

# Компьютерное моделирование трещины бетонной части подводного гидротехнического сооружения



**Раззак  
Алаа  
Ваххаб  
Раззак**

аспирант, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: alaawahhabrazzak@yandex.com



**Алехин  
Владимир  
Николаевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой САПРос, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: referetsf@yandex.ru

В данной статье были использованы численные методы в рамках программного комплекса «ABAQUS», что позволило изучить процесс формирования и развития трещин в бетоне гидротехнических сооружений. Исследуемым объектом является бетон, расположенный на максимальной глубине гидротехнического сооружения, данная часть подвержена значительному гидростатическому давлению. В результате использования «ABAQUS» для анализа было достигнуто подробное понимание динамики трещины в критических участках гидротехнических сооружений.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, трещины в бетоне, напряжения растяжения, давление воды, компьютерное моделирование.

*Razzaq A. W. R., Alekhin V. N.*

*Computer simulation of a crack in concrete part of an underwater hydraulic structure*

*In this article numerical methods were used within the framework of the «ABAQUS» software, which made it possible to study the process of formation and development of cracks in concrete of hydraulic structures. The object under study is concrete located at the maximum depth of a hydraulic structure, this part is subject to significant hydrostatic pressure. Using «ABAQUS» for analysis, a detailed understanding of crack dynamics in critical sections of hydraulic structures was achieved.*

*Keywords: hydraulic structures, cracks in concrete, tensile stresses, water pressure, computer simulation.*

## Введение

Гидротехнические сооружения играют важную роль в инфраструктуре гражданского строительства. При этом различные факторы, как на этапе проектирования, так и в ходе эксплуатации, влияют на появление трещин, что негативно сказывается на их прочности и долгосрочной службе. Трещины могут возникать по множеству причин. Усадочные трещины образуются преимущественно на поверхности сооружений [17; 19], температурные трещины возникают вследствие тепловыделения при заливке бетона, что характерно для больших сооружений, таких как плотины [20; 22], коррозионные трещины появляются из-за взаимодействия воды с бетоном, что приводит к коррозии арматуры и последующему растрескиванию бетона [7; 18]. Эти трещины не только достигают поверхности бетона, но и серьезно угрожают его структурной целостности. Все чаще на международном уровне, особенно на плотинах, регистрируются случаи трещинообразования под воздействием высокого давления воды, приводящие к опасным последствиям, включая проникновение воды в бетон. Это может вызвать разрушение конструкции из-за углубления трещин [11; 12; 15].

Для анализа последствий трещинообразования применяются лабораторные эксперименты и методы численного моделирования. В фокусе исследований чаще оказываются малые образцы бетона для выявления основных характеристик его разрушения. Благодаря численному моделированию стала возможной оценка механизма развития трещин при рассмотрении более крупных моделей [25].

В результате многочисленных исследований, проведенных на бетонных образцах, было установлено, что воздействие гидростатического давления вдоль трещин может способствовать их гидравлическому растрескиванию в условиях эксплуатации гидротехнических сооружений [9]. Особенно это актуально для бетона, который находится в состоянии постоянного контакта с водой, что приводит к увеличению риска гидравлического разрыва трещин в его структуре.

Исследовательские группы [8; 10] внимательно изучили, как распределяется давление воды внутри трещин, применяя для этой цели модели зон адгезии и технику конечных элементов. В ходе этих работ был получен широкий спектр данных, демонстрирующих различные аспекты взаимодействия воды с бетонными конструкциями.

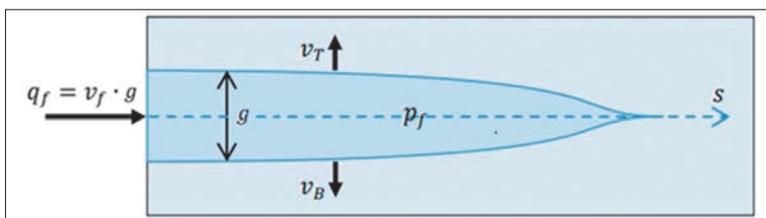


Иллюстрация 1. Продольный поток воды в трещине [28]

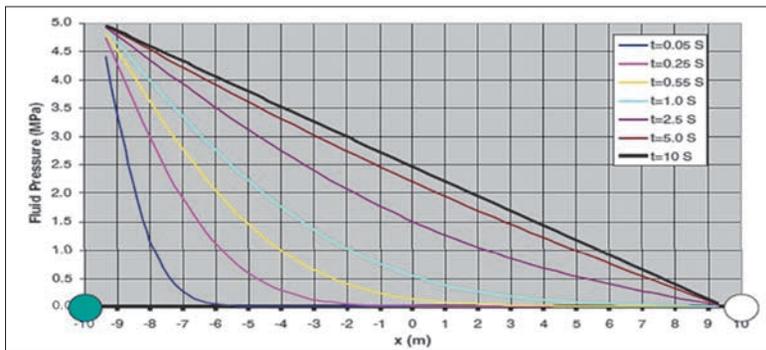


Иллюстрация 3. Распределение давления воды в одной трещине со временем [23]

Стратегически значимым выводом данных исследований является понимание, что процесс гидравлического разрыва значительно снижает давление воды, преобразуя его в механическую силу, напрямую воздействующую на увеличение трещин в бетонных структурах. Это обстоятельство особенно важно учитывать в контексте эксплуатационных условий, при которых бетон постоянно находится под водой [14; 16; 27].

Исследования подчеркивают важность учета гидравлического давления в процессе проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений, чтобы минимизировать риски гидравлического растрескивания и разрыва трещин в конструкционном бетоне.

#### Поток воды в трещинах

Процесс увеличения существующей трещины за счет давления жидкости известен как расширение трещины под влиянием жидкости. В бетонных структурах, наподобие гравитационных дамб, это явление обусловлено реакцией на повышенное давление воды. Вода, проникающая в трещины, заполняет их, проникая глубоко в структуру бетона, что приводит к снижению его несущей способности и структурной целостности [21].

Это явление может быть обусловлено как статическими, так и динамическими нагрузками. При медленном нагружении, т. е. в отсутствие потока жидкости, наблюдается расширение статической трещины. В отличие от этого, при более высокой скорости нагрузки происходит динамиче-

ское распространение, при котором жидкость активно входит в трещину. В зависимости от геометрии трещины поток внутрь нее может быть как ламинарным, так и турбулентным. Движение жидкости в трещине приводит к постепенному уменьшению давления от отверстия к ее концу. Помимо типа потока, на величину падения давления также влияет природа жидкости. Вязкие жидкости вызывают большие потери из-за трения вдоль границ трещины, что ведет к заметному падению давления [13].

Продольный поток жидкости может быть определен в трещине с помощью основных уравнений потока жидкости [28]:

– теория смазки Рейнольдса, определяемая уравнением непрерывности:

$$g + \frac{dq_f}{ds} + v_T + v_B = 0; \quad (1)$$

– уравнение импульса для несжимаемого потока и ньютоновских жидкостей через узкие параллельные пластины:

$$q_f = \frac{g^3}{12 \cdot \mu_f} \cdot \frac{dp_f}{ds}, \quad (2)$$

где

$g$  – разрыв трещины [м<sup>2</sup>];

$v_f$  – нормальные скорости потока воды [м/с];

$q_f = v_f \cdot g$  – поток воды для гидро-разрыва пласта [м<sup>3</sup>/с];

$v_T$  and  $v_B$  – нормальные скорости потока воды, просачивающейся в окружающую пористую среду [м/с];

$\alpha_f$  – вязкость воды [Па·с];

$p_f$  – давление воды вдоль координат разрыва  $s$  [Па].

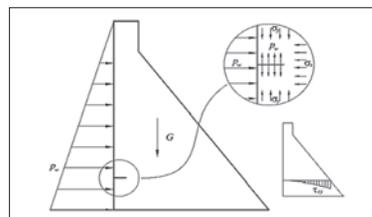


Иллюстрация 2. Напряженное состояние вокруг трещины в гравитационной плотине [24]

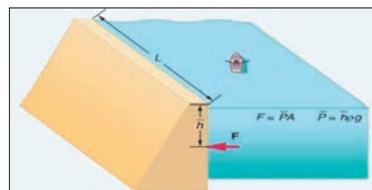


Иллюстрация 4. Давление воды на поверхность плотины. Источник: <https://www.collegesidekick.com/study-guides/physics/11-4-variation-of-pressure-with-depth-in-a-fluid> (дата обращения: 21.08.2024)

#### Давление воды в трещинах

В случае горизонтальных трещин факторами, способствующими их расширению, служат вертикальные механические напряжения, вызванные растяжением или сжатием ( $\sigma_y$ ), и давление воды ( $P_w$ ) внутри этих трещин [24].

Исследование, выполненное Шеном и его коллегами в 2014 г., демонстрирует динамичность изменения давления воды во времени (см. Иллюстрацию 3). На данном рисунке визуализирован процесс перемещения воды из точки подачи (отмечено зеленым) к точке отвода (отмечено белым). Цвета на изображении обозначают разную интенсивность распределения воды в различные моменты времени, с нелинейным изменением распределения до момента достижения финальной стадии. Черным цветом отмечено распределение воды в ее конечном, стабильном состоянии [23].

#### Расчет давления воды на поверхности плотины

Основная задача постройки плотин заключается в эффективном удержании воды. С этой целью необходимо разработать конструкцию, способную сопротивляться нагрузкам под воздействием давления воды. Важно отметить, что сила, генерируемая этим давлением, проявляется величиной, равной одной трети от высоты водного столба. К тому же при разработке проекта критически важно учесть максимально возможный уровень воды, так как вода, проникая в бетон, уменьшает его структурную прочность и увеличивает вероятность химических повреждений [2].

Как правило, в конструкции плотины предусмотрено два уровня воды.

**Полный рабочий уровень**

На уровне полной оперативности должна поддерживаться высота воды в плотине. Строительство верхней части плотины осуществляется выше этого критического уровня. Дополнительно все шлюзы плотины предназначены для функционирования при достижении данного уровня воды, чтобы соответствовать проектным стандартам.

В плотинах, возведенных с целью генерации электричества, обычной практикой является поддержание уровня воды на заданной отметке. При возрастании объема воды электрогенерация увеличивается, обеспечивая стабильность уровня воды в плотине, а не ее перераспределение.

**Максимальный уровень воды**

Максимально возможный уровень воды определяется как высота, которой может достичь водоем в случае непредвиденного повышения уровня воды, превышая оперативные показатели. Структура плотины должна быть рассчитана на способность противостоять такому увеличению без критических последствий, в то время как сбросная система должна эффективно управлять излишками воды, не допуская превышения максимальной отметки. Применяемые при строительстве гидротехнических сооружений бетонные смеси должны обеспечивать высокую степень морозостойкости и гидроизоляции [4].

Планировка плотины осуществляется с учетом максимального уровня воды, и на этапе проектирования необходимо тщательно анализировать воздействующие силы на структуру при максимальной водной нагрузке, что критически важно для обеспечения ее стабильности и безопасности [5].

Давление воды может быть определено с помощью основных уравнений гидростатики — закон Паскаля [1].

Давление воды на плотину в любой точке можно рассчитать как:

$$P = (\rho_w \cdot g \cdot h) + P_0, \tag{3}$$

где  
 $P$  — давление воды [Па];  
 $P_0$  — давление на поверхности воды, принимается равным атмосферному [Па];  
 $\rho_w$  — плотность воды [кг/м<sup>3</sup>];  
 $g$  — ускорение свободного падения [м/с<sup>2</sup>];  
 $h$  — глубина воды [м].

Таблица 1. Давление воды на плотину на разных глубинах. Автор А. В. Р. Раззак

h (m)	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	g (м/с <sup>2</sup> )	P (Па)
0	1000	9,81	100000
100	1000	9,81	1081000

В данном обзоре рассматривается воздействие водной массы на условную плотину, возвышающуюся на 100 м. Плотность воды определена как  $\rho_w = 1000$  (кг/м<sup>3</sup>), ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>, атмосферное давление 100000 Па (Таблица 1).

Анализ давления воды на данную плотину на различных уровнях глубины проведен с использованием формулы (3). В Таблице 1 показано, как давление воды возрастает пропорционально высоте водного столба.

**Компьютерное моделирование трещины в бетоне**

В использованной программе «ABAQUS» был проведен анализ для части бетона, расположенной на максимальной глубине 100 м и испытывающей действие сильного водяного давления. Компьютерное моделирование служит ключевым средством для изучения образования и распространения трещин под давлением в бетоне, а также для разработки эффективных методов его защиты [3]. Оно также важно для предсказания процессов коррозии металлической арматуры из-за влияния воды и общего ухудшения прочности бетона [6].

В модели была принята начальная трещина размерами десять миллиметров в длину и один миллиметр в ширину, расположенная горизонтально. Форма трещины, имеющая треугольный профиль с начальной шириной в один миллиметр, была точно согласована с параметрами бетонной части.

**Свойства материала**

Предполагается, что используемый бетон соответствует характеристикам марки В30, имеющим плотность 2470 кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости 32,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,2, предел прочности при растяжении 1,5 МПа, прочность на сжатие 38 МПа, энергию разрушения 133 Нм/м<sup>2</sup>, а вязкость при разрушении 0,45 МПа/м.

Трехмерная модель выполнена в виде монолита. На нижнюю поверхность модели было наложено граничное условие с фиксацией, тогда как верхняя часть модели обладает возможностью свободного перемещения в любом направлении.

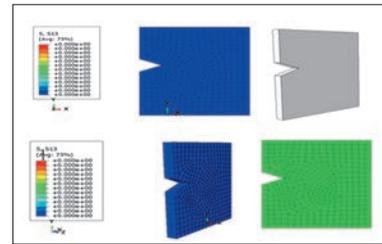


Иллюстрация 5. Небольшая часть бетона в программе «ABAQUS». Автор А. В. Р. Раззак

**Результаты**

**1 Значение напряжений и перемещений (смещений) в модели и их развитие для образования трещин**

Изучение воздействия давления на начальное состояние трещины показало, что на определенном этапе ее расширения устойчивость значительно повышается до момента формирования влажной поверхности. С другой стороны, прочность трещины снижается после того, как ее поверхность становится полностью влажной.

**2 Давление воды при образовании трещин**

Изменение давления происходит в зависимости от развития трещины. При появлении малой трещины наблюдается равномерное распределение давления, которое затем слегка возрастает для стимулирования дальнейшего роста трещины. С увеличением площади разрыва давление начинает снижаться, следуя одной и той же тенденции вдоль всего процесса распространения до момента, когда достигается полное отделение образца. Следует также подчеркнуть, что начальные условия нагрузки играют существенную роль в распределении давления.

**3 Диаграмма трещин**

На Иллюстрации 10 показано развитие перемещения относительно глубины на внутренней поверхности трещины, где перемещение уменьшается с увеличением глубины трещины. На Иллюстрации 11 показано развитие напряжения относительно глубины на внутренней поверхности трещины, где напряжение увеличивается и уменьшается в зависимости от геометрии трещины и распределения давления воды внутри нее.

**Заключение**

В данной статье описывается численный подход к моделированию развития масштабных трещин в бетоне, используемом в гидротехнических объектах. Эффективность предложенного метода демонстрируется на основе испытаний модели

с трещинами в бетоне в программном комплексе «ABAQUS». Исходя из полученных результатов, можно сделать несколько ключевых выводов.

- 1 Численная методика анализа трещин на микроуровне бетона позволяет детализированно воссоздать форму трещины, обеспечивает возможность создания численной модели с трещинами и способствует предсказанию их развития под влиянием гидродавления.
- 2 Анализ распространения трещин в бетоне гидротехнических сооружений подтверждает, что особенности иррегулярной формы трещин могут провоцировать разноплановые повреждения из-за напряжений, отличающихся от повреждений обычных трещин.
- 3 Результаты моделирования позволяют заключить, что уже существующие трещины не развиваются, если предотвратить проникновение воды в трещину с использованием специальных защитных материалов. Однако из-за ослабления бетона вследствие растяжения трещина на нижней стороне обширного гидротехнического сооружения, например плотины, может привести к развитию трещин в случае землетрясения, значительно снижая структурную целостность сооружения. Следовательно, укрепление таких трещин заранее является необходимостью.
- 4 Высокое давление воды внутри гидротехнической конструкции существенно изменяет характер растрескивания бетона. В сравнении с естественной средой увеличение давления воды с 100 000 до 1 081 000 Па прогрессивно приводит к появлению напряжений внутри трещин вдоль зоны разрушения.
- 5 Выявлено, что для развития начальной трещины давление растет, обеспечивая равномерное распределение, и постепенно увеличивается для продолжения распространения трещины. Затем давление снижается в связи с увеличением площади трещины до момента полного разрушения бетонной структуры.
- 6 Давление воды, необходимое для продолжения развития непрерывной трещины, меняется, выбирая наименее устойчивые участки бетона для своего дальнейшего развития, на этом основании увеличивая область разрушения.
- 7 Результаты показывают, что взаимосвязь между давлением воды и развитием трещин в бетоне зависит от типа бетона и качества

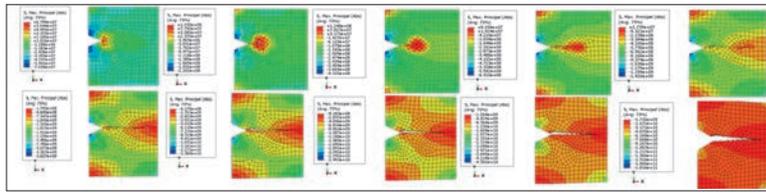


Иллюстрация 6. Значение напряжений в корпусе модели и их развитие для образования трещин. Автор А. В. Р. Раззак

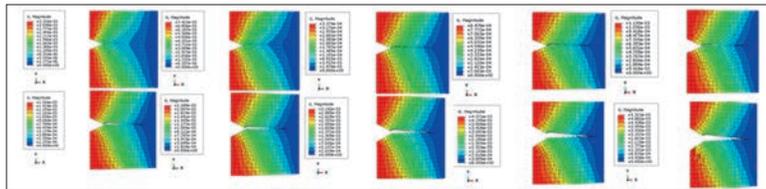


Иллюстрация 7. Значение перемещений (смещений) модели при развитии трещины. Автор А. В. Р. Раззак

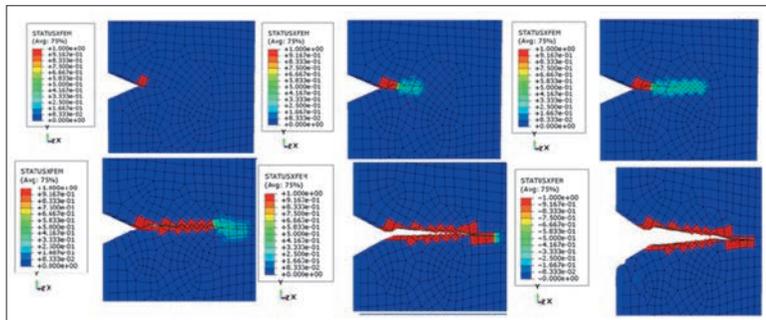


Иллюстрация 8. Разрушения на внутренней поверхности трещины. Автор А. В. Р. Раззак

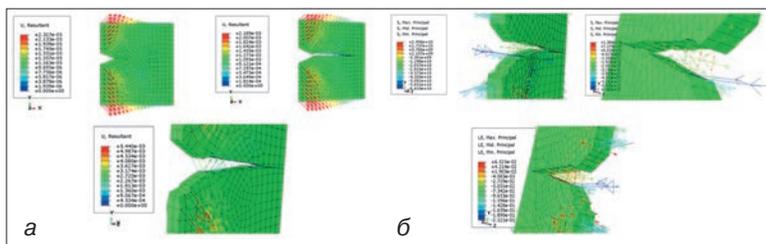


Иллюстрация 9: а — давление воды для образования трещины; б — результаты генерируют пути для взлома в разных направлениях. Автор А. В. Р. Раззак

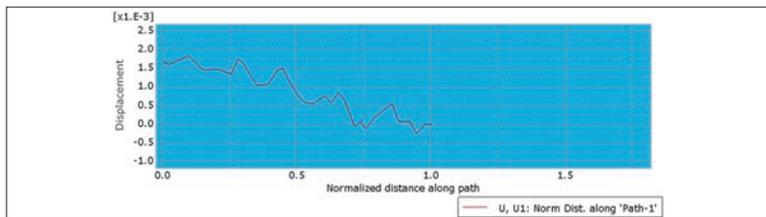


Иллюстрация 10. Диаграмма развития перемещения на внутренней поверхности трещины. Автор А. В. Р. Раззак

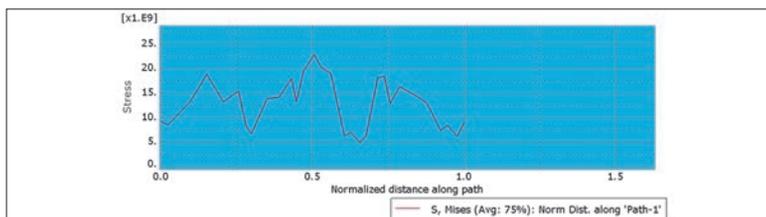


Иллюстрация 11. Диаграмма развития напряжения на внутренней поверхности трещины. Автор А. В. Р. Раззак

используемых в нем материалов, и также геометрия трещин.

### Список использованной литературы

- [1] Механика жидкости и газа: конспект лекций для студентов: 08.03.01 и 08.05.01 – Строительство. – Екатеринбург: Урал. федер. ун-т, 2019. – 61 с.: [сайт] – URL: [https://sti.urfu.ru/fileadmin/user\\_upload/site\\_15804/Механика\\_zhidkosti\\_i\\_gaza\\_2019.pdf](https://sti.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_15804/Механика_zhidkosti_i_gaza_2019.pdf) (дата обращения: 05.02.2024).
- [2] Панфилова А. Д., Лейцин В. Н., Дмитриева М. А. Влияние водонасыщенного состояния бетона на его прочность // Современные перспективы строительства: сб. науч. статей по материалам Молодеж. науч. школы. – Калининград: Балт. федер. ун-т, 2023. – С. 55–66.
- [3] Радайкин О. В., Шарафутдинов Л. А. Компьютерное моделирование в ПК «ANSYS» НДС железобетонных балок, усиляемых сталефибробетонной «рубашкой», с учетом начальных трещин // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы IV Междунар. (X Всерос.) конф., Чебоксары, 21–22 ноября 2018 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2018. – С. 308–315.
- [4] Сайгашова Е. Е. Особенности бетонов для строительства гидротехнических сооружений // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электрон. сб. статей по материалам LXIX студ. междунар. науч.-практ. конф. Т. 9 (68). – Новосибирск: АНС «СибАК», 2018. – С. 16–21: [сайт] – URL: <https://sibac.info/archive/technic/9> (68). pdf?ysclid=m05gjdqxvr15981555 (дата обращения: 05.08.2024).
- [5] Тимофеева Е. С., Елесин М. А. Специфика использования гидротехнического бетона в строительстве // Научный вестник Арктики. – 2023. – № 15. – С. 15–23.
- [6] Фомиченко К. И. Компьютерное моделирование потери прочности железобетонных конструкций при воздействии коррозии // Студент: наука, профессия, жизнь: материалы VII Всерос. студ. науч. конф. с междунар. участием, Омск, 20–24 апреля 2020 г.: в 4 ч. Ч. 1. – Омск: Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 200–205.
- [7] Ahmad S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction // Cement and Concrete Composites. – 2003. – № 25. – P. 459–471.
- [8] Alberto A., Valente S. Asymptotic fields at the tip of a cohesive frictional crack growing at the bi-material interface between a dam and the foundation rock // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – № 108. – P. 152–161: [сайт] – URL: [Sci-Hub | Asymptotic fields at the tip of a cohesive frictional crack growing at the bi-material interface between a dam and the foundation rock. Engineering Fracture Mechanics, 108, 152–161 | 10.1016/j.engfracmech.2013.05.005](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013788X130001048) (дата обращения: 05.08.2024).
- [9] Barani O., Majidaie S., Mosallanejad M. Numerical modeling of water pressure in propagating concrete cracks // J. of Engineering Mechanics. – 2016. – № 142 (4). – P. 04016011: [сайт] – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001048) (дата обращения: 05.08.2024).
- [10] Barpi F., Valente S. The cohesive frictional crack model applied to the analysis of the dam-foundation joint // Engineering Fracture Mechanics. – 2010. – № 77. – P. 2182–2191.
- [11] David Rogers J. Lessons learned from the st. francis dam failure // Geo-Strata. – 2006. – № 6 (2). – P. 14–17: [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/278679080\\_Lessons\\_Learned\\_from\\_the\\_St\\_Francis\\_Dam\\_Failure](https://www.researchgate.net/publication/278679080_Lessons_Learned_from_the_St_Francis_Dam_Failure) (дата обращения: 05.08.2024).
- [12] Dubey C., Venkatachalam K., Ratnam M., Shekhar P. Causes of seepage water in drainage and grouting galleries of the Pandoh Dam, Central Himalaya // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2004. – № 63. – P. 19–23: [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/248151346\\_Causes\\_of\\_seepage\\_water\\_in\\_drainage\\_and\\_grouting\\_galleries\\_of\\_the\\_Pandoh\\_Dam\\_Central\\_Himalaya](https://www.researchgate.net/publication/248151346_Causes_of_seepage_water_in_drainage_and_grouting_galleries_of_the_Pandoh_Dam_Central_Himalaya) (дата обращения: 05.08.2024).
- [13] Elices M., Planas J., Guinea G. Modeling cracking in rocks and cementitious materials // Proceedings of the Second International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock, Vienna, Austria. – 1993. – P. 3–33: [сайт] – URL: <https://books.google.iq/books?id=DKdPEhb9nPIC&pg=PA3&hl=ar&pg=PA3#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 05.08.2024).
- [14] Farinha M., Lemos J., Maranhã E. Analysis of foundation sliding of an arch dam considering the hydromechanical behavior // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2012. – № 6. – P. 35–43: [сайт] – URL: [https://repository.lnec.pt/jspui/bitstream/123456789/1003453/1/Farinaha\\_Lemos\\_Maranha\\_FSCE\\_2012\\_fulltext.pdf](https://repository.lnec.pt/jspui/bitstream/123456789/1003453/1/Farinaha_Lemos_Maranha_FSCE_2012_fulltext.pdf) (дата обращения: 05.08.2024).
- [15] Gaziev E. G. Inclines of horizontal sections of sayan-shushenskaya arch-gravity dam // Power Technology and Engineering. – 2012. – Vol. 46, № 3. – P. 181–184.
- [16] Hong Z., Hongjun L., Ean O., Chongmin S. Hydraulic fracture at the dam-foundation interface using the scaled boundary finite element method coupled with the cohesive crack model // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2018. – № 88. – P. 41–53: [сайт] – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823118300125> (дата обращения: 05.08.2024).
- [17] Holt E., Leivo M. Cracking risks associated with early age shrinkage // Cement and Concrete Composites. – 2004. – № 26. – P. 521–530: [сайт] – URL: [https://www.academia.edu/76298838/Cracking\\_risks\\_associated\\_with\\_early\\_age\\_shrinkage](https://www.academia.edu/76298838/Cracking_risks_associated_with_early_age_shrinkage) (дата обращения: 05.08.2024).
- [18] Jamali A., Angst U., Adey B., Elsener B. Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis // Construction and Building Materials. – 2013. – № 42. – P. 225–237: [сайт] – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/6/1440> (дата обращения: 05.08.2024).
- [19] Maruyama I., Lura P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete // Cement and Concrete Research. – 2019. – № 123 (1944): 105770. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.015: [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/335456525\\_Properties\\_of\\_early-age\\_concrete\\_relevant\\_to\\_cracking\\_in\\_massive\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/335456525_Properties_of_early-age_concrete_relevant_to_cracking_in_massive_concrete) (дата обращения: 05.08.2024).
- [20] Noorzaei J., Bayagoob K. H., Thanoon W. A., Jaafar M. S. Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam // Engineering Structures. – 2006. – № 28 (13). – P. 1795–1802.
- [21] Sha S., Zhang G. Modeling of hydraulic fracture of concrete gravity dams by stress-seepage-damage

- coupling model // *Mathematical Problems in Engineering*. – April 2017. – № (12). – P. 1–15. – DOI: 10.1155/2017/8523213; [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/316429423\\_Modeling\\_of\\_Hydraulic\\_Fracture\\_of\\_Concrete\\_Gravity\\_Dams\\_by\\_Stress-Seepage-Damage\\_Coupling\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/316429423_Modeling_of_Hydraulic_Fracture_of_Concrete_Gravity_Dams_by_Stress-Seepage-Damage_Coupling_Model) (дата обращения: 05.08.2024).
- [22] Sheibany F., Ghaemian M. Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam // *J. of Engineering Mechanics*. – 2006. – № 132 (5). – P. 532–544.
- [23] Shen B., Stephansson O., Rinne M. *Iteration process in FRACOD // Modelling Rock Fracturing Processes*. Springer, Dordrecht. – 2014.
- [24] Wang Y., Jia J. Experimental study on the influence of hydraulic fracturing on high concrete gravity dams // *Engineering Structures*. – 2017. – № 132. – P. 508–517.
- [25] Wei P., Lin P., Peng H. et al. Analysis of cracking mechanism of concrete galleries in a super high arch dam // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 248. – P. 113227; [сайт] – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/7199/1322e3071c4bf7ea1132cc6ccb0d4cb2ae33.pdf> (дата обращения: 05.08.2024).
- [26] Zhuang D., Ma K., Tang C. et al. Study on crack formation and propagation in the galleries of the Dagangshan high arch dam in Southwest China based on microseismic monitoring and numerical simulation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – № 115. – P. 157–172.
- [27] Zhu H., Deng G., Zhao J. et al. Cementing failure of the casing-cement-rock interfaces during hydraulic fracturing // *Computers and Concrete Journal*. – July 2014, № 1. – Vol. 14. – P. 91–107; [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/273221839\\_Cementing\\_failure\\_of\\_the\\_casing-cement-rock\\_interfaces\\_during\\_hydraulic\\_fracturing?\\_sg=hfV7UfxVakdX0i4cGm5wTx-G63mRSaX1oaa9Yh1Ts1xCMisL6YavUOpIzUtSUGqSdKaaFXmwMjP2oAA&\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZS16InNpZ251cCI6InBhZ2UiOiJfZGlyZWNOIn19](https://www.researchgate.net/publication/273221839_Cementing_failure_of_the_casing-cement-rock_interfaces_during_hydraulic_fracturing?_sg=hfV7UfxVakdX0i4cGm5wTx-G63mRSaX1oaa9Yh1Ts1xCMisL6YavUOpIzUtSUGqSdKaaFXmwMjP2oAA&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZS16InNpZ251cCI6InBhZ2UiOiJfZGlyZWNOIn19) (дата обращения: 05.08.2024).
- [28] Zielonka M., Searles H., Ning J. Development and validation of fully-coupled hydraulic fracturing simulation capabilities // *Proceedings of the SIMULIA community conference, SCC*. – 2014. – P. 19–21.
- [4] Sajgashova E. E. Osobennosti betonov dlya stroitel'stva gidrotekhnicheskikh sooruzhenij // *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki: elektron. sb. statej po materialam LXIX stud. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. T. 9 (68)*. – Novosibirsk: ANS «SibAK», 2018. – S. 16–21; [сайт] – URL: <https://sibac.info/archive/technic/9> (68). pdf?ysclid=m05gjdqxvr915981555 (дата обращения: 05.08.2024).
- [5] Timofeeva E. S., Elesin M. A. Specifika ispol'zovaniya gidrotekhnicheskogo betona v stroitel'stve // *Nauchnyj vestnik Arktiki*. – 2023. – № 15. – S. 15–23.
- [6] Fomichenko K. I. Komp'yuternoe modelirovanie poteri prochnosti zhelezobetonnykh konstrukcij pri vozdeystvii korrozii // *Student: nauka, professiya, zhizn': materialy VII Vseros. stud. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, Omsk, 20–24 aprelya 2020 g.: v 4 ch. CH. 1*. – Omsk: Omsk. gos. un-t putej soobshcheniya, 2020. – S. 200–205.
- [7] Ahmad S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction // *Cement and Concrete Composites*. – 2003. – № 25. – P. 459–471.
- [8] Alberto A., Valente S. Asymptotic fields at the tip of a cohesive frictional crack growing at the bi-material interface between a dam and the foundation rock // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2013. – № 108. – P. 152–161; [сайт] – URL: [Sci-Hub | Asymptotic fields at the tip of a cohesive frictional crack growing at the bi-material interface between a dam and the foundation rock. Engineering Fracture Mechanics, 108, 152–161 | 10.1016/j.engframech.2013.05.005](https://doi.org/10.1016/j.engframech.2013.05.005) (дата обращения: 05.08.2024).
- [9] Barani O., Majidaie S., Mosallanejad M. Numerical modeling of water pressure in propagating concrete cracks // *J. of Engineering Mechanics*. – 2016. – № 142 (4). – P. 04016011; [сайт] – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001048) (дата обращения: 05.08.2024).
- [10] Barpi F., Valente S. The cohesive frictional crack model applied to the analysis of the dam-foundation joint // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2010. – № 77. – P. 2182–2191.
- [11] David Rogers J. Lessons learned from the St. Francis dam failure // *Geo-Strata*. – 2006. – № 6 (2). – P. 14–17; [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/278679080\\_Lessons\\_Learned\\_from\\_the\\_St\\_Francis\\_Dam\\_Failure](https://www.researchgate.net/publication/278679080_Lessons_Learned_from_the_St_Francis_Dam_Failure) (дата обращения: 05.08.2024).
- [12] Dubey C., Venkatachalam K., Ratnam M., Shekhar P. Causes of seepage water in drainage and grouting galleries of the Pandoh Dam, Central Himalaya // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2004. – № 63. – P. 19–23; [сайт] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/248151346\\_Causes\\_of\\_seepage\\_water\\_in\\_drainage\\_and\\_grouting\\_galleries\\_of\\_the\\_Pandoh\\_Dam\\_Central\\_Himalaya](https://www.researchgate.net/publication/248151346_Causes_of_seepage_water_in_drainage_and_grouting_galleries_of_the_Pandoh_Dam_Central_Himalaya) (дата обращения: 05.08.2024).
- [13] Elices M., Planas J., Guinea G. Modeling cracking in rocks and cementitious materials // *Proceedings of the Second International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock, Vienna, Austria*. – 1993. – P. 3–33; [сайт] – URL: <https://books.google.iq/books?id=DKdPEhb9nPIC&pg=PA3&hl=ar&pg=PA3#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 05.08.2024).
- [14] Farinha M., Lemos J., Maranha E. Analysis of foundation sliding of an arch dam considering the

- hydromechanical behavior // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. – 2012. – № 6. – P. 35–43: [sajt] – URL: [https://repositorio.lnec.pt/jspui/bitstream/123456789/1003453/1/Farinha\\_Lemos\\_Maranha\\_FSCE\\_2012\\_fulltext.pdf](https://repositorio.lnec.pt/jspui/bitstream/123456789/1003453/1/Farinha_Lemos_Maranha_FSCE_2012_fulltext.pdf) (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [15] Gaziev E. G. Inclines of horizontal sections of sayano-shushenskaya arch-gravity dam // *Power Technology and Engineering*. – 2012. – Vol. 46, № 3. – P. 181–184.
- [16] Hong Z., Hongjun L., Ean O., Chongmin S. Hydraulic fracture at the dam-foundation interface using the scaled boundary finite element method coupled with the cohesive crack model // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. – 2018. – № 88. – P. 41–53: [sajt] – URL: <https://www.sciencegate.app/keyword/125976> (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [17] Holt E., Leivo M. Cracking risks associated with early age shrinkage // *Cement and Concrete Composites*. – 2004. – № 26. – P. 521–530: [sajt] – URL: [https://www.academia.edu/76298838/Cracking\\_risks\\_associated\\_with\\_early\\_age\\_shrinkage](https://www.academia.edu/76298838/Cracking_risks_associated_with_early_age_shrinkage) (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [18] Jamali A., Angst U., Adey B., Elsener B. Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis // *Construction and Building Materials*. – 2013. – № 42. – P. 225–237: [sajt] – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/6/1440> (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [19] Maruyama I., Lura P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete // *Cement and Concrete Research*. – 2019. – № 123 (1944):105770. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.015: [sajt] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/335456525\\_Properties\\_of\\_early-age\\_concrete\\_relevant\\_to\\_cracking\\_in\\_massive\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/335456525_Properties_of_early-age_concrete_relevant_to_cracking_in_massive_concrete) (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [20] Noorzaei J., Bayagoob K. H., Thanoon W. A., Jaafar M. S. Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam // *Engineering Structures*. – 2006. – № 28 (13). – P. 1795–1802.
- [21] Sha S., Zhang G. Modeling of hydraulic fracture of concrete gravity dams by stress-seepage-damage coupling model // *Mathematical Problems in Engineering*. – April 2017. – № (12). – P. 1–15. – DOI: 10.1155/2017/8523213: [sajt] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/316429423\\_Modeling\\_of\\_Hydraulic\\_Fracture\\_of\\_Concrete\\_Gravity\\_Dams\\_by\\_Stress-Seepage-Damage\\_Coupling\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/316429423_Modeling_of_Hydraulic_Fracture_of_Concrete_Gravity_Dams_by_Stress-Seepage-Damage_Coupling_Model) (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [22] Sheibany F., Ghaemian M. Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam // *J. of Engineering Mechanics*. – 2006. – № 132 (5). – P. 532–544.
- [23] Shen B., Stephansson O., Rinne M. Iteration process in FRACOD // *Modelling Rock Fracturing Processes*. Springer, Dordrecht. – 2014.
- [24] Wang Y., Jia J. Experimental study on the influence of hydraulic fracturing on high concrete gravity dams // *Engineering Structures*. – 2017. – № 132. – P. 508–517.
- [25] Wei P., Lin P., Peng H. et al. Analysis of cracking mechanism of concrete galleries in a super high arch dam // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 248. – P. 113227: [sajt] – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/7199/1322e3071c4bf7ea1132cc6ccb0d4cb2ae33.pdf> (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [26] Zhuang D., Ma K., Tang C. et al. Study on crack formation and propagation in the galleries of the Dagangshan high arch dam in Southwest China based on microseismic monitoring and numerical simulation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – № 115. – P. 157–172.
- [27] Zhu H., Deng G., Zhao J. et al. Cementing failure of the casing-cement-rock interfaces during hydraulic fracturing // *Computers and Concrete Journal*. – July 2014, № 1. – Vol. 14. – P. 91–107: [sajt] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/273221839\\_Cementing\\_failure\\_of\\_the\\_casing-cement-rock\\_interfaces\\_during\\_hydraulic\\_fracturing?\\_sg=hv7UfxVakdX0i4cGm5wTx-G63mRSaX1oaa9Yh1Ts1xCmisL6YavUOpIzUtSUGqSdK\\_aaFXmwMjP2oAA&\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCI6InBhZ2UiOiJfZGlyZWNOIn19](https://www.researchgate.net/publication/273221839_Cementing_failure_of_the_casing-cement-rock_interfaces_during_hydraulic_fracturing?_sg=hv7UfxVakdX0i4cGm5wTx-G63mRSaX1oaa9Yh1Ts1xCmisL6YavUOpIzUtSUGqSdK_aaFXmwMjP2oAA&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCI6InBhZ2UiOiJfZGlyZWNOIn19) (data obrashcheniya: 05.08.2024).
- [28] Zielonka M., Searles H., Ning J. Development and validation of fully-coupled hydraulic fracturing simulation capabilities // *Proceedings of the SIMULIA community conference, SCC*. – 2014. – P. 19–21.

Статья поступила в редакцию 12.08.2024.  
Опубликована 30.09.2024.

**Razzaq Alaa W. R.**

PhD student Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation  
ORCID ID: 0009-0004-0243-5486  
e-mail: alaawahhabrazzaq@yandex.com

**Alekhin Vladimir N.**

Candidate of Technical Sciences, Professor, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: referetsf@yandex.ru