Связанная механическая модель высокопрочного бетона с двухмасштабной поровой структурой

На основе описанных в предшествующем разделе положений построена двумерная компьютерная модель представительного мезомасштабного объема высокопрочного бетона. Модель включает в рассмотрение два пространственных масштаба: мезоскопический и микроскопический. Мезомасштабные компоненты внутренней структуры бетона (цементный камень, агрегаты, микропоры) задаются явным образом (рис. 1). Пространственное размещение и определение геометрии агрегатов в модельных образцах осуществлялось с использованием реализованного исполнителями алгоритма диаграмм Воронова. Микропоры случайным образом распределялись в объеме матрицы цементного камня. Задание микропор цементного камня осуществляется удалением определенных областей материала из начальной беспористой структуры образца. При создании модели учитывались такие параметры мезомасштабной структуры как объемное содержание агрегатов и микропор, их средний размер, форма и пространственное распределение в образце. В проведенных исследованиях объемное содержание базальтовых агрегатов полагалось равным 10 %. Агрегаты полагались приблизительно равноосными, угловатыми. Объемное содержание микропор в цементном камне составляло 0 % (только капиллярная пористость) или 4 %. Микропористость цементного камня считалась моноразмерной, форма микропор – круглой (диаметр микропоры равен 500 мкм). Особенности внутренней структуры бетона на более низких масштабах (включая капиллярную пористость) учитываются эффективно (интегрально) через физико-механические свойства цементного камня, агрегатов и порового флюида. Эти свойства включают в себя применяемые определяющие соотношения и уравнения динамики для компонентов системы, а также конкретные значения коэффициентов и параметров этих соотношений.

В качестве вычислительной основы для построения компьютерной модели использовался развиваемый авторами метод однородно деформируемых дискретных элементов [21]. Метод дискретных элементов базируется на представлении материала как ансамбля химически связанных между собой частиц, имеющих заданную массу, форму, объем и поверхность. Три последних могут изменяться в процессе взаимодействия элементов. Каждый элемент моделирует некоторую область (фрагмент) цементного камня или базальтового агрегата. Динамика моделируемого тела определяется численным решением системы уравнений движения Ньютона – Эйлера, каждое из которых описывает движение и поворот одной из частиц. Авторами используется наиболее распространенная реализация метода, в рамках которой уравнение движения частицы формулируется в упрощенной форме, отвечающей диску (в двумерной постановке задачи) или шару (в 3D случае) [31, 32]. Такое приближение имеет название приближения эквивалентных дисков/шаров.

Основным преимуществом метода однородно деформируемых элементов в сравнении с классическим формализмом жестких (недеформируемых) элементов является учет изменения (как упругого, так и необратимого) формы и объема дискретного элемента в ходе нагружения. В рамках метода однородно деформируемых дискретных элементов напряжения и деформации в объеме элемента полагаются однородно распределенными и характеризуются тензорами усредненных напряжений и деформаций. Компоненты этих тензоров вычисляются как суперпозиция сил взаимодействия элемента с соседями и деформаций элемента в этих парах. Соотношения для сил взаимодействия элементов записываются в многочастичной форме и, в свою очередь, определяются значениями локальных напряжений. Такая взаимосвязь напряжений и сил взаимодействия позволяет естественным образом реализовывать различные модели упругости, пластичности и разрушения (в том числе с многопараметрическими критериями) в рамках формализма дискретных элементов.

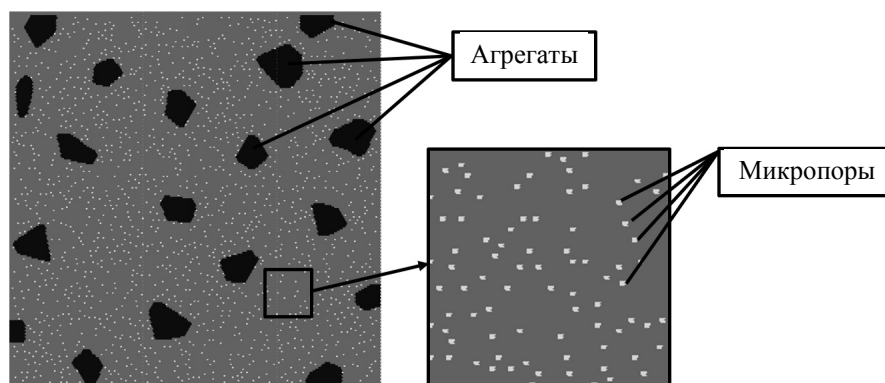


Рис. 1. Пример структуры представительного мезомасштабного объема модельного бетона (содержание базальтовых агрегатов – 10 %, величина микропористости – 4 %)

Fig. 1. Example of the structure of a representative mesoscale volume of model concrete (content of basalt aggregates – 10%, microporosity – 4%)

Отметим, что развитая оригинальная реализация метода дискретных элементов (МДЭ) получила специальное название – метод подвижных клеточных автоматов (МСА).

Данное преимущество определяет, в частности, возможность корректного моделирования механического отклика проницаемых флюидонасыщенных материалов с применением связанных моделей, эффективно учитывающих механическое взаимодействие твердофазного каркаса и поровой жидкости, а также перераспределение (фильтрацию) жидкости в поровом пространстве материала. Для моделирования флюидонасыщенных материалов и сред методом однородно деформируемых элементов развит гибридный формализм, в рамках которого дискретный элемент рассматривается как пористый и проницаемый [24, 33]. Поровое пространство элемента описывается неявно и характеризуется интегральными параметрами, такими как объем порового пространства, пористость и проницаемость. Жидкость в поровом пространстве элемента учитывается неявно и также характеризуется интегральными параметрами: массой, плотностью, давлением и динамической вязкостью (здесь и далее полагаем поровую жидкость ньютоновской).

В работе материал агрегатов (базальт) полагался изотропным упруго-хрупким, цементный камень рассматривался как изотропный упругопластический (величина неупругой деформации мала и сравнима с величиной упругой деформации). В качестве определяющего соотношения для данных компонентов в области упругой деформации использовался обобщенный закон Гука для изотропных материалов. Отметим при этом, что неупругое поведение мезомасштабных объемов цементного камня при нагружении обусловлено, главным образом, возникновением, накоплением и ростом повреждений микро- и наноскопического масштабов. Поэтому для описания релаксации напряжений и накопления неупругой деформации в этом компоненте бетона использовался неассоциированный закон пластического течения с критерием Мизеса-Шлейхера (модель Николаевского) [33], широко применяемый для хрупких природных и искусственных материалов [35, 36].

В рамках применяемой связанной модели описание механического взаимодействия твердофазного каркаса проницаемого дискретного элемента, моделирующего фрагмент цементного камня, и жидкости в его капиллярном поровом пространстве осуществлялось в рамках модели поропругости Био. Поровая жидкость полагалась линейно сжимаемой. Основные определяющие соотношения, связывающие усредненные напряжения и деформации твердофазного каркаса элемента, а также давление жидкости в поровом (капиллярном) пространстве элемента имеют вид:

$$\Delta\sigma_{\alpha\beta} = 2G \left(\Delta\varepsilon_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta} \frac{a\Delta P_{\text{pore}}}{K} \right) + \delta_{\alpha\beta} \left(1 - 2G/K \right) \Delta\sigma_{\text{mean}}, \quad (1)$$

$$\frac{V_p - V_p^0}{V} = \varphi - \varphi_0 = \frac{a}{K} \Delta\sigma_{\text{mean}} + \left(\frac{1}{K} - \frac{1+\varphi}{K_s} \right) \Delta P_{\text{pore}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{pore}} = P_{\text{pore}}^0 + K_{fl} \left(\frac{\rho_{fl}}{\rho_{fl}^0} - 1 \right) = P_{\text{pore}}^0 + K_{fl} \left(\frac{m_{fl}}{\rho_{fl}^0 V_p} - 1 \right). \quad (3)$$

Здесь символ Δ обозначает приращение соответствующей переменной за шаг по времени численной схемы интегрирования уравнений движения элемента; $\sigma_{\alpha\beta}$ и $\varepsilon_{\alpha\beta}$ – компоненты тензоров усредненных напряжений и деформаций в объеме дискретного элемента; σ_{mean} – среднее напряжение; G и K – модули сдвига и всестороннего сжатия материала элемента в отсутствие поровой жидкости; $\delta_{\alpha\beta}$ – символы Кронекера, $a = (1 - K/K_s)$ – коэффициент поропругости в модели Био (K_s – модуль всестороннего сжатия материала стенок каркаса); V_p и V_p^0 – текущее и исходное (в недеформированном элементе) значения порового объема; φ и φ_0 – соответствующие значения пористости; V – объем элемента; ρ_{fl}^0 и P_{pore}^0 – равновесные значения плотности и давления жидкости при атмосферных условиях (в отсутствие механического ограничения объема жидкости); ρ_{fl} – текущее значение плотности жидкости в поровом пространстве элемента; K_{fl} – модуль объемного сжатия жидкости.

Влияние порового давления в объеме дискретного элемента, моделирующего цементный камень, на его неупругое механическое поведение учитывалось в рамках использования модифицированной формулировки критерия пластичности Мизеса – Шлейхера с использованием эффективного среднего напряжения Терцаги:

$$\Phi = \alpha \sigma_{\text{mean}}^{\text{eff}} + \sigma_{eq} / \sqrt{3} = \alpha (\sigma_{\text{mean}} + P_{\text{pore}}) + \sigma_{eq} / \sqrt{3} = Y, \quad (4)$$

где α – коэффициент внутреннего трения; Y – сцепление (предел упругости материала при чистом сдвиге); σ_{eq} – интенсивность напряжений.

В рамках метода дискретных элементов локальное разрушение (на рассматриваемом масштабе) моделируется разрывом химической связи между элементами, на поверхности взаимодействия которых выполняется заданное критическое условие. В настоящем исследовании в качестве критерия разрушения цементного камня и базальтовых агрегатов применялся критерий Друккера-Прагера [37], также формулируемый в терминах эффективных напряжений Терцаги:

$$\sigma_{\text{fract}} = 1,5(\beta - 1)\sigma_{\text{mean}}^{\text{eff}} + 0,5(\beta + 1)\sigma_{eq} = \sigma_c, \quad (5)$$

где $\beta = \sigma_c/\sigma_t$, σ_c и σ_t – значения прочности «сухого» материала на сжатие и растяжение. Для беспористого базальта применялась традиционная формулировка критерия Друккера-Прагера, в которой вместо $\sigma_{\text{mean}}^{\text{eff}}$ используется σ_{mean} .

Отметим, что применяемые критерии пластичности (4) и прочности (5) являются обобщениями классического критерия пластичности/разрушения Кулона – Мора. Их выбор обусловлен тем, что они позволяют адекватно описывать отклик хрупких материалов (в том числе флюидонасыщенных) в сложном напряженном состоянии.

При описании перераспределения жидкостей в связанном поровом пространстве бетонов традиционно учитывают следующие механизмы: 1) фильтрация, обусловленная градиентом (перепадом) давления поровой жидкости; 2) просачивание вследствие капиллярных сил; 3) диффузия жидкости через наноразмерные несплошности, которые в некотором количестве всегда присутствуют в цементном камне и могут быть интегрированы в капиллярную сеть. В данной работе исследовался механический отклик бетонов при динамическом нагружении, поэтому вкладом диффузии жидкости через несплошности нанометрового диапазона пренебрегали. Мощность капиллярного механизма перераспределения также достаточно мала, но в то же время капиллярные силы могут обуславливать «запирание» фильтрации (фильтрация начинается, когда величина перепада давления превышает пороговое значение, которое для бетонов может варьироваться от атмосферного давления до 1 МПа и выше). Величина порогового давления обратно пропорциональна характерному поперечному размеру капиллярных каналов. В то же время коэффициенты этой связи крайне чувствительны как к составу цементного камня, так и к составу поровой жидкости. Кроме того, характерные значения порового давления при сжимающих нагрузках, сопоставимых с прочностью бетона, многократно превышают 1 МПа. Поэтому без существенного снижения общности результатов в настоящей работе в качестве движущей силы перераспределения жидкости в капиллярном поровом пространстве элементов рассматривался только градиент порового давления (вклады капиллярного течения и капиллярных сил не учитывались). Фильтрация описывалась на основе уравнения транспорта жидкости в форме, учитывающей конечную скорость распространения возмущений [38]:

$$\bar{v} = -\frac{k}{\eta} \nabla P_{\text{pore}} - \tau_r \frac{\partial \bar{v}}{\partial t}, \text{ где } \tau_r = \frac{K_{fl}}{\phi} \frac{k}{\eta} \frac{1}{V_{fl}^2}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{v}$ – плотность мощности потока жидкости; k – капиллярная проницаемость; η – вязкость флюида; τ_r – время релаксации; V_{fl} – скорость звука в жидкости, $V_{fl} = \sqrt{K_{fl}/\rho_{fl}^0}$. Уравнение (6) решалось методом конечных объемов на ансамбле дискретных элементов.

Детальное описание численной реализации модели флюидонасыщенных материалов в рамках гибридного МДЭ приведено в работах [24, 33].

В проводимом исследовании использовались следующие значения механических параметров компонен-

тов модельного бетона. Значения упругих констант базальта и цементного камня и параметры единой кривой упрочнения (для цементного камня) соответствовали данным, приведенным в [39]. Для базальта они составляют $G = 60$ ГПа и $K = 166$ ГПа, для цементного камня $G = 17$ ГПа и $K = 62,5$ ГПа. Как отмечалось выше, цементный камень моделировался как упругопластический материал. Величина сцепления Y принималась равной 18,5 МПа, величина коэффициента деформационного упрочнения – 14,1 ГПа. Для базальта использовались следующие значения параметров прочности в критерии разрушения (5): $\sigma_c^{\text{Bas}} = 260$ МПа и $\sigma_t^{\text{Bas}} = 52$ МПа, для цементного камня: $\sigma_c^{\text{Cem}} = 120$ МПа и $\sigma_t^{\text{Cem}} = 30$ МПа.

Величина капиллярной проницаемости цементного камня k полагалась непосредственно связанной с капиллярной пористостью ϕ (в настоящем исследовании $\phi = 6\%$) и характерным поперечным размером (эффективным диаметром) капиллярных поровых каналов d_{ch} известным соотношением $k = \phi d_{ch}^2$ [40]. В проводимом исследовании величина эффективного диаметра капиллярных каналов варьировалась в различных расчетах в пределах от 0,1 до 1 мкм для анализа влияния степени отложения продуктов гидратации цемента в капиллярном поровом пространстве на динамическую прочность бетона. Жидкость в микропорах цементного камня описывалась эффективно, аналогично учету жидкости в капиллярном поровом пространстве элемента. Каждая микропора характеризовалась массой, плотностью и давлением находящейся в ней жидкости (использовалось приближение равномерного распределения плотности жидкости в микропоре), текущий объем микропоры определялся на основе специального алгоритма, описанного в работе [24]. Начальное значение порового давления воды в капиллярных и микропорах (до начала нагружения) было равно величине атмосферного давления.

Интегрированность микропор в капиллярную поровую сеть (т.е. возможность истечения флюида из микропор в капиллярную сеть или притока флюида из капиллярной сети) моделировалась параметрическим заданием величины эффективного диаметра капиллярных поровых каналов d_{ch} на стенках микропор. Рассматривались два предельных случая: величина d_{ch} равна значению того же параметра в объеме цементного камня (полная связанность порового пространства) и $d_{ch} = 0$ («закупоренные» микропоры).

Межфазные границы описывались с использованием модели «бесконечно тонкой» межфазной границы [41] с использованием непотенциальной модели Жубеля-Бейлора [42, 43]. Основной характеристикой интерфейса в рамках данной модели является критерий прочности. Для границ раздела включений базальта и цементного камня использовался критерий прочности Друккера-Прагера, коэффициенты которого отвечали коэффициентам критерия разрушения для цементного камня.

3. Результаты моделирования и обсуждение

3.1. Условия нагружения и варьируемые параметры модели

В работе проводились детальные параметрические исследования влияния свободной поровой воды на величину динамической прочности и разрушение мезомасштабных образцов высокопрочного бетона с одно- и двухмасштабной поровой структурой при одноосном сжатии. Двумерные бетонные образцы моделировались в приближении плосконапряженного состояния. В некотором приближении (в частности, в отношении жесткости образца) это соответствует условиям реального эксперимента на бетонных кубических образцах.

Наличие естественной смазки на торцевых поверхностях образцов (прослойки жидкой воды наноразмерной толщины) учитывалось эффективно [26–28]. В модели это обеспечивалось путем разрешения поперечных смещений элементам пуансонов, контактирующих с образцом, и использования вязкой тангенциальной силы между контактирующими элементами пуансонов и поверхности образца (коэффициент сухого трения полагался равным нулю).

Боковые поверхности образца являлись открытыми и обеспечивали возможность свободного истечения флюида из образца (окружающее образец пространство полагалось заполненным воздухом при атмосферном давлении).

Моделировалось одноосное сжатие образцов с постоянной скоростью. При нагружении нижний (опорный) пуансон полагался неподвижным, верхний пуансон смещался в вертикальном направлении. Для плавного выхода образца на установившийся режим нагружения скорость верхнего (сжимающего) пуансона сначала возрастала по линейному закону до достижения заданного значения, а затем оставалась постоянной до разрушения образца. Интервал рассматриваемых скоростей нагружения определялся на основе оценки локальных скоростей деформации поверхностей бетонных сооружений при контакте с морскими льдами (или судами). Эти значения могут различаться на 3–6 порядков величины (от квазистатического до 10^0 – 10^2 с⁻¹). Интервал значений скорости смещения верхнего пуансона V определялся на основе данных оценок скоростей деформации.

При проведении исследования, помимо скорости деформации $\dot{\epsilon}$, варьировались также пропускная способность капиллярной поровой сети (ее проницаемость k), поперечный размер (ширина) образца и динамическая вязкость поровой жидкости η (в качестве которой потенциально могут выступать пресная или соленая вода, а также различные растворы). В расчетах скорость деформации $\dot{\epsilon} = V/H$ (V – скорость сжатия образца, H – высота образца) варьировалась в пределах трех порядков величины (от $5 \cdot 10^{-3}$ до 5 с⁻¹), вязкость жидкости –

в пределах порядка величины относительно вязкости соленой воды ($2 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ Па·с), проницаемость – в пределах двух порядков величины (от $6 \cdot 10^{-16}$ до $6 \cdot 10^{-14}$ м²), ширина образца – в 4 раза (от 5 до 20 см). Анализировались величина прочности на сжатие и характер разрушения образцов.

3.2. Динамическая прочность бетонов с одномасштабной (капиллярной) поровой структурой

Из результатов многочисленных теоретических и экспериментальных исследований хорошо известен нелинейный характер зависимости прочности на сжатие образцов хрупких флюидонасыщенных материалов от скорости деформирования [5, 11, 24, 33]. В квазистатическом режиме нагружения величина прочности стремится к верхнему пределу, отвечающему прочности ненасыщенного образца. По мере роста скорости сжатия величина прочности стремится к нижнему пределу, отвечающему прочности водонасыщенных гидроизолированных образцов. При этом размах изменения прочности может достигать нескольких десятков процентов. Качественно такой тренд описывается на основе рассмотрения конкуренции двух процессов. Первым из них является сжатие порового пространства материала, вызывающее рост порового давления. Данный эффект обуславливает более раннее (в сравнении с «сухими образцами») начало зарождения повреждений и развитие трещин в образцах и тем самым определяет пониженное значение прочности. Вторым, противоположно направленным процессом является фильтрация порового флюида в образце при сжатии и его истечение через свободные поверхности вследствие возникновения и роста градиента давления от центра образца к периферии. Соотношение этих конкурирующих процессов определяет скорость роста порового давления в материале, а следовательно, и конкретное значение прочности при заданной скорости нагружения.

В исследованиях авторов, проведенных ранее на макроскопических образцах различных флюидонасыщенных хрупких материалов с одномасштабной пористостью, было показано [24, 33], что величина прочности является функцией не просто от скорости деформирования, но отношения скорости деформирования к характерной скорости перераспределения порового флюида в образце. Последняя определяется комбинацией материальных и геометрических параметров, включающей проницаемость твердофазного каркаса k , вязкость жидкости η , характерное расстояние фильтрации W (ширина образца) и характерную величину разности поровых давлений ΔP на расстоянии W (т.е. величину перепада давления на полуширине образца).

Рассматриваемые в настоящей работе бетоны обладают двухмасштабной пористостью, при этом характерная скорость фильтрации определяется, главным

образом, проницаемостью сети капиллярных пор k . Для изучения влияния проницаемости цементного камня, обусловленной связанной сетью капиллярных пор-каналов, на прочность бетона проведено моделирование одноосного сжатия модельных образцов с цементным камнем, содержащим только капиллярную пористость (микропоры отсутствуют). Типичная начальная структура одного из таких образцов соответствует представленной на рис. 1 только при нулевом значении микропористости. При проведении исследования варьировались скорость деформации $\dot{\epsilon}$, вязкость жидкости η , пропускная способность капиллярной поровой сети (ее проницаемость k), ширина образца W .

Результаты моделирования показали, что прочность мезомасштабных образцов водонасыщенного бетона является однозначной функцией отношения характерных скоростей деформации и фильтрации. Установлено, что в качестве безразмерного параметра, характеризующего это отношение может быть использован комбинированный параметр, формулируемый аналогично числу Дарси [11]:

$$Da = \frac{\eta \dot{\epsilon} W^2}{k \Delta P}. \quad (7)$$

Параметр (7) имеет тот же вид, что и число Дарси, однако между ними есть важное различие. В определении числа Дарси фигурирует актуальное (текущее) значение перепада порового давления ΔP (в рассматриваемом случае это разность давлений в центре образца и на свободной боковой поверхности в поперечном к оси нагружения направлении). В процессе деформирования образцов величина числа Дарси непрерывно возрастает (поровое давление в центре образца постоянно увеличивается, а на боковой поверхности остается постоянным и равным атмосферному). Поэтому в соотношении (7) в качестве ΔP используется константа, определяемая как максимальное значение перепада поровых давлений по Терцаги. Она равна разности оценки Терцаги максимально достижимого порового давления в цементном камне ($P_{\text{pore}}^{\max} = \sigma_c^{\text{Cem}} \phi_0$, где ϕ_0 – исходная капиллярная пористость цементного камня) и давления на боковых границах образца (в данном случае $P_{\text{pore}}^{\min} = 10^5$ Па): $\Delta P = P_{\text{pore}}^{\max} - P_{\text{pore}}^{\min}$. Для моделируемого цементного камня $\Delta P \sim 7$ МПа.

Полученная зависимость прочности бетонных образцов от аналога числа Дарси хорошо аппроксимируется сигмоидальной кривой:

$$\sigma_{\text{comp}} = \sigma_{\text{comp}}^{\min} + \frac{\sigma_{\text{comp}}^{\max} - \sigma_{\text{comp}}^{\min}}{(1 + [Da/24,37]^3)}, \quad (8)$$

где σ_{comp} – динамическая прочность бетонного образца на сжатие (в МПа); $\sigma_{\text{comp}}^{\min} \approx 55,6$ МПа – минимальное значение прочности бетонного образца, достигаемое

в условиях пренебрежимо малой фильтрации (при высоких скоростях нагружения или малой проницаемости), $\sigma_{\text{comp}}^{\max} \approx 64$ МПа – максимальное значение прочности, отвечающее прочности сухого образца или водонасыщенного образца, деформируемого квазистатически (когда вытекание жидкости через боковые стенки поддерживает величину порового давления, равную атмосферному). Характерный размах изменения величины прочности составляет $(\sigma_{\text{comp}}^{\max} - \sigma_{\text{comp}}^{\min}) \approx 8$ МПа или 13 % от величины прочности ненасыщенного бетона.

Соответствующая зависимость $\sigma_{\text{comp}}(Da)$ приведена на рис. 2 (кривая 1). Можно видеть, что она характеризуется наличием трех характерных участков.

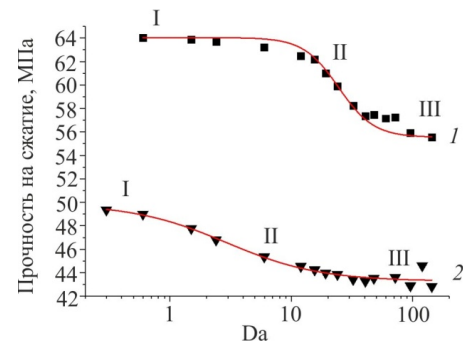


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие водонасыщенных бетонных образцов с различной поровой структурой от аналога безразмерного числа Дарси: кривая 1 – одноуровневая поровая структура бетона (только капиллярные поры); кривая 2 – двухуровневая поровая структура бетона (микропоры и капиллярные поры). I–III – различные стадии, выделяемые на кривых (пояснения в тексте)

Fig. 2. The dependence of the compressive strength of water-saturated concrete samples with different pore structures on the analogue of the dimensionless Darcy number: curve (1) – single-level pore structure of concrete (only capillary pores); curve (2) – two-level pore structure of concrete (micropores and capillary pores). I–III – various stages highlighted on the curves (explanations in the text)

Первый участок (при $Da < 8$) соответствует такой комбинации значений параметров образца, флюида и скорости нагружения, при которой жидкость успевает перераспределяться в объеме каналов и вытекать из образца, поддерживая поровое давление на низком уровне. В этом случае фильтрация (истекание) жидкости является дополнительным механизмом релаксации напряжений в каркасе, прочность образца в этой области значений параметров близка к максимальной и изменяется слабо. Максимальное значение прочности достигается при $Da \rightarrow 0$ и составляет ~ 64 МПа.

Третий участок (при $Da > 143$) соответствует таким значениям комбинации параметров $\dot{\epsilon}$, η , k и W , при которых жидкость не успевает перераспределяться в капиллярной сети в процессе нагружения бетона. В этом случае пористость фактически является закрытой, и жидкость создает избыточное поровое давление,

максимально понижая прочность бетона. Поэтому в интервале $Da > 143$ прочность бетона почти не изменяется и близка к минимальному значению ~ 56 МПа.

Второй участок зависимости $\sigma_{comp}(Da)$, при $8 < Da < 143$, является переходным, на нем соотношение скоростей процессов деформации каркаса и фильтрации поровой жидкости изменяется в широких пределах.

Анализ разрушения образцов, характеризующихся различными значениями числа Дарси свидетельствует об их однотипном характере (рис. 3).

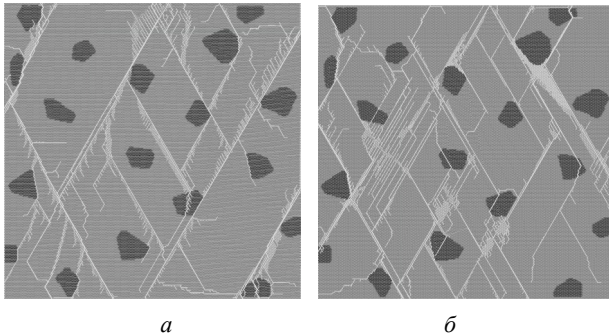


Рис. 3. Разрушение модельных водонасыщенных образцов бетона с капиллярной пористостью и отсутствующей микропористостью при различных значениях безразмерного параметра, аналогичного числу Дарси: а – $Da = 0,6$; б – $Da = 143$

Fig. 3. Fracture of model water-saturated concrete samples with capillary porosity (microporosity is absent) at different values of a dimensionless parameter similar to the Darcy number (a) – $Da = 0.6$, (b) – $Da = 143$

Отметим при этом, что с ростом числа Дарси, соответствующим уменьшению роли процессов фильтрации порового флюида и увеличению скорости роста порового давления в деформируемом образце, возрастает «множественность» разрушения. Действительно, по мере повышения Da увеличивается количество магистральных и соединяющих их вторичных (локальных) трещин, в отдельных областях разрушение приобретает характер дробления материала цементного камня.

3.3. Вклад микропористости в величину динамической прочности бетона с двухмасштабной поровой структурой

Для изучения сравнительного вклада микропор в величину прочности образцов бетонов с двухмасштабной пористостью были рассмотрены образцы, построенные на основе описанных выше образцов с капиллярной пористостью путем явного добавления в их структуру микропористости (см. рис. 1). Как отмечалось выше, диаметр микропор составлял 500 мкм, величина микропористости – 4 % общего объема цементного камня. Микропоры и капиллярные поры полагались связанными (объединенными в единую фильтрационную систему).

Анализ результатов моделирования показал, что зависимость прочности водонасыщенных бетонов с двухмасштабной пористостью от аналога числа Дарси, как и

в случае одномасштабной пористости, аппроксимируется сигмоидальной кривой:

$$\sigma_{comp} = \sigma_{comp}^{\min} + \frac{\sigma_{comp}^{\max} - \sigma_{comp}^{\min}}{(1 + [Da/2, 90]^{1,126})}, \quad (9)$$

где $\sigma_{comp}^{\min} \approx 43,3$ МПа, $\sigma_{comp}^{\max} \approx 49,9$ МПа, (кривая 2 на рис. 2). Можно видеть, что влияние микропористости на процессы фильтрации флюида в поровой сети и изменение прочностных характеристик бетона проявляется во всем рассмотренном диапазоне изменения значений параметра Da (что отличается от бетонов, обладающих только капиллярной пористостью).

В первую очередь, важно отметить существенное общее снижение величины динамической прочности образцов на сжатие. Так, максимальное и минимальное значения прочности значения ($\sigma_{comp}^{\max}$ и $\sigma_{comp}^{\min}$) флюидонасыщенного бетона с двухмасштабной пористостью уменьшились примерно на одинаковую величину (13–14 МПа или около 25 %) в сравнении с аналогичными значениями прочности бетона, цементный камень которого содержит только капиллярную сеть. Это является следствием того, что микропоры в структуре бетона являются сильными локальными концентраторами напряжений, обуславливающими более раннее зарождение повреждений и трещин в цементном камне при нагружении и формирование магистральной трещины при меньших значениях приложенной нагрузки. Данный эффект микропор не связан с поровым флюидом и поэтому в приблизительно равной степени проявляется как при высоких, так и при низких значениях скорости деформирования (т.е. при $Da \rightarrow 0$ и $Da > 143$).

В то же время в области промежуточных значений Da динамика изменения величины прочности образцов от $\sigma_{comp}^{\max}$ к $\sigma_{comp}^{\min}$ отличается от той же для бетонов, имеющих только капиллярную пористость (кривые 1 и 2 на рис. 2). В частности, протяженность участка I зависимости $\sigma_{comp} = \sigma_{comp}(Da)$ сокращается с $0 < Da < 8$ (бетон с одноуровневой пористостью) до $0 < Da < 0,4$ (бетон с двухуровневой пористостью). В то же время стадия III (минимальные значения прочности) начинается при тех же характерных значениях числа Дарси, что и в случае бетона с одноуровневой поровой системой (при $Da > 143$). Таким образом, появление пор крупного масштаба (микропор) обуславливает увеличение протяженности переходной стадии II более чем на порядок величины (с $8 < Da < 143$ до $0,4 < Da < 143$). Описанное изменение зависимости $\sigma_{comp} = \sigma_{comp}(Da)$ является следствием перераспределения жидкости между поровыми пространствами различных масштабов. Действительно, крупные поры (микропоры) являются сильными локальными концентраторами напряжений и деформируются сильнее капиллярных пор. Соответ-

ственно, в процессе деформирования часть поровой жидкости переходит в объем капиллярных пор, повышая в них поровое давление. Ввиду того что характерное расстояние между микропорами много меньше полуширины образца, влияние транспорта порового флюида между микро- и капиллярным поровыми пространствами начинает оказывать влияние на напряженное состояние и прочность бетона уже в области значений Da , соответствующей малым скоростям деформации. Следствием сказанного является более «ранний» переход от стадии I к стадии II (снижение прочности), т.е. динамическая прочность бетона с микропорами начинает существенно снижаться при меньших скоростях деформирования. Последнее можно интерпретировать как меньшую стойкость бетонов, обладающих двухмасштабной поровой структурой, к динамическим нагрузкам в сравнении со статическими нагрузками.

Анализ картин разрушения образцов бетона с двухуровневой пористостью (рис. 4) показал, что оно носит значительно более локализованный характер в сравнении с бетоном с одноуровневой пористостью (см. рис. 3).

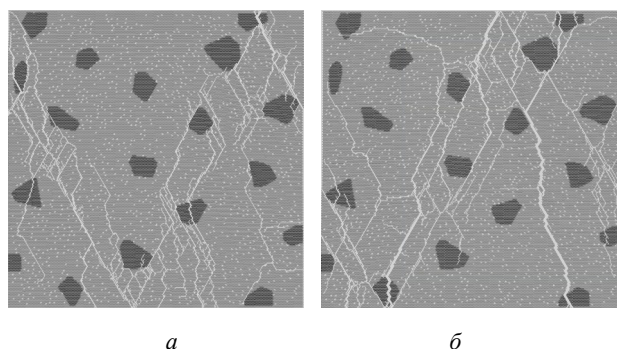


Рис. 4. Разрушение модельных водонасыщенных образцов бетона с двухуровневой поровой структурой при различных значениях безразмерного параметра, аналогичного числу Дарси: а – $Da = 0,4$; б – $Da = 143$. Микропоры интегрированы в капиллярную поровую сеть

Fig. 4. Fracture of model water-saturated concrete samples with a two-level pore structure at different values of a dimensionless parameter similar to the Darcy number: (a) – $Da = 0.4$, (b) – $Da = 143$. Micropores are integrated into the capillary pore network

Данная закономерность (склонность к локализации разрушения) является типичной для хрупких материалов, содержащих в структуре относительно крупные включения с пониженными механическими характеристиками (в частности, поры). Исследование влияния процессов перераспределения поровой жидкости на особенности разрушения показало, что при малых значениях Da (соответствующих малым скоростям деформирования) система трещин, как правило, более разветвлена, чем при больших Da (соответствующих большим скоростям деформирования). Отметим также, что при малых Da разрушение агрегатов носит преимущественно интерфейсный характер («отслоение» включений от матрицы на отдельных участках межфазной границы), а сами агрегаты, как правило, остаются целы-

ми. При больших значениях Da многократно возрастает количество поврежденных или разрушенных агрегатов.

Таким образом, в водонасыщенных бетонах с двухуровневой пористостью величина динамической прочности и особенности разрушения определяются как объемным содержанием крупных пор, так и перераспределением поровой воды в капиллярной поровой системе (последнее характеризуется числом Дарси). В частности, зависимость прочности образцов от параметра Da аналогична той же в образцах с капиллярной пористостью, однако характеризуется другими численными значениями прочности и интервалов Da , отвечающих основным стадиям. Так, наличие в бетоне микропористости, интегрированной в капиллярную поровую сеть, увеличивает вклад порового флюида в снижение прочностных свойств в области Da , соответствующей квазистатическому нагружению.

Влияние интегрированности микропор в капиллярную поровую сеть высокопрочных водонасыщенных бетонов исследовалось на основе сопоставления результатов моделирования для образцов с микропорами, общающимися с капиллярной поровой сетью, и образцов с «закупоренными» микропорами. Во всех случаях микропоры, как и капиллярные поры, были заполнены жидкостью.

Анализ механического отклика бетонов с закупоренными микропорами показал, что динамическая прочность образцов при сжатии также хорошо аппроксимируется сигмоидальной функцией, как и в случае бетонов с микропорами, интегрированными в капиллярную поровую сеть:

$$\sigma_{\text{comp}} = \sigma_{\text{comp}}^{\min} + \frac{\sigma_{\text{comp}}^{\max} - \sigma_{\text{comp}}^{\min}}{(1 + [Da/5, 46]^{0.88})}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{comp}}^{\min} \approx 38,3$ МПа, $\sigma_{\text{comp}}^{\max} \approx 50,3$ МПа.

Сопоставление зависимостей $\sigma_{\text{comp}} = \sigma_{\text{comp}}(Da)$ для этих бетонов (рис. 5) показало, что при малых значениях Da , когда роль процессов фильтрации порового флюида пренебрежимо мала, связность микро- и капиллярного поровых пространств не оказывает влияние на величину прочности. Вклад данного фактора становится значимым на стадии II (при $Da > 1,43$ – $2,86$) – прочность на сжатие бетона с изолированными микропорами снижается примерно вдвое быстрее, чем в случае бетона со связанными между собой поровыми пространствами. На стадии III (при $Da > 143$), соответствующей «большим» скоростям нагружения бетона и минимальному вкладу фильтрации флюида через капиллярную поровую сеть, разница значений прочности достигает 13–15 %.

Таким образом, «изоляция» микропор от капиллярной поровой сети снижает динамическую прочность бетона, но при этом почти не изменяет интервалов зна-

чений комбинации параметров, входящих в Da , отвечающих различным стадиям кривой $\sigma_{comp}(Da)$.

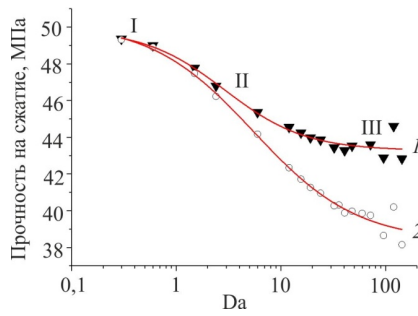


Рис. 5. Зависимость прочности на сжатие водонасыщенных бетонных образцов с двухмасштабной поровой структурой от величины аналога числа Дарси. Кривая 1 – микропоры интегрированы в капиллярную поровую сеть; кривая 2 – микропоры изолированы от капиллярной поровой сети («закупорены»)

Fig. 5. The dependence of the compressive strength of water-saturated concrete samples with a two-scale pore structure on the value of the analog of the Darcy number. Curve (1) – micropores are integrated into the capillary pore network, curve (2) – micropores are isolated from the capillary pore network (“clogged”)

Анализ картин разрушения бетонов подтвердил обнаруженные закономерности. Так, при малых значениях Da ($Da < 2,86$) характер разрушения бетонов с «изолированной» и «неизолированной» микропористостью почти одинаков (см. рис. 4, б). При $Da = 143$ наблюдается различие, касающееся пути распространения разрушающих трещин и фрагментации образца. Так, образцы бетона с «закупоренными» микропорами разделяются на большое число приблизительно равноосных фрагментов разного размера (рис. 6, б). Разрушение бетона с микропорами, интегрированными в поровую сеть, носит существенно более локализованный характер – разделение на крупные фрагменты, вытянутые в направлении оси нагружения (рис. 4, б).

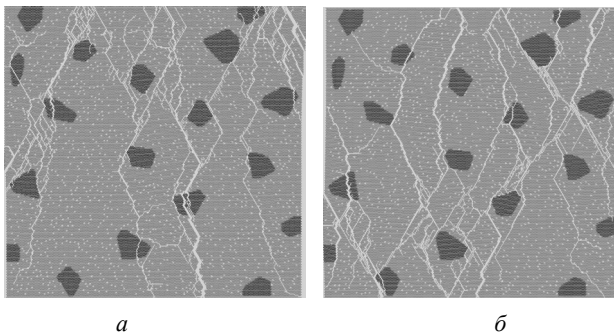


Рис. 6. Разрушение модельных водонасыщенных образцов бетона с двухуровневой поровой структурой при различных значениях безразмерного параметра, аналогичного числу Дарси: а – $Da = 0,4$; б – $Da = 143$. В обоих образцах микропоры «изолированы» от капиллярной сети

Fig. 6. Fracture of model water-saturated concrete samples with a two-level pore structure at different values of a dimensionless parameter similar to the Darcy number: (a) – $Da = 0,4$, (b) – $Da = 143$. In both samples micropores are isolated from the capillary pore network

Таким образом, изолированность микропор оказывает значимое влияние и на особенности разрушения в области значений Da , которая соответствует достаточно большим скоростям нагружения ($Da > 2,86$).

Выводы

На основе компьютерного моделирования механического поведения водонасыщенного бетона при одноосном сжатии выявлены два фактора, определяющие величину динамической прочности тяжелых водонасыщенных бетонов с двухмасштабной поровой структурой.

Первый фактор – мобильность поровой жидкости в сети капиллярных пор, которая определяет скорость снижения и выравнивания напряжений в пористом каркасе за счет фильтрации. Он определяет нелинейный характер изменения прочности со скоростью нагружения и может быть эффективно охарактеризован логистической зависимостью динамической прочности от числа Дарси (Da).

Второй фактор – связанность крупных микропор с капиллярной сетью. Он обуславливает снижение концентрации напряжений в микропорах (наиболее сильных концентраторах напряжений) за счет фильтрации «избыточной» поровой жидкости в капиллярную поровую сеть и одновременно способствует возрастанию концентрации напряжений в окружающем микропоры цементном камне (за счет роста порового давления в капиллярах). Действие данного фактора определяет расширение скоростного интервала, в котором величина прочности существенно зависит от скорости нагружения, более чем на порядок величины.

Вклады перечисленных факторов в изменение величины динамической прочности водонасыщенного бетона являются аддитивными и приблизительно равнозначными, а их суммарный вклад при «высоких» скоростях деформирования достигает 25 %. Таким образом, прочность водонасыщенных бетонов определяется не только содержанием микропор как наиболее крупных концентраторов напряжений, но в не меньшей степени – их интегрированностью в капиллярную пористость.

Рассмотренное в настоящей работе условие одноосного сжатия (его можно рассматривать как эквивалент трехосного испытания образца в сосуде с жидкостью, находящейся при атмосферном давлении) является намного более «мягким» в сравнении с типичными условиями функционирования представительных объемов бетона. Данное исследование является только первым шагом в направлении изучения прочности и характера разрушения представительных объемов водонасыщенных бетонов в реальных (стесненных) условиях нагружения. Стесненные условия нагружения реализуются как во внутренних областях нагружаемых массивных бетонных элементов, так и в приповерхностных облас-

тах бетона в окрестности пятен контактного взаимодействия с плавучими массивными объектами. Анализ поведения представительных объемов бетона в условиях стесненного сжатия и при различных значениях порового давления на границах (что отвечает различной глубине погружения в водную среду) является предметом дальнейших исследований.

Результаты проведенного исследования обладают большой степенью общности и вносят важный вклад в развитие современных представлений о сложных многофакторных процессах, определяющих наступление предельного состояния флюидонасыщенных хрупких гетерогенных материалов с многомасштабной поровой структурой. В частности, эти результаты могут применяться при прогнозировании интенсивности процессов деградации и абразивного изнашивания поверхностных слоев морских бетонных сооружений, функционирующих в арктических условиях, при динамическом кон-

тактном нагружении морскими льдами и/или плавучими объектами.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, № 7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники».

Acknowledgments

The authors acknowledge the support from Presidium of the Russian Academy of Sciences, the Basic Research Program I.7 "New developments in promising areas of energetics, mechanics and robotics".

Библиографический список

1. Wong L., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation // *Acta Geotechnica*. – 2015. DOI: 10.1007/s11440-015-0407-7
2. Dynamic failure of dry and fully saturated limestone samples based on incubation time concept / Yu.V. Petrov, I.V. Smirnov, G.A. Volkov, A.K. Abramian, A.M. Bragov, S.N. Verichev // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2017. – Vol. 9. – P. 125-134. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.09.004
3. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. – USA: McGraw-Hill Education, 2013. – 704 p.
4. Khamrat S., Archeeploha S., Fuenkajorn K. Pore pressure effects on strength and elasticity of ornamental stones // *ScienceAsia*. – 2016. – Vol. 42. – P. 121–135. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2016.42.121
5. Duda M., Renner J. The weakening effect of water on the brittle failure strength of sandstone // *Geophysical Journal International*. – 2013. – Vol. 192, iss. 3. – P. 1091–1108. DOI: 10.1093/gji/ggs090
6. Zhang G., Li X., Li Z. Experimental study on static mechanical properties and moisture contents of concrete under water environment // *Sustainability*. – 2019. – Vol. 11, no. 2962(14). DOI: 10.3390/su11102962
7. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete / V.G. Cappellesso, N. dos Santos Petry, D.C.C. Dal Molin, A.B. Mazuero // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. – 2016. – Vol. 1, no 9. DOI: 10.1007/s41024-016-0012-7
8. Костина А.А., Желнин М.С., Плехов О.А. Анализ моделей эволюции пористости при паротепловом воздействии на продуктивный пласт // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 4. – С. 91–105. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.09
9. Influence of free water on dynamic behavior of dam concrete under biaxial compression / W. Hao, W. Licheng, S. Yupu, W. Jishong // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 112. – P. 222-231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.090
10. Wang Q., Liu Y., Peng G. Effect of water pressure on mechanical behavior of concrete under dynamic compression state // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 125. – P. 501-509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.058
11. Heap M.J., Wadsworth F.B. Closing an open system: pore pressure changes in permeable edifice rock at high strain rates // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2016. – Vol. 315. – P. 40–50. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.011
12. Influence of Water Pressure on the Mechanical Properties of Concrete after Freeze-Thaw Attack under Dynamic Triaxial Compression State / R. Wang, Y. Li, Y. Li, F. Xu, X. Li, T. Fu // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2019. – Article ID 8702324(12). DOI: 10.1155/2019/8702324
13. Bekker A.T., Sabodash O.A., Kovalenko R.G. Probabilistic modeling of extreme value distributions of ice loads on "Molikpaq" platform for Sakhalin-II project // *Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. – Nantes, France, 2013. – Article ID V006T07A001. DOI: 10.1115/OMAEE2013-10008
14. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Numerical simulation of ice abrasion on offshore structures // *Ice Research for a Sustainable Environment: Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice*. – Dalian, China, 2012. – Vol. I-II. – P. 897–906.
15. Bekker A.T., Sabodash O.A., Kochev A.Yu. Analysis of ice loads on offshore structures for Okhotsk sea oil&gas fields // *Structures, Safety and Reliability: Proceedings of the ASME 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. – Rotterdam, Netherlands, 2011. – Vol. II. – P. 439–448. DOI: 10.1115/OMAEE2011-49596
16. Peng S., Zhang J. Engineering geology for underground rocks. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 319 p.
17. Vásárhelyi B. Influence of water content on the strength of rock // *Engineering Geology*. – 2006. – Vol. 84. – P. 70–74. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.11.011
18. Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms / X. Cai, Z. Zhou, K. Liu, X. Du, H. Zang // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – Article number 4450. DOI: 10.3390/app9204450
19. Water saturation effects on dynamic fracture behavior of sandstone / Z. Zhou, X. Cai, D. Ma, X. Du, L. Chen, H. Wang,

H. Zang // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 114. – P. 46–61. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.12.014

20. Abrasive wear evolution in concrete pavements / A. Garcia, D. Castro-Fresno, J.A. Polanco, C. Thomas // Road Materials and Pavement Design. – 2012. – Vol. 13. – P. 534–538. DOI: 10.1080/14680629.2012.694094

21. Experimental study of concrete abrasion due to ice friction – Part I: set-up, ice abrasion vs. material properties and exposure conditions / E. Møen, K.V. Høiseth, B. Leira, K.V. Høyland // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 110. – P. 183–201. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.09.008

22. Kim J.-H., Kim Y. Numerical simulation of concrete abrasion induced by unbreakable ice floes // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 11. – P. 59–69. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2018.01.003

23. A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials / S.G. Psakhie, E.V. Shilko, A.S. Grigoriev, S.V. Astafurov, A.V. Dimaki, A.Yu. Smolin // Engineering Fracture Mechanics. – 2014. – Vol. 130 – P. 96–115. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.034

24. A coupled discrete element-finite difference approach for modeling mechanical response of fluid-saturated porous materials / S.G. Psakhie, A.V. Dimaki, E.V. Shilko, S.V. Astafurov // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2016. – Vol. 106, no. 8. – P. 623–643. DOI: 10.1002/nme.5134

25. Konovalevko Ig.S., Shilko E.V., Konovalevko Iv.S. The study of the dependence of mechanical properties and fracture of water-saturated high-strength concrete on the parameters of pore structure // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 221. – Article number 01020. DOI: 10.1051/epjconf/201922101020

26. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. – М.: ACB, 2003. – 500 с.

27. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. – 208 с.

28. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. – London and New-York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. – 624 p.

29. Caldarone M.A. High-Strength Concrete: A Practical Guide. – London and New-York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 272 p.

30. Nayak N.V., Jain A.K. Handbook on advanced concrete technology. – Alpha Science, 2012. – 646 p.

31. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of discrete element method for rock engineering: theory and applications. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – 562 p.

32. Bicanic N. Discrete element methods // Encyclopaedia of Computational Mechanics / E. Stein, R. de Borst, T.J.R. Hughes (eds.). – New York: Wiley, 2017. – Vol. 2. – P. 411–448.

33. Влияние фильтрации флюида на прочность пористых флюидонасыщенных хрупких материалов / А.В. Димаки, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров, С.Г. Псахье // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 220–247. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.13.

34. Nikolaevsky V.N. Geomechanics and fluidodynamics with application to reservoir engineering. – Kluwer Academic: Berlin, 1996. – 352 p.

35. Numerical modeling of plastic deformation and failure around a wellbore in compaction and dilation modes / A. Garavand, Yu.P. Stefanov, Yu.L. Rebetsky, R.A. Bakeev // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics – 2020. – pp. 1–28. DOI: 10.1002/nag.3041.

36. Stefanov Yu.P., Tataurova A.A. Effect of friction and strength properties of the medium on shear band formation in thrust structures // Physica Mesomechanics. – 2019. – Vol. 22, no. 6. – P. 463–472. DOI: 10.1134/S1029959919060031

37. Alejano L.R., Bobet A. Drucker–Prager Criterion // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2012. – Vol. 45, no. 6. – P. 995–999. DOI: 10.1007/s00603-012-0278-2

38. Mechanics of Fluid Flow / K.S. Basniev, N.M. Dmitriev, G.V. Chilingar, M. Gorfunkle, A.G. Mohammed Nejad. – John Wiley & Sons, 2012. – 576 p.

39. Influences of strain-rate and stress-state on dynamic response of cement mortar / L.-L. Wang, S.-Q. Shi, J.-Y. Chen, D.-J. Huang, L.-J. Shen // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2003. – Vol. 3, no. 3. – P. 419–433. DOI: 10.1142/S0219455403000951

40. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта / А.Д. Алексеев [и др.] // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, № 4. – С. 65–74.

41. Park K., Paulino G.H. Cohesive zone models: a critical review on traction-separation relationships across fracture surfaces // Applied Mechanics Reviews. – 2011. – Vol. 64. – P. 060802/1 – 060802/20. DOI: 10.1115/1.4023110

42. Geubelle P.H., Baylor J.S. Impact-induced delamination of composites: A 2D simulation // Composites Part B: Engineering. – 1998. – Vol. 29. – P. 589–602.

43. Influence of features of interphase boundaries on mechanical properties and fracture pattern in metal-ceramic composites / S. Psakhie, V. Ovcharenko, Yu. Baohai, A. Mokhovikov // Journal of Materials Science and Technology. – 2013. – Vol. 29. – P. 1025–1034. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.08.002

References

1. Wong, L., Maruvanchery, V., Liu, G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*, 2015. DOI: 10.1007/s11440-015-0407-7.

2. Petrov, Yuri V., Smirnov, Ivan V., Volkov, Grigory A., Abramian, Andrei K., Bragov, Anatoliy M., Verichev, Stanislav N. Dynamic failure of dry and fully saturated limestone samples based on incubation time concept. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, vol. 9, pp. 125–134. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.09.004.

3. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. *USA, McGraw-Hill Education*, 2013, 704 p.

4. Khamrat, S., Archeeploha, S., Fuenkajorn, K. Pore pressure effects on strength and elasticity of ornamental stones.

ScienceAsia, 2016, vol. 42, pp. 121–135. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2016.42.121.

5. Duda, M. Renner, J. The weakening effect of water on the brittle failure strength of sandstone. *Geophysical Journal International*, 2013, vol. 192, iss. 3, pp. 1091–1108. DOI: 10.1093/gji/ggs090.

6. Zhang, G., Li, X., Li, Z. Experimental Study on Static Mechanical Properties and Moisture Contents of Concrete Under Water Environment. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 2962(14). DOI:10.3390/su11102962.

7. Cappellesso, V.G., dos Santos Petry, N., Dal Molin, D.C.C., Mazuero, A.B. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2016, vol. 1, no 9. DOI: 10.1007/s41024-016-0012-7.

8. Kostina A.A., Zhelnin M.S., Plehov O.A. Analiz modelej jevoljucii poristosti pri paroteplovom vozdeystvii na produktivnyj plast [Analysis of models for porosity evolution in reservoir during steam injection]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 4, pp. 91-105.
9. Hao, W., Licheng, W., Yupu, S., Jishong, W. Influence of free water on dynamic behavior of dam concrete under biaxial compression. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 112, pp. 222-231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.090.
10. Wang, Q., Liu, Y., Peng, G. Effect of water pressure on mechanical behavior of concrete under dynamic compression state. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 125, pp. 501-509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.058.
11. Heap, M.J., Wadsworth, F.B. Closing an open system: pore pressure changes in permeable edifice rock at high strain rates. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2016, vol. 315, pp. 40-50. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.011.
12. Wang, R., Li, Y., Li, Y., Xu, F., Li, X., Fu, T. Influence of Water Pressure on the Mechanical Properties of Concrete after Freeze-Thaw Attack under Dynamic Triaxial Compression State. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, Article ID 8702324(12). DOI: 10.1155/2019/8702324.
13. Bekker A.T., Sabodash O.A., Kovalenko R.G. Probabilistic modeling of extreme value distributions of ice loads on "Molikpaq" platform for Sakhalin-II project. *Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Nantes, France, 2013, Article ID V006T07A001. DOI: 10.1115/OMAE2013-10008.
14. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Numerical simulation of ice abrasion on offshore structures. Ice Research for a Sustainable Environment: *Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice*. Dalian, China, 2012, vol. I-II, pp. 897-906.
15. Bekker A.T., Sabodash O.A., Kochev A.Yu. Analysis of ice loads on offshore structures for Okhotsk sea oil&gas fields. *Structures, Safety and Reliability: Proceedings of the ASME 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Rotterdam, Netherlands, 2011, vol. II, pp. 439-448. DOI: 10.1115/OMAE2011-49596.
16. Peng S., Zhang J. Engineering Geology for Underground Rocks. *Berlin Heidelberg, Springer-Verlag*, 2007, 319 p.
17. Vászárhelyi, B. Influence of water content on the strength of rock. *Engineering Geology*, 2006, vol. 84, pp. 70-74. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.11.011.
18. Cai, X., Zhou, Z., Liu, K., Du, X., Zang, H. Water-Weakening Effects on the Mechanical Behavior of Different Rock Types: Phenomena and Mechanisms. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, Article number 4450. DOI: 10.3390/app9204450.
19. Zhou Z.; Cai X.; Ma D.; Du X.; Chen L.; Wang H.; Zang H. Water saturation effects on dynamic fracture behavior of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 114, pp. 46-61. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.12.014.
20. Garcia, A., Castro-Fresno, D., Polanco, J.A., Thomas, C. Abrasive wear evolution in concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 2012, vol. 13, pp. 534-538. DOI: 10.1080/14680629.2012.694094.
21. Møen, E., Høiseth, K.V., Leira, B., Høyland, K.V. Experimental study of concrete abrasion due to ice friction – Part I: set-up, ice abrasion vs. material properties and exposure conditions. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, vol. 110, pp. 183-201. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.09.008.
22. Kim, J.-H., Kim, Y. Numerical simulation of concrete abrasion induced by unbreakable ice floes. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2019, vol. 11, pp. 59-69. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2018.01.003.
23. Psakhie, S.G., Shilko, E.V., Grigoriev, A.S., Astafurov, S.V., Dimaki, A.V., Smolin, A.Yu. A mathematical model of particle-particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic-plastic materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, vol. 130, pp. 96-115. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.034.
24. Psakhie, S.G., Dimaki, A.V., Shilko, E.V., Astafurov, S.V. A coupled discrete element-finite difference approach for modeling mechanical response of fluid-saturated porous materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2016, vol. 106, no. 8, pp. 623-643. DOI: 10.1002/nme.5134.
25. Konovakenko, Ig.S., Shilko, E.V., Konovakenko, Iv.S. The study of the dependence of mechanical properties and fracture of water-saturated high-strength concrete on the parameters of pore structure. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 221, Article number 01020. DOI: 10.1051/epjconf/201922101020.
26. Bazhenov Ju.M. Tehnologija betona [Concrete technology]. *Moscow, ASV*, 2003, 500 p.
27. Berg O.Ja., Shherbakov E.N., Pisanko G.N. Vysokoprochnyj beton [High strength concrete]. *Moscow, Izd-vo literatury po stroitel'stvu*, 1971, 208 p.
28. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. *London and New-York, CRC Press, Taylor & Francis Group*, 2019, 624 p.
29. Caldarone M.A. High-Strength Concrete: A Practical Guide. *London and New York, CRC Press, Taylor & Francis Group*, 2008, 272 p.
30. Nayak N.V., Jain A.K. Handbook on Advanced Concrete Technology. *Alpha Science*, 2012, 646 p.
31. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of discrete element method for rock engineering: theory and applications. *Amsterdam, Elsevier*, 2007, 562 p.
32. N. Bicanic. Discrete element methods / In: Encyclopaedia of Computational Mechanics. Stein E, de Borst R, Hughes TJR (eds), *New York, Wiley*, 2017, vol. 2, pp. 411–448.
33. Dimaki A.V., Shilko E.V., Astafurov S.V., Psakhie S.G. The influence of fluid filtration on the strength of porous fluidsaturated brittle materials, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 220-247. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.13.
34. Nikolaevsky V.N. Geomechanics and fluidodynamics with application to reservoir engineering. *Kluwer Academic, Berlin*, 1996, 352 p.
35. Garavand, A., Stefanov, Yu.P., Rebetsky, Yu.L., Bakeev, R.A. Numerical modeling of plastic deformation and failure around a wellbore in compaction and dilation modes. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2020, pp. 1-28. DOI: 10.1002/nag.3041.
36. Stefanov, Yu.P., Tataurova, A.A. Effect of Friction and Strength Properties of the Medium on Shear Band Formation in Thrust Structures. *Physcial Mesomechanics*, 2019, vol. 22, no.6, pp. 463-472. DOI: 10.1134/S1029959919060031.
37. Alejano, L.R., Bobet, A. Drucker–Prager Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, vol. 45, no. 6, pp. 995-999. DOI: 10.1007/s00603-012-0278-2.
38. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Chilingar G.V. et al. Mechanics of Fluid Flow. *John Wiley & Sons*, 2012, 576 p.
39. Wang, L.-L., Shi, S.-Q., Chen, J.-Y., Huang, D.-J., Shen, L.-J. Influences of strain-rate and stress-state on dynamic response of cement mortar. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2003, vol. 3, no. 3, pp. 419-433. DOI: 10.1142/S0219455403000951.
40. A.D. Alekseev et al. Diffuzionno-fil'tracionnaja model' vyhoda metana iz ugol'nogo plasta [Diffusion-filtering model methane yield from the coal seam]. *Journal of Technical Physics*, 2007, vol. 77, no. 4, pp. 65-74.
41. Park, K., Paulino, G.H. Cohesive zone models: a critical review on traction-separation relationships across fracture surfaces. *Applied Mechanics Reviews*, 2011, vol. 64, pp. 060802/1 – 060802/20. DOI: 10.1115/1.4023110.
42. Geubelle, P.H., Baylor, J.S. Impact-induced delamination of composites: A 2D simulation. *Composites Part B: Engineering*, 1998, vol. 29, pp. 589–602.
43. Psakhie, S., Ovcharenko, V., Baohai, Yu., Mokhovikov, A. Influence of features of interphase boundaries on mechanical properties and fracture pattern in metal-ceramic composites. *Journal of Materials Science and Technology*, 2013, vol. 29, pp. 1025-1034. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.08.002.