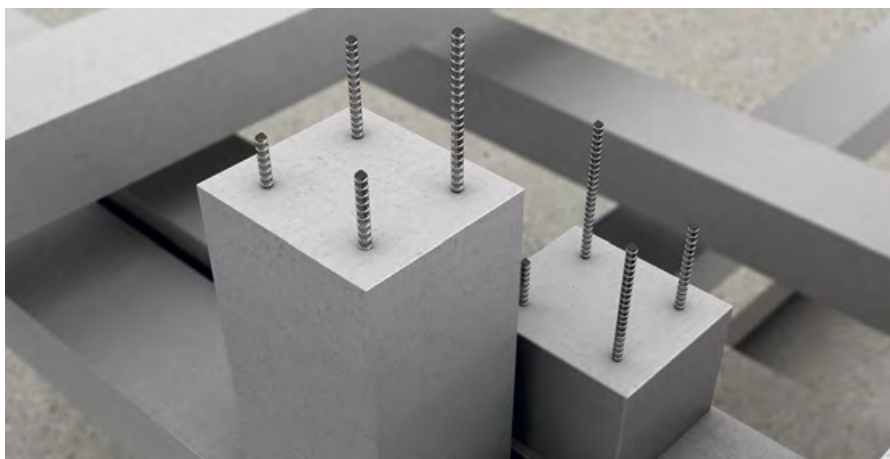




Моделирование катодной защиты ЖБИ для размещения и сохранности трубопроводов ЖКХ в COMSOL Multiphysics

Рецензия эксперта на статью получена
14.12.2018 [Expert review on the article
received on December 14, 2018].

Введение

При анализе коррозионных процессов трубопроводов подземных коммуникаций жилищно-коммунального хозяйства (трубопроводов отопления, водоснабжения, канализации) наблюдаются не только известные и хорошо изученные виды коррозии стальных труб [1, 2], но и менее знакомые явления, например, механоэлектрохимическое влияние на локальное усиление коррозии отдельных участков труб [3–5]. Как было отмечено, трубопроводы в грунте, помимо внутреннего давления от транспортируемой жидкости или газа, испытывают также дополнительное напряжение от продольных или поперечных перемещений прилегающего к ним грунта.

В связи с этим весьма важной коррозионной защитой трубопроводов подземных коммуникаций ЖКХ можно считать размещение их в соответствующих герметичных лотках, коробах и коллекторах, надёжно защищающих от механических воздействий и от влияния погодных факторов и почвенной влаги [4].

Современная отрасль жилищно-коммунального хозяйства отличается развитыми инженерными коммуникациями с уложенными в них водопроводными и газовыми трубами, кабелями электрических и коммуникационных сетей. При

эксплуатации они должны соответствовать определённым требованиям:

- защите от проникновения влаги;
- защите от различного рода механических воздействий;
- надёжности и долговечности при эксплуатации;
- простоте обслуживания;
- доступности утилизации в конце жизненного цикла.

Кроме того, при прокладке коммуникаций ЖКХ важной задачей является сохранение целостности ландшафтного образа территории. Поэтому при выполнении подобных работ широко используются унифицированные строительные элементы в виде различных защитных изделий для наземных и подземных инженерных сетей. Наряду с железобетонными лотка-

Весьма важной коррозионной защитой трубопроводов подземных коммуникаций ЖКХ можно считать размещение их в соответствующих герметичных лотках, коробах и коллекторах, надёжно защищающих от механических воздействий и от влияния погодных факторов и почвенной влаги

УДК 620.93. Номер специальности: 05.23.04.

Моделирование катодной защиты ЖБИ для размещения и сохранности трубопроводов жилищно-коммунального хозяйства в COMSOL Multiphysics

Владимир А. Сучилин, д.т.н., профессор; Алексей С. Кочетков, магистр; Николай Н. Губанов, магистр, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Надёжность защитных сооружений для подземных коммуникаций ЖКХ существенно влияет на срок их службы. На основании изучения особенностей эксплуатации защитных ЖБИ трубопроводов в городских коммуникациях сделано предположение, что причиной преждевременного повреждения подобных изделий может быть коррозия арматуры бетона. Предложены метод защиты от коррозии арматуры и результаты исследования параметров коррозионного процесса.

Ключевые слова: коррозия трубопроводов подземных коммуникаций, коррозия арматуры защитных сооружений, протекторная защита стали, моделирование коррозионного процесса арматуры бетона, COMSOL Multiphysics.

UDC 620.93. The number of scientific speciality: 05.23.04.

Modeling of cathodic protection of reinforced concrete products for the placement and safety of pipelines housing and communal services in COMSOL Multiphysics

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Alexey S. Kochetkov, graduate student; Nikolay N. Gubanov, graduate student, Russian State University of Tourism and Service (RGUTS)

The reliability of protective structures for underground utilities housing and communal services significantly affects their service life. Based on the study of the features of the operation of protective reinforced concrete products of pipelines in urban communications, it has been suggested that the corrosion of concrete reinforcement may be the cause of premature damage to such products. The method of corrosion protection of reinforcement and the results of the study of the parameters of the corrosion process are proposed.

Key words: corrosion of pipelines of underground utilities; corrosion of reinforcement of protective structures, protective steel protection, modeling of the corrosion process of reinforcement of concrete, COMSOL Multiphysics.

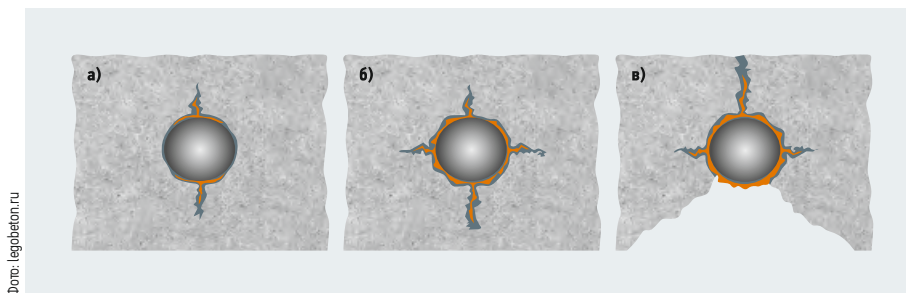


Рис. 1. Характерный вид разрушения арматуры железобетонных изделий

ми, коробами и коллекторами, в инженерных сетях ЖКХ находят применение полимерные и композитные подобные изделия. Им в настоящее время даже отдают предпочтение как более лёгким и дешёвым. Однако они не всегда соответствуют жёстким экологическим требованиям, в том числе требованиям утилизации. Так, на данный момент утилизируется лишь небольшая часть всех существующих изделий этого вида, отслуживших свой срок. Развитие же сферы рециклинга проходит медленно, несмотря на её актуальность, что связано со сложностью технологии сборки и переработки подобных отходов, отличающихся широким разнообразием свойств и, соответственно, затратами на проведение переработки. В то время как переработка железобетона — это хорошо отработанная технология, практически не влияющая на чистоту окружающей среды и позволяющая получать вторичный строительный материал (например, щебень) путём дробления подобных изделий, завершивших свой жизненный цикл.

Железобетон широко известен как долговечный материал, в большинстве случаев не нуждающийся в защите от воздействий внешней среды. Однако системное изучение стойкости железобетонных конструкций в различных условиях эксплуатации показало, что наиболее часто встречающиеся повреждения железобетона связаны с развитием коррозионных процессов в арматуре, и в настоящее время всё ещё не существует простых и надёжных методов защиты арматуры железобетонных изделий от коррозии.

Под коррозией стальной арматуры подразумевается процесс постепенного разрушения поверхности арматурного стержня в результате постоянного химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. При этом разрушается не только сам стержень арматуры, но и бетон по причине образования трещин и отслоения защитного слоя бетона (рис. 1).

В начальный момент коррозии стержня арматуры чаще всего наблюдается равномерное распределение ржавчины



по его поверхности, объём её неуклонно растёт, что приводит к появлению микротрещин в прилегающей зоне бетона (рис. 1а). Со временем процесс коррозии ускоряется, количество микротрещин увеличивается (рис. 1б). На последней стадии трещины выходят на поверхность изделия и бетон разрушается (рис. 1в).

В то же время стальная арматура в бетоне в нормальных условиях хорошо защищена от коррозии благодаря электрохимической пассивации стали, которая является следствием щёлочности бетона.

Железобетон известен как долговечный материал, в большинстве случаев не нуждающийся в защите от воздействий внешней среды. Системное изучение стойкости железобетонных конструкций в различных условиях эксплуатации показало, что наиболее часто встречающиеся повреждения железобетона связаны с развитием коррозионных процессов в арматуре

Водородный показатель pH бетона обычно превышает 12,5. При таких высоких значениях pH образуется микроскопической толщины пассивационный слой окисла железа на поверхности стали, то есть плёнка пассивационного слоя, которая предотвращает разрушение стали. Реальная эксплуатация железобетонных изделий (ЖБИ) не всегда проходит в нормальных условиях. Это и избыточная влажность окружающей среды (грунта,

воздуха), и загрязнение их поверхностей, и несоблюдение требований монтажных работ, которые приводят к появлению сколов на торцевых сторонах изделия, частичному оголению арматуры и другим дефектам. Отсюда и низкая их долговечность, и большие затраты на ремонт и замену ЖБИ в системе ЖКХ. Всё это негативно отражается на сохранности и надёжности функционирования инженерных коммуникаций, помещённых в них.

По вопросам коррозии арматуры в бетоне выполнено не так много работ, по сравнению с исследованиями катодной защиты подземных трубопроводов, главным образом магистральных нефтегазовых трубопроводов, где катодная защита металла достигается электрическим соединением с проложенным вблизи защищаемого трубопровода металлическим анодом, например, в виде отрезка трубы (называемым «жертвенным анодом») посредством тока от внешнего источника. В этом случае анод с течением времени разрушается, сохраняя защищаемый трубопровод от коррозии. Подобные мероприятия трудоёмкие и весьма затратные.

Возможен и второй путь катодной защиты металла — использование так называемого «гальванического эффекта». В этом случае необходима электролитическая связь между защищаемым металлом и анодом, в качестве которого часто применяются алюминий и цинк, обладающие большим электрическим потенциалом по сравнению с железом.

Железобетонные изделия подземных коммуникаций ЖКХ, исходя из условий эксплуатации, практически всегда содержат физически связанную капиллярную воду, которая как раз и служит электролитом, то есть проводником зарядов при протекании коррозионных процессов металла в бетоне. Его же можно использовать и для защиты металла от коррозии.

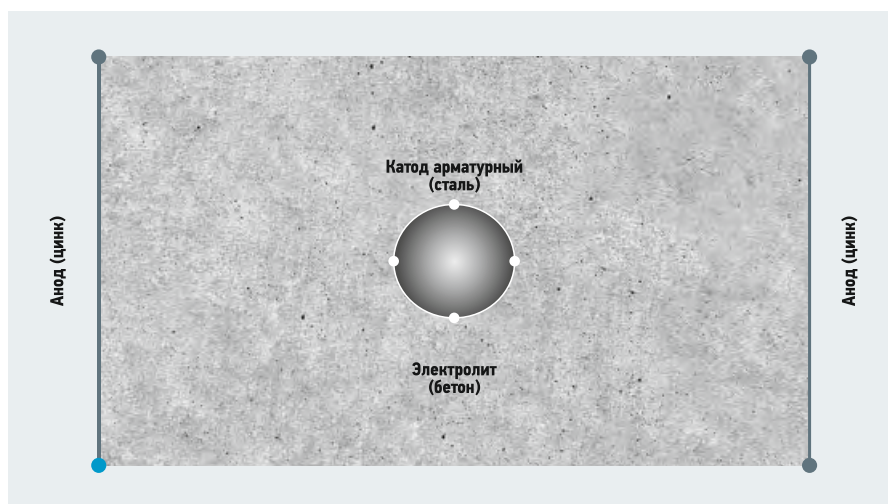


Рис. 2. Геометрия ячейки модели элемента ЖБИ



В настоящее время для исследования коррозионных явлений стали в бетоне существуют теоретически обоснованные подходы [6–8], однако реальные условия эксплуатации ЖБИ требуют учёта множества ещё недостаточно изученных факторов при оценке работоспособности этого вида изделий. Для подобных исследований можно использовать программное обеспечение COMSOL Multiphysics, которое предназначено для численного моделирования научных и инженерных задач. Ниже приводится одно из подобных решений на основе численного моделирования коррозионного процесса стальной арматуры ЖБИ, применяемых в ЖКХ [9, 10].

За основу взята известная методика так называемой «катодной защиты» (Cathode Protection, CP) металлических изделий в грунте, являющаяся также общей стратегией замедления коррозии стальной арматуры в бетонных конструкциях [9]. Учтены особенности структуры и эксплуатации ЖБИ, применяемых в ЖКХ, возможности переноса результатов модельного исследования на реальные конструкции изделий. Принятая модель состоит из ячейки (рис. 2), отражающей все

электрохимические процессы коррозии в реальных условиях работы ЖБИ. Ячейка в виде сечения элемента ЖБИ включает стержень арматуры в бетоне и цинковые аноды, расположенные справа и слева от неё, которые в данном случае могут быть выполнены методом напыления. Бетон представляет собой пористый материал, а водная среда в нём действует как электролит. Аноды и стальная поверхность арматуры электрически соединены через потенциал электролита.

Многие бетоны для изделий ЖКХ могут иметь пористость до 60%. Уровень насыщения пор в модели принят для изучения в пределах 0,2–0,8, что обеспечивает движение ионов и газов процесса коррозии и определяет зависимость коррозии арматуры от содержания влаги в бетоне. Тем самым отражена практическая широта применения ЖБИ во влажной воздушной и грунтовой среде.

Исследована возможность снижения коррозии арматуры ЖБИ путём использования катодной поляризации. В частности, одна из разновидностей катодной защиты (так называемая «протекторная защита») достигается присоединением к защищаемому металлу более активного

металла (протектора). В данном случае проверяется возможность использования менее дорогостоящего метода катодной защиты — изготовление протектора путём технологии напыления на бетон анода из металлического цинка, электрический потенциал которого больше потенциала материала арматуры. При возникновении разности потенциалов между арматурой и протектором разрушается протектор (анод), в результате чего арматура сохраняется от коррозии.

Использовался интерфейс The Tertiary Current Distribution, Nernst-Planck [9], который учитывает распределение токов в диффузионной среде при протекании электрохимических реакций. Экспериментально показано, что электропроводность электролита зависит от уровня насыщения пор бетона, а кинетика электродов стального стержня описывается как реакция восстановления кислорода на поверхности стали в соответствии с законом Фарадея.

Результатом исследования являются основные зависимости коррозионного процесса стали в бетоне. На рис. 3а показаны распределение потенциала электролита бетона и линии плотности тока для уровня насыщения пор 0,8 модели изделия. Потенциал электролита вблизи анодов равен 0,65 В, с левой и правой сторон модели одинаков вследствие симметрии ячейки, а вблизи поверхности стержня арматуры равен 0,25 В. Таким образом, для токов электрохимических реакций между анодом и катодом выстроился путь движения зарядов. В то же время величина защитного потенциала для крупных промышленных объектов принимается примерно 0,85 В, а величина защитной плотности тока — 0,4 мА/м², причём эти значения создаются с помощью тока от внешнего источника [1].

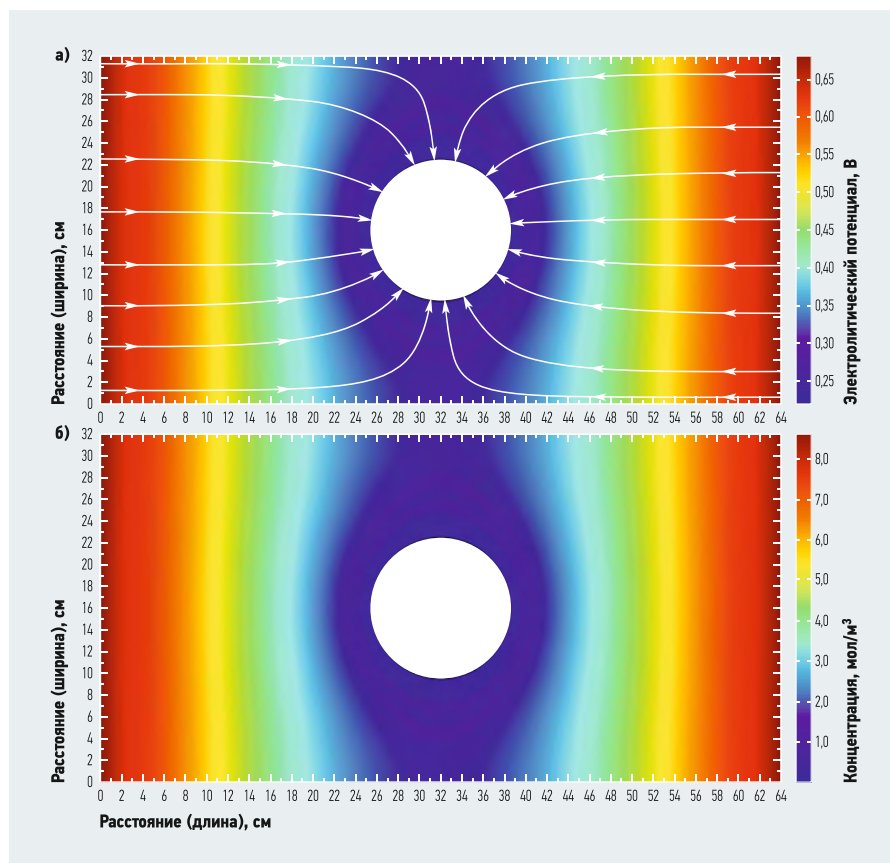


Рис. 3. Электрохимические характеристики электролита бетона для уровня насыщения пор (влажности) 0,8 (а — распределение потенциала электролита бетона и линии плотности тока, б — концентрация кислорода)

Изменение цветного фона потенциала электролита бетона (от красного к синему) показывает некоторое ослабление его сверху и снизу от стержня арматуры, в то время как левая и правая стороны стержня арматуры защищены от коррозии лучше. Для выравнивания защищенности верхней и нижней сторон стержня арматуры можно рекомендовать размещение анодов и с этих сторон модели.

Можно отметить, что для защиты от коррозии реальных железобетонных изделий данным методом необходимо создать им аналогичные условия и определить с помощью приборов достаточность потенциала электролита.

На рис. 3б показана концентрация кислорода в электролите для уровня насыщения пор 0,8. Концентрация очень низкая вблизи арматуры, что указывает на то, что скорость коррозии будет минимальна. Скорость коррозии прямо пропорциональна концентрации кислорода, что отвечает механизму диффузионной кинетики с ограниченным массообменом для этого уровня насыщения пор. А в соответствии с законом Фарадея количество вещества, участвующего в электрохимической реакции, прямо пропорционально количеству прошедшего электричества. Это показывает, что снижение скорости движения коррозионной среды понижает процесс разрушения металла при его катодной защите.

Важным фактором коррозионного процесса арматуры является потенциал электрода, влияющий на окисление металла. На рис. 4а показан потенциал электрода для различных уровней насыщения пор в двух характерных точках поверхности модели арматуры — передней и средней (в силу симметрии значения для левой и правой и для верхней и нижней точек попарно равны). Видно, что потенциал электрода значительно падает при достижении уровня насыщения пор 0,65. Известно, что при насыщении бетона влагой диффузия кислорода на катодных участках сильно замедляется. Поэтому процесс коррозии арматуры практически останавливается при высокой влажности воздуха.

Поскольку коррозия арматуры в бетоне является в основном электрохимическим процессом и арматурная сталь неоднородна по структуре, как и контактирующая с ней бетонная среда, создаются все условия для появления на поверхности катода участков, на которых коррозионные процессы протекают быстрее, чем на других, рядом расположенных. Там будет происходить растворение металла, и их называют локальными анодными участками

Однако это справедливо лишь для плотного бетона. В недостаточно плотном бетоне многочисленные крупные сквозные поры не закрываются влагой, кислород продолжает свободно поступать к поверхности арматуры, и процесс коррозии вновь начинает расти. Появление кислорода на металле приводит к его окислению, поэтому дальнейшее поступление кислорода уже проходит на окисленной поверхности. Однако окисные плёнки хрупкие и могут разрушаться. Таким образом, кислород является одновременно стимулятором и ингибитором. С одной стороны, он способствует образованию защитной окисной плёнки, то есть уменьшает коррозию, с другой — повышает скорость коррозии в точках, начавших корродировать (коррозионных центрах).

Поскольку коррозия арматуры в бетоне является в основном электрохимическим процессом и арматурная сталь неоднородна по структуре, как и контактирующая с ней бетонная среда, создаются все условия для появления на поверхности катода участков, на которых коррозионные процессы протекают быстрее, чем на других, рядом расположенных. Там будет происходить растворение металла, и их называют локальными анодными участками. Катодные и анодные участки чередуются в виде отдельных пятен или точек и имеют микроразмеры, и на поверхности металла, подвергшейся коррозии, их число может быть значительно.

На рис. 4б показаны местные плотности тока для различных уровней насыщения пор. Абсолютная величина плотности тока восстановления кислорода наиболее высока при уровне насыщения пор, равном 0,60–0,65. До этого момента значение плотности увеличивается из-за увеличения тока электролита, но для более высоких уровней насыщения пор плотности тока уменьшаются из-за пониженной диффузии кислорода через окисные плёнки.

Как отмечалось выше, при катодной поляризации в определённом интервале потенциалов на металле будут происходить одновременно два процесса: восстановление кислорода и окисление металла. Пределы эволюции плотности тока локального водорода показаны на рис. 4в. Её рост по абсолютной величине очень ограничен до уровня насыщения пор 0,65, при котором потенциал электрода становится ниже равновесного потенциала (–0,97 В) для эволюции водородной реакции (рис. 4а).

Уменьшение скорости анодной реакции при катодной поляризации эквивалентно уменьшению скорости коррозии.

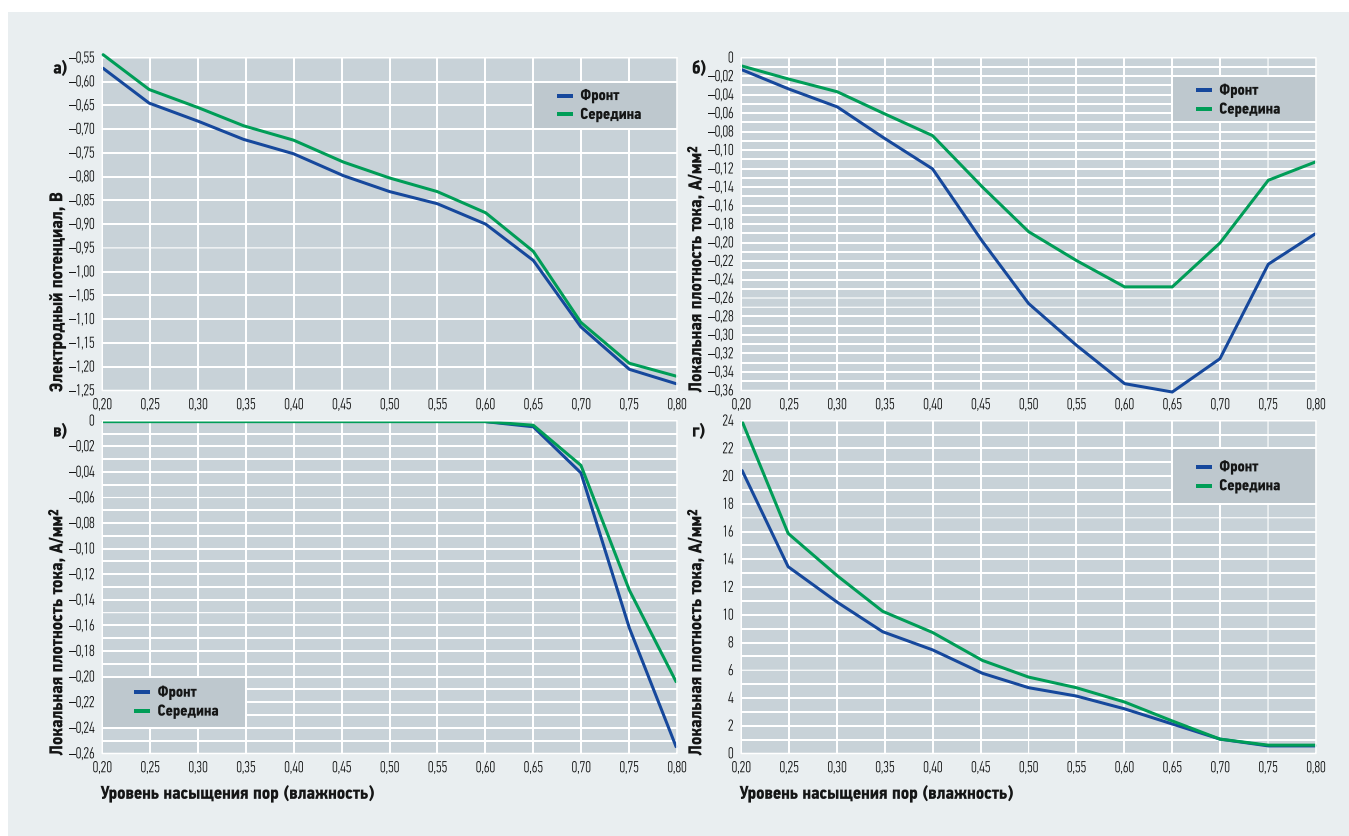


Рис. 4. Распределение характеристик электрохимических процессов на арматуре ЖБИ по уровню насыщения пор (влажности) (а — потенциал электрода; б — плотность местного тока; в — эволюция плотности тока локального водорода; г — эволюция плотности тока на катоде)

Плотность тока окисления железа показана на рис. 4г. Видно, что коррозионный ток выше для низких уровней насыщения пор. Это соответствует более высокому потенциалу электрода для низких уровней насыщения пор (рис. 4а). Следует отметить, что при снижении плотности тока величина окисления железа значительно уменьшается, что указывает на эффективность нанесения цинка на бетон для защиты стального арматурного стержня от коррозии.

Данный показатель (рис. 4г) получен для всего диапазона насыщения влагой бетона (0,2–0,8). Линии на графике показывают плотность тока окисления железа в двух характерных точках поверхности стержня арматуры — передней и средней (то есть для попарно равных значений в левой и правой, нижней и верхней точках). Коррозионный ток на уровне насыщения 0,5–0,8 невысокий. Это указывает на работоспособность предложенного метода по катодной защите арматуры железобетонных изделий жилищно-коммунального хозяйства во влажной среде воздуха или грунта.

Заключение

1. Непременным условием повышения надёжности и длительности жизненного цикла трубопроводов подземных коммуникаций ЖКХ можно считать размеще-

ние их в соответствующих герметичных лотках, коробах, коллекторах, эффективно защищающих от механических воздействий и от влияния погодных факторов и почвенной влаги.

2. Срок службы самих сооружений железобетонных изделий, предназначенных для защиты подземных коммуникаций, во многом определяется эффективностью защиты металлической арматуры от коррозионных процессов.

3. Перспективной коррозионной защитой арматуры железобетонных изделий может быть протекторная защита, которая для подобных изделий жилищно-коммунального хозяйства, отличающихся умеренными габаритами, достигается, например, изготовлением протектора путём технологии напыления металлического цинка на их поверхности в зоне расположения арматуры.

4. Полученные результаты численного моделирования катодной защиты арматуры ЖБИ с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics позволяют на основе применения метода подобия переносить их на реальные структуры железобетонных изделий.

5. Поиск оптимальных решений подобных задач для реальных железобетонных изделий жилищно-коммунального хозяйства должен опираться на соответствующие технологии нанесения элемен-

тов цинкового анода и регламент контроля параметров коррозионного процесса при их эксплуатации. •

1. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Газев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. — М.: Стройиздат, 1980. 535 с.
2. Чухин В.А., Андрианов А.П. Анализ причин коррозии оцинкованных труб в системе ГВС // Журнал С.О.К., 2018. №1. С. 54–58.
3. Deshpande K. Multiphysics Modeling of stress corrosion in underground pipelines. COMSOL Blog. Web-source: comsol.com. Access data: December 10, 2018.
4. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование коррозионного процесса подземных трубопроводов ЖКХ в COMSOL Multiphysics // Журнал С.О.К., 2018. №6. С. 34–37.
5. Xu L.Y., Cheng Y.F. Development of a finite element model for simulation and prediction of mechanochemical effect of pipeline corrosion. Corrosion Science. 2013. Vol. 73. Pp. 150–160.
6. Жуков Е.М., Кропотов Ю.И., Лутинин И.А., Полошков С.И., Легаева Л.А. Коррозия железобетонных конструкций и причины её возникновения // Молодой учёный, 2016. №7. С. 78–80 [Электр. ресурс]. Режим доступа: moluch.ru. Дата обраш.: 10.12.2018.
7. ГОСТ 31384–2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.
8. Muehlenkamp E.B., Koretsky M.D., Westall J.C. Effect of moisture on the spatial uniformity of cathodic protection of steel in reinforced concrete. Corrosion. 2005. Vol. 61. No. 6. Pp. 519–533.
9. COMSOL Multiphysics User's Guide: Model electrochemical corrosion processes and cathodic protection designs with the corrosion module. Web-source: comsol.com. Access data: December 10, 2018.
10. Guofu Qiao, Bingbing Guo, Jinping Ou. Numerical simulation of the impressed current cathodic protection system for a reinforced concrete structure. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computers, Communication and Control. Web-source: ieeexplore.ieee.org. Access data: December 10, 2018.

References — see page 94.

Modeling of cathodic protection of reinforced concrete products for the placement and safety of pipelines housing and communal services in COMSOL Multiphysics. Pp. 16–20.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexey S. Kochetkov**, graduate student; **Nikolay N. Gubanov**, graduate student, Russian State University of Tourism and Service (RGUTIS)

1. Moskvina V.M., Ivanov E.M., Alekseev S.N., Gazeev E.A. *Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods for their protection]. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of literature on the construction and architecture of the USSR]. 1980. 535 p. [In Russian]
2. Chuhin V.A., Andrianov A.P. *Analiz prichin korrozii ocinkovannykh trub v sisteme GVS* [An analysis of the causes of corrosion of galvanized pipes in hot water supply systems]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 1. Pp. 54–58. [In Russian]
3. Deshpande K. Multiphysics modeling of stress corrosion in underground pipelines. COMSOL Blog. Web-source: [comsol.com](https://www.comsol.com). Access data: December 10, 2018.
4. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. *Modelirovanie korrozionnogo processa podzemnykh truboprovodov ZhKH v COMSOL Multiphysics* [Modeling of corrosion process of underground pipelines of housing and communal services in COMSOL Multiphysics]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 6. Pp. 34–37. [In Russian]
5. Xu L.Y., Cheng Y.F. Development of a finite element model for simulation and prediction of mechanochemical effect of pipeline corrosion. *Corrosion Science*. 2013. Vol. 73. Pp. 150–160.
6. Zhukov E.M., Kropotov Ju.I., Luginin I.A. et al. *Korroziya zhelezobetonnykh konstruktsiy i prichiny ee vozniknoveniya* [Corrosion of reinforced concrete structures and its causes]. *Molodoj uchenyy* [“Young scientist” Magazine]. 2016. No. 7. Pp. 78–80. Web-source: moluch.ru. Access data: December 10, 2018. [In Russian]
7. GOST [State industry standard of Russia] 31384–2017. *Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy ot korrozii. Obshhie tehicheskie trebovaniya* [Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General technical requirements]. Moscow. *Standartinform* [Federal State Unitary Enterprise “Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology And Conformity Assessment”]. 2018. 54 p. [In Russian]
8. Muehlenkamp E.B., Koretsky M.D., Westall J.C. Effect of moisture on the spatial uniformity of cathodic protection of steel in reinforced concrete. *Corrosion*. 2005. Vol. 61. No. 6. Pp. 519–533.
9. COMSOL Multiphysics User's Guide: Model electrochemical corrosion processes and cathodic protection designs with the corrosion module. Web-source: [comsol.com](https://www.comsol.com). Access data: December 10, 2018.
10. Guofu Qiao, Bingbing Guo, Jinping Ou. Numerical simulation of the impressed current cathodic protection system for a reinforced concrete structure. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computers, Communication and Control. Web-source: ieeexplore.ieee.org. Access data: December 10, 2018.