

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК [624.137: 691.2 - 033.3: 556.3: 519.87]

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, Е. Ю. ГУНЬКО^{2*}

^{1*} Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта gidro_eko@ukr.net

^{2*} Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (093) 529 76 15, эл. почта gunko.diit@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОДПОРНЫХ СТЕН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АГРЕССИВНЫМИ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

Цель. Подземные воды, фильтруясь через грунт и растворяя различные соли и газы, иногда приобретают способность разрушать цементные растворы (вызывать коррозию цементного камня). Прогноз такого разрушения строительных конструкций представляет особый интерес. Целью данной работы является разработка численной модели для расчета процесса разрушения цементного камня при контакте с агрессивными водами. **Методика.** Моделирование процесса разрушения подпорных стен при взаимодействии с агрессивными подземными водами было выполнено с помощью численной модели, реализованной на алгоритмическом языке FORTRAN. В основу разработанной модели разрушения цементного камня положено уравнение массопереноса. Численное интегрирование уравнения массопереноса осуществляется на прямоугольной сетке с помощью неявной разностной схемы. **Результаты.** Создан пакет программ, реализующий разработанную численную модель. Результаты численного моделирования процесса разрушения трещины показали как изменяются размеры и геометрическая форма трещины для различных моментов времени после начала процесса разрушения. Видно, что с течением времени происходит постепенное расширение трещины и увеличение области, занятой водой. Для расчета одного варианта задачи потребовалось 20 с компьютерного времени. Дальнейшее совершенствование рассмотренной в работе модели необходимо проводить в направлении ее адаптации к моделированию трехмерного процесса массопереноса в трещинах. **Научная новизна.** Разработана новая численная модель для расчета процесса разрушения цементного камня при контакте с агрессивными водами, позволяющая осуществлять прогноз разрушения цементного камня с учетом сложной геометрической формы трещины. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована для экспресс-прогноза разрушения цементного камня при контакте с агрессивными водами.

Ключевые слова: коррозия цементного камня; численное моделирование; агрессивные подземные воды; разрушение подпорных стен

Введение

В связи с неблагоприятным воздействием подземных вод на несущую способность грунтовых оснований и материалы подземных конструкций необходимо при проектировании и строительстве фундаментов учитывать возможность изменения гидрогеологических условий площадки в процессе строительства и эксплуатации объектов и воздействие подземных вод на конструкции. Известно, что подземные воды, фильтруясь через грунт и растворяя различные соли и газы, иногда приобретают способность разрушать цементные растворы (вызывать коррозию цементного камня). Такие воды становятся агрессивными. При коррозии

первого вида происходит разрушение цементного камня в результате растворения и вымывания некоторых его составных частей (коррозия выщелачивания). При действии воды на цементный камень вначале растворяется и уносится водой свободный гидроксид кальция, образовавшийся при гидролизе C_3S и C_2S , содержание которого в цементном камне через 1-3 месяца твердения достигает 10...15 %, а растворимость при обычных температурах – 1,3 г/л. После вымывания свободного гидроксида кальция и снижения его концентрации ниже 1,1 г/л начинается разложение гидросиликатов, а затем гидроалюминатов и гидроферритов кальция. В результате выщелачивания по-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вышается пористость цементного камня и снижается его прочность. Процесс коррозии первого вида ускоряется, если на цементный камень действует мягкая вода или вода под напором.

Цель

При одном и том же составе агрессивная вода разрушает цементный камень тем быстрее, чем с большей скоростью она движется; наиболее опасны агрессивные воды, фильтрующиеся под напором через цементный камень. В этой связи представляется особо важным вопрос прогноза такого разрушения строительных конструкций. Такой прогноз может быть выполнен с помощью специализированных математических моделей. Целью данной работы является разработка численной модели для расчета процесса разрушения цементного камня при контакте с агрессивными водами.

Методика

В основу модели разрушения цементного камня положено уравнение массопереноса. Данное уравнение (профильная задача) имеет вид [3, 5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация примеси (гидроксид кальция) в воде; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты диффузии; t – время.

Ось Y направлена вертикально вверх.

Рассмотрим постановку граничных условий для уравнения (1). Будем считать, что расчет происходит в области R , которая имеет форму прямоугольника со сторонами L_x, L_y . Форма трещины задается маркерами. На тех сторонах расчетной области, где трещина контактирует с внешним, подземным потоком, ставится условие:

$$C|_{\text{ex}} = C_e, \quad (2)$$

где C_e – известное значение концентрации примеси.

На границе «водная среда–стенка трещины» ставится граничное условие вида:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = aC, \quad (3)$$

где n – единичный вектор внешней нормали к поверхности; a – коэффициент массоотдачи.

Численное интегрирование моделирующих уравнений. Решение уравнения массопереноса осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Для формирования вида расчетной области и ее изменения с течением времени, используется метод маркирования [3].

Для численного интегрирования уравнения (1) применяется попеременно-треугольная неявная разностная схема [3]. Особенностью данной схемы является то, что на каждом шаге расщепления используется явная формула, что позволяет разработать простой алгоритм ее реализации. Программная реализация численной модели осуществлена на алгоритмическом языке FORTRAN.

Исходные данные для моделирования. Для 2-D моделирования процесса разрушения трещины необходимо задать следующие исходные данные:

1. Диаметр трещины.
2. Длину расчетного участка трещины.
3. Геометрическую форму трещины.
4. Коэффициент массоотдачи от стенки трещины в водный поток.
5. Концентрацию примеси в воде на входе в трещину.
6. Коэффициент диффузии.

Алгоритм расчета. Расчет процесса разрушения трещины осуществляется в следующей последовательности:

1. Задаются исходные данные, определяющие физическую постановку задачи (форма, размеры трещины и т.д.).
2. Рассчитывается распределение концентрации примеси внутри трещины.
3. Рассчитывается процесс массопередачи от стенок трещины в воду, которая находится внутри трещины.
4. Заново рассчитывается процесс распространения растворенного вещества в воде, находящейся внутри трещины и расчет повторяется.

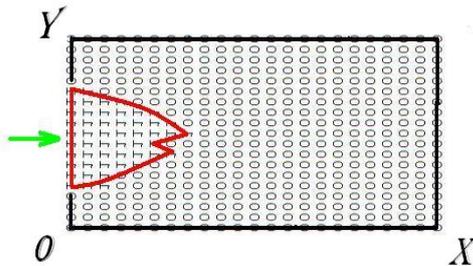
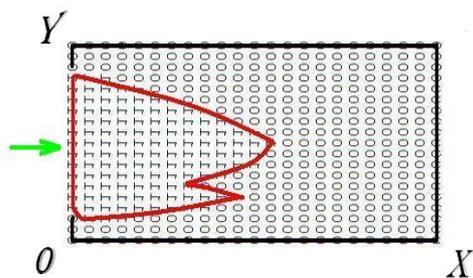
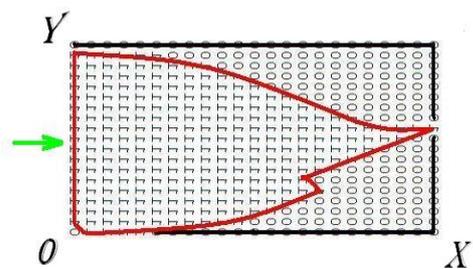
Если из расчетной ячейки, относящейся к трещине и находящейся на границе «стенка трещины – вода», уходит масса растворенного вещества, соответствующего той массе, которую можно «разместить» в разностной ячейке, то такая ячейка «исчезает» и заменяется разностной ячейкой, соответствующей водной

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

среде. То есть, происходит увеличение размеров трещины. Если это происходит, то изменяется форма расчетной области, т.е. форма области, занятой водным потоком внутри трещины. Поэтому заново осуществляется расчет поля концентрации внутри трещины и процесса массопереноса с учетом новой геометрической формы расчетной области.

Результаты моделирования

Результаты численного моделирования процесса разрушения трещины приведены на рис. 1, 2 и 3. Расчет проводился в безразмерном виде при следующих исходных данных: концентрация примеси в воде на входе в трещину равна 0; начальный диаметр трещины равен 1, длина трещины (расчетного участка) равна 12; коэффициент массоотдачи равен 0,1, коэффициент диффузии принят равным 0,8.

Рис. 1. Форма трещины для момента времени $t = 0$ Рис. 2. Форма трещины для момента времени $t = 0,67$ Рис. 3. Форма трещины для момента времени $t = 2,56$

На рисунках (см. рис. 1, 2 и 3) показана геометрическая форма трещины для различных моментов времени после начала процесса разрушения. Как видно, в начальный момент времени $t = 0$, трещина имеет сложную геометрическую форму – маркер «1» определяет границы трещины, внутри которой находится вода.

Далее, с течением времени размеры трещины увеличиваются в поперечном направлении, и трещина углубляется внутрь стены. Образующаяся полость заполняется водой (маркер «1»). К моменту времени $t = 2,56$ трещина практически полностью пронизывает всю расчетную область.

Отметим, что для расчета одного варианта задачи потребовалось 20 с компьютерного времени. Таким образом, для решения многопараметрической задачи массопереноса в области сложной геометрической формы, изменяющейся с течением времени, требуются незначительные временные затраты при использовании разработанной численной модели.

Научная новизна и практическая значимость

В работе разработана новая численная модель для расчета процесса разрушения цементного камня при контакте с агрессивными водами, позволяющая осуществлять прогноз разрушения цементного камня с учетом сложной геометрической формы трещины, что представляет собой научную новизну проведенных исследований. Модель основана на численном интегрировании уравнения диффузии примеси. В качестве моделирующего уравнения используется двухмерное уравнение распространения примеси в водной среде. Для численного интегрирования используется неявная разностная схема. Данная численная модель может быть использована для экспресс-прогноза разрушения цементного камня при контакте с агрессивными водами. Особенностью данной модели является быстрота расчета, что очень важно при проведении серийных расчетов.

Выводы

В работе представлена новая численная модель для расчета процесса разрушения трещины. Модель позволяет учесть сложную геометрическую форму трещины, которая формирует-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ся в опорній стіні під впливом агресивної середовища. Розроблена численна модель ґрунтується на фундаментальному рівнянні масопереносу. Далішнє удосконалення розглянутої в роботі моделі необхідно проводити в напрямленні її адаптації к моделюванню тривимірного процесу масопереносу в тріщинах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Ekström, T. Leaching of Concrete: Experiments and Modelling [Text] / T. Ekström. – KFS AB, Lund. – 2001. – 229 p.
- Bentz, D. P. Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity [Text] / D. P. Bentz, E. J. Garboczi // Materials and Structures. – 1992. – № 25. – P. 523-533.
- Численне моделювання розповсюдження забруднення в оточуючій середі [Текст] / М. З. Згуровський, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
- Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1978. – 735 с.
- Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
- Математические модели процессов коррозии бетона [Текст] / Б. В. Гусев, А. С. Файвусович, В. Ф. Степанова, Н. К. Розенталь. – Москва : Информ. – изд. ТИМР, 1996. – 104 с.
- Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 536 с.
- Сучасні уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води [Текст] / Д. Ю. Колесник, К. К. Пушкарьова, Л. О. Шейнич // Штучні споруди: автомобільні дороги. – 2012. – № 4 (228). – С. 33-37.
- Будівельне матеріалознавство на транспорті [Текст] / О. М. Пшінько, А. В. Краснюк, В. В. Пунагін, О. В. Громова. – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2010. – 624 с.
- Домокеев, А. Г. Строительные материалы: учеб. для строит. вузов [Текст] / А. Г. Домокеев. – Москва : Высш. шк., 1989. – 495 с.
- Гузченко, В. Т. Класифікація підпірних стін [Текст] / В. Т. Гузченко, М. А. Лісневський // Зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2012. – Вип. 3. – С. 39-44.
- Опыт обследования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах [Текст] / А. В. Вешняков, А. В. Заручевных, С. Е. Аксёнов и др. // Технологии бетонов. – 2008. – № 3. – С. 54-57.
- Особенности коррозии выщелачивания в современных бетонах [Текст] / Г. И. Овчаренко, Н. Г. Бровкина, О. С. Носкова и др. // Технологии бетонов. – 2008. – № 3. – С. 62-63.
- Соломка, В. І. Хімічна та біологічна корозія бетону і її наслідки для залізобетонних конструкцій мостів [Текст] / В. І. Соломка // Зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2013. – Вип. 4. – С. 107-112.
- Подвальный, А. М. Физико-химическая механика – основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона [Текст] / А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2000. – № 5. – С. 23-27.
- Хван, Т. А. Промышленная экология [Текст] / Т. А. Хван. – Ростов на Дону : Феникс, 2003. – 320 с.
- ДСТУ Б В.2.6-145:2008. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги [Текст] (ГОСТ 31384:2008, NEQ) – 48 с.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. Ю. ГУНЬКО^{2*}

^{1*} Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net

^{2*} Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (093) 529 76 15, ел. пошта gunko.diit@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ ПІДПІРНИХ СТІН ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З АГРЕСИВНИМИ ПІДЗЕМНИМИ ВОДАМИ

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Мета. Підземні води, які фільтруються крізь ґрунт і розчиняють при цьому різні солі і гази, іноді набувають здатність руйнувати цементні розчини (викликає корозію цементного каменю). Прогноз подібного руйнування будівельних конструкцій викликає особливий інтерес. Метою даної роботи є розробка чисельної моделі для розрахунку процесу руйнування цементного каменю при контакті з агресивними водами. **Методика.** Моделювання процесу руйнування підпірних стін при взаємодії з агресивними підземними водами було виконано за допомогою чисельної моделі, яка реалізована алгоритмічною мовою FORTRAN. В основі розробленої моделі руйнування цементного каменю лежить рівняння масопереносу. Чисельне інтегрування рівняння масопереносу здійснюється на прямокутній різнищевій сітці за допомогою неявної різнищеві схеми. **Результати.** Створено пакет програм, який реалізує розроблену чисельну модель. Результати чисельного моделювання процесу руйнування тріщини показали як змінюються розміри і геометрична форма тріщини для різних моментів часу після початку процесу руйнування. Видно, що з часом відбувається поступове розширення тріщини і збільшення зони, що зайнята водою. Для розрахунку одного варіанта задачі потрібно 20 с комп'ютерного часу. Подальше вдосконалення розглянутої в роботі моделі необхідно проводити в напрямі її адаптації до моделювання тривимірного процесу масопереносу в тріщинах. **Наукова новизна.** Розроблено нову чисельну модель для розрахунку процесу руйнування цементного каменю при контакті з агресивними водами, що дозволяє здійснювати прогноз руйнування цементного каменю з урахуванням складної геометричної форми тріщини. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для експрес-прогнозу руйнування цементного каменю при контакті з агресивними водами.

Ключові слова: корозія цементного каменю; чисельне моделювання; агресивні підземні води; руйнування підпірних стін

N. N. BILIAEV^{1*}, YE. YU. GUNKO^{2*}

^{1*} Department «Hydraulics and Water Supply» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net

^{2*} Department «Hydraulics and Water Supply» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 529 76 15, e-mail gunko.diit@gmail.com

MODELLING OF THE SUPPORT WALLS DESTRUCTION IN THE CASE OF THE AGGRESSIVE GROUND WATERS INTERACTION

Purpose. Ground waters flowing through the soil could leach different salts and gases. As a result these waters obtain the ability to destroy cement solutions (cause the corrosion of cement stone). Prediction of the construction destruction in this case is a problem of great interest. The goal of this paper is the development of numerical model to compute the cement stone destruction during the contact with aggressive ground waters. **Methodology.** A numerical model was used to simulate the process of the supporting walls destruction during the contact with aggressive ground waters. FORTRAN language was used to develop the code. Equation of the mass conservation was used as the governing equation. A rectangular difference grid and implicit difference scheme were used to develop a numerical model. **Findings.** A code was developed to carry out the numerical experiment. The results of the numerical experiment show the time change of the slot dimensions and geometrical form. These results show the slow increasing of the slot width and the space filled with water. To compute the problem it takes 15 sec. To develop the 3-D model of this process is the further step of this investigation. **Originality.** A new numerical model was developed to compute the cement stone destruction during the contact with aggressive ground waters. The model allows to predict the dynamics of destruction in the case of the slot having comprehensive geometrical form. **Practical value.** The developed numerical model can be used for quick prediction of the cement stone destruction.

Keywords: corrosion of cement paste; numerical simulation; aggressive ground water; destruction of the support walls

Стаття рекомендована к публікації д.т.н, проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. І. І. Лучко (Україна).

Поступила в редколлегию 15.06.2014.

Принята к печати 02.07.2014.