

Строительные материалы и изделия

УДК 666.97:624.012.45:536.24:519.6

© А. И. Нижегородова, аспирант

© Я. Д. Агеева, аспирант

© В. В. Молодин, д-р техн. наук, доцент,
советник РААСН

© С. Г. Чернова, д-р экон. наук, профессор

© А. А. Белкин, д-р физ.-мат. наук, профессор
(Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск, Россия)

E-mail: a.nizhegorodova@sibstrin.ru, ya.ageyeva@sibstrin.ru,
molodin@sibstrin.ru, s.chernova@sibstrin.ru,
a.belkin@sibstrin.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-2-81-89

© A. I. Nizhegorodova, post-graduate student

© Ya. D. Ageeva, post-graduate student

© V. V. Molodin, Dr. Sci. Tech., Associate Professor,
Advisor of the RAACS

© S. G. Chernova, Dr. Sci. Ec., Professor

© A. A. Belkin, Dr. Sci. Phys.-Math., Professor
(Novosibirsk State University
of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russia)

E-mail: a.nizhegorodova@sibstrin.ru, ya.ageyeva@sibstrin.ru,
molodin@sibstrin.ru, s.chernova@sibstrin.ru,
a.belkin@sibstrin.ru

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ГРАДИЕНТА В БЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ ФОРСИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОДНОМ НАГРЕВЕ

MECHANISM OF TEMPERATURE–MOISTURE GRADIENT FORMATION IN CONCRETE MIXTURE UNDER FORCED ELECTRODE HEATING

Рассмотрен механизм формирования температурно-влажностного градиента в контактной зоне «карбонизированное бетонное основание–ремонтный слой» при форсированном электроразогреве ремонтной смеси. Экспериментальная часть включала изготовление образцов пескобетона класса В35, ускоренную карбонизацию и последующий электроконтактный нагрев с регистрацией температуры и электрического сопротивления во времени. Показано, что форсированный нагрев приводит к формированию нестационарного температурного поля, перераспределению влаги и изменению электрофизических характеристик материала. Рост температуры вызывает увеличение парциального давления водяного пара, что формирует движущую силу направленного влагопереноса в капиллярно-пористой структуре бетона. Разработана математическая модель нестационарного теплопереноса с учетом джоулева тепловыделения и диффузионного переноса влаги. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало удовлетворительное совпадение результатов: коэффициент детерминации составляет 0,90–0,98, относительная погрешность не превышает 6 %. Показано, что форсированный электроразогрев может рассматриваться как фактор интенсификации теплопереноса и формирования благоприятных условий сцепления ремонтного состава с карбонизированным основанием.

Ключевые слова: теплоперенос, карбонизация бетона, форсированный электроразогрев.

The paper examines the mechanism of temperature–moisture gradient formation in the contact zone between a carbonated concrete substrate and a repair layer under forced electrode heating. The experimental program included the preparation of sand concrete specimens of strength class B35, accelerated carbonation, and subsequent electro-contact heating with continuous monitoring of temperature and electrical resistance over time. The results demonstrate that forced heating leads to the formation of a non-stationary temperature field accompanied by moisture redistribution and changes in the electro-physical properties of the material. Temperature increase results in a rise in the partial pressure of water vapor, which generates the driving force

for directed moisture transport within the capillary-porous structure. There has been developed a mathematical model of non-stationary heat and mass transfer accounting for Joule heat generation and diffusive moisture transport. Comparison of the numerical and experimental results shows satisfactory agreement: the coefficient of determination ranges from 0.90 to 0.98, while the relative error does not exceed 6 %. It is demonstrated that forced electric heating can be considered as a factor of mass transfer intensification and formation of favorable conditions of repair compound adhesion to carbonized base.

Keywords: heat and mass transfer, concrete carbonation, forced electrode heating.

Введение

Проблема деградации цементного камня вследствие карбонизации остается одной из ключевых задач в области долговечности бетона и железобетона [1]. Снижение щелочности порового раствора, перераспределение влаги, изменение фазового состава гидратных новообразований приводят к ухудшению сцепления ремонтного состава с карбонизированной поверхностью, что ограничивает эффективность традиционных технологий.

Фундаментальные исследования переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых материалах являются основой анализа эксплуатационного состояния цементного камня, подвергнутого карбонизации [2, 3]. Формирование градиентов влажности и температуры определяет интенсивность диффузионно-конвективных процессов массопереноса, влияющих на перераспределение жидкой и газовой фаз в поровом пространстве.

При электродном форсированном нагреве ремонтной смеси локальное тепловое воздействие приводит к изменению термодинамического равновесия системы и стимулирует перенос цементного раствора — усиление естественных миграционных потоков в пористой структуре цементного камня. Подобные процессы обусловлены зависимостью коэффициентов диффузии и парциального давления водяного пара от температуры [4–6]. Управление температурно-влажностным режимом рассматривается как перспективный подход к прогнозированию структурной перестройки цементного камня и повышению эффективности восста-

новления эксплуатационных характеристик бетонных и железобетонных конструкций.

Цель исследования — установить механизм формирования температурно-влажностного градиента в контактной зоне «карбонизированный бетон–ремонтный слой» при форсированном электродном нагреве и оценить его влияние на процессы массопереноса.

Экспериментально-расчетная методика исследования процессов тепломассопереноса

Экспериментально-расчетный подход направлен на установление закономерностей формирования температурно-влажностного состояния контактной зоны «карбонизированное основание–ремонтный состав» при форсированном электродном нагреве.

Экспериментальная часть. Образцы изготавливались из пескобетона класса В35 (аналог М350) с В/Ц = 0,42. Размер образцов — 70×70×70 мм, опалубка и расположение датчиков показаны на рис. 1, а, уплотнение смеси проводилось на вибростоле в течение 20 с.

В теле образцов на стадии изготовления устанавливались термодатчики PT1000 и двухэлектродные кондуктометрические датчики (посеребренные стержни $\varnothing 1,5$ мм, межэлектродное расстояние 2 мм) (рис. 1, б). Кондуктометрические датчики (W) предназначены для измерения электрического сопротивления среды между электродами, что позволяет косвенно оценивать изменение ее влагосодержания и структуры. Датчики подключались к модулям аналогового ввода «ОВЕН» МВ110-224.8А с выводом данных на

панель оператора ETG 4.3. Регистрация параметров осуществлялась с дискретностью 10 с в формате CSV (рис. 2, а).

Формовались три группы образцов:

1. Образцы после ускоренной карбонизации (камера Розенталя–Язева, $p(\text{CO}_2) = 1,2$ МПа, 72 ч).

2. Образцы нормального твердения (28 сут, 20 ± 2 °С, $\varphi \geq 95$ %).

3. Контрольная группа без воздействия CO_2 .

Перед формированием контактной зоны карбонизированный слой измерялся, после чего удалялся механически на глубину 2 см до здоровой структуры. Основание предварительно увлажнялось до насыщенно-сухого состояния (Saturated Surface Dry — SSD, т. е. поры материала полностью заполнены водой при отсутствии свободной влаги на поверхности) в течение 6 ч для стабилизации начального влагосодержания и снижения капиллярного подсоса.

Форсированный нагрев осуществлялся методом электроконтактного нагрева с использованием двух токопроводящих пластин, подключенных к понижающему трансформатору, соединенному с источником постоянного тока 220 В (рис. 2, б).

Скорость нагрева составляла 270 °С/ч, нагрев производился до 75–80 °С. Электрический ток пропускался через объем влажной капиллярно-пористой среды, что обеспечивало равномерное тепловыделение за счет джоулева нагрева и активацию процессов теплопереноса в контактной зоне. Такая схема позволяла контролировать кинетику изменения температуры и электрического сопротивления материала при форсированном термическом воздействии.

Математическая модель. Электронагрев контактной зоны «карбонизированный бетон–ремонтный слой» рассматривается как нестационарный процесс теплопереноса во влажной капиллярно-пористой среде при внутреннем источнике тепловыделения. Приняты следующие допущения для построения модели:

1. Материал рассматривается как изотропная капиллярно-пористая среда.

2. Плотность ρ , теплоемкость c и теплопроводность λ принимаются постоянными в рассматриваемом температурном интервале.

3. Электрическое поле считается квазистационарным и равномерным в пределах сечения.

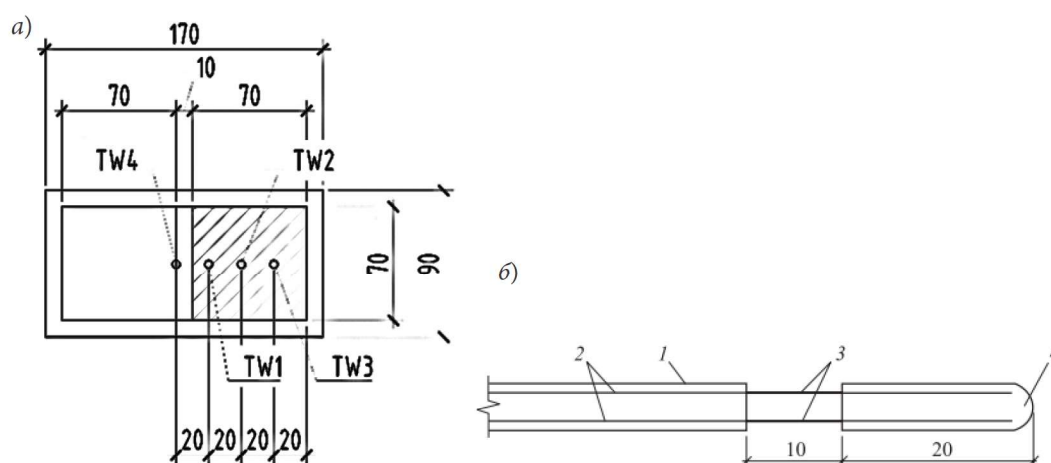


Рис. 1. Схемы: а — схема расположения датчиков температуры (T) и кондуктометрических датчиков (W); б — конструкция кондуктометрического датчика электрического сопротивления (1 — провод ПРППМ; 2 — изолированные медные жилы; 3 — медные жилы без изоляции; 4 — изоляция)

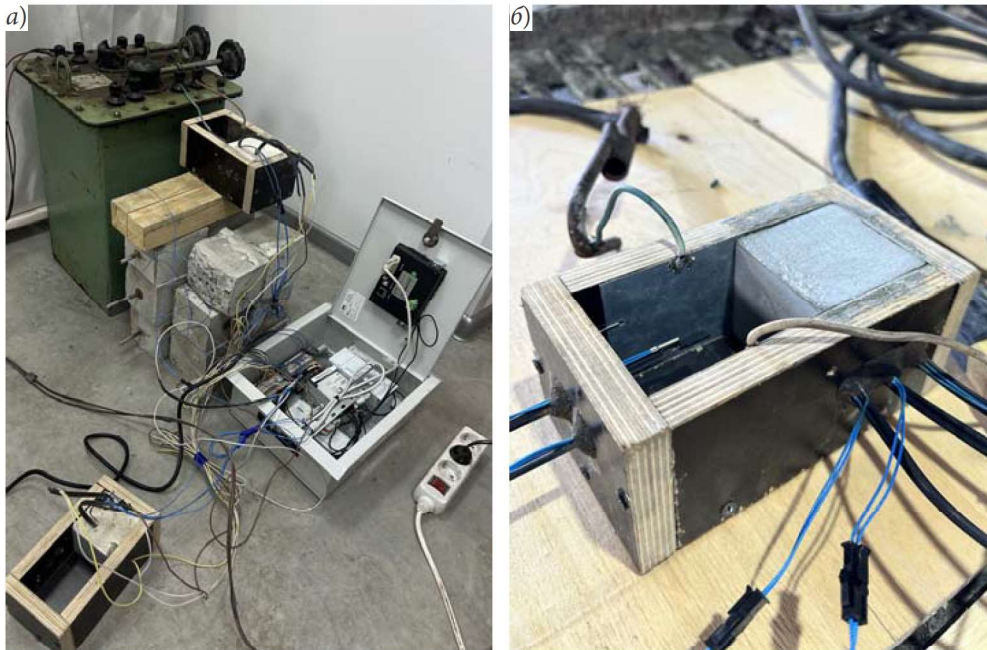


Рис. 2. Экспериментальная установка для нагрева: а — фото; б — внешний вид токопроводящих пластин

4. Конвективный перенос влаги отсутствует; перенос осуществляется преимущественно диффузионным механизмом.

5. Эффективный коэффициент диффузии D_{eff} учитывает совокупное действие капиллярного и пародиффузионного переноса.

6. Начальное влагосодержание стабилизировано режимом SSD-предувлажнения.

Процесс электроразогрева описывался уравнением сохранения энергии для влажной капиллярно-пористой среды. Рассмотрим элементарный объем материала dV . Баланс энергии записывается в форме [2, 7]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho c T = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_{el} + Q_{tr}, \quad (1)$$

где Q_{el} — объемная мощность электрического нагрева; Q_{tr} — тепловой эффект фазовых переходов влаги.

Переходя к одномерному случаю технологической схемы эксперимента, получаем нестационарную нелинейную модель тепло-массопереноса в строительном композите:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \sigma(T) E^2 + L_v \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (2)$$

где $\sigma(T)$ — электропроводность; E — напряженность электрического поля; L_v — скрытая теплота испарения воды; W — массовая доля влаги.

Член $\sigma(T)E^2$ описывает джоулево тепло-выделение при подключении нагревательных пластин к трансформатору.

Перенос влаги в капиллярно-пористой системе ремонтного слоя описывается законом диффузии. Поток влаги принимается пропорциональным градиенту влажности:

$$J_w = -D_{eff} \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (3)$$

где D_{eff} — эффективный коэффициент диффузии.

Соответствующее нестационарное уравнение:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - S(T, W), \quad (4)$$

где $S(T, W)$ — объемная скорость изменения влагосодержания, обусловленная фазовыми переходами и зависящая от температуры T и текущего влагосодержания W [3].

Для замыкания системы уравнений функция $S(T, W)$ задается в виде зависимости от температуры и текущего влагосодержания материала на основе кинетики испарения:

$$S(T, W) = \beta W. \quad (5)$$

В приближении пространственной однородности контактной зоны получаем кинетическое уравнение

$$\frac{dW}{dx} = -\beta W. \quad (6)$$

Решение (6):

$$W(t) = W_0 e^{-\beta t}, \quad (7)$$

где W_0 — начальное влагосодержание.

Поскольку количество испаряющейся воды пропорционально текущему влагосодержанию, парциальное давление пара можно представить как

$$P_v(t) = P_{v0} \frac{W(t)}{W_0}. \quad (8)$$

Подставляя (6), получаем согласованную термодинамическую зависимость

$$P_v(T, t) = P_{v0} e^{-\beta t}. \quad (9)$$

Таким образом, парциальное давление водяного пара является функцией как текущего влагосодержания, так и температурного режима:

$$P_v = P_v(T, W). \quad (10)$$

В условиях локального термодинамического равновесия величина парциального давления ограничивается температурной зависимостью давления насыщения, тогда как фактическое значение определяется текущей влажностью материала.

Экспериментально установленный режим SSD-предувлажнения обеспечивает снижение градиента капиллярного подсоса воды и стабилизирует начальные условия диффузионного процесса.

Фазовое равновесие в зоне контакта описывается термодинамическим соотношением

$$\frac{\partial P_v}{\partial T} = \frac{L_v P_v}{RT^2}, \quad (11)$$

где P_v — парциальное давление водяного пара; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Интегрирование дает зависимость давления пара от температуры

$$\ln P_v = -\frac{L_v}{R} \frac{1}{T} + C, \quad (12)$$

что свидетельствует об экспоненциальном росте парциального давления при увеличении температуры контактной зоны [5]. С учетом кинетической зависимости $W(t)$ фактическое давление пара можно представить в виде

$$P_v(T, t) = P_{sat}(T) W(t) / W_0. \quad (13)$$

Градиент давления пара является движущей силой миграции влаги в системе «старый бетон–ремонтный слой»:

$$\nabla P_v \neq 0. \quad (14)$$

Кинетика нагрева аппроксимируется решением нелинейного уравнения релаксационного типа

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k(T_{\max} - T). \quad (15)$$

Решение имеет вид

$$T(t) = T_0 + (T_1 - T_0)(1 - e^{-k_1 t}) +$$

$$+(T_{\max} - T_1)(1 - e^{-k_2(t-t_1)})H(t-t_1), \quad (16)$$

где t_1 — начало интенсивного нагрева (750 с); H — функция Хевисайда (включение второй стадии).

Приняты параметры: $T_0 = 18,28$ °C; $T_1 = 52$ °C; $T_{\max} = 71,5$ °C; $k_1 = 1,6 \times 10^{-3}$ с⁻¹; $k_2 = 6,5 \times 10^{-3}$ с⁻¹. Электропроводность влажной цементной системы описывается эмпирической зависимостью, соответствующей активационному механизму переноса заряда в поровом растворе:

$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{\beta(T - T_0)}. \quad (17)$$

Корреляционный анализ показал

$$r_{TR} = 0,68, \quad (18)$$

что подтверждает нелинейность электрофизических характеристик материала. Электрическое сопротивление поровой среды принимается функцией температуры и влагосодержания [4, 8, 9]:

$$R = R_0 \exp(\alpha_1 T - \alpha_2 W), \quad (19)$$

где α_1 — коэффициент термоактивации проводимости; α_2 — коэффициент влагонезависимого переноса заряда.

Тогда граничные условия:

1. Начальное распределение температуры и влажности:

$$T(x,0) = T_{init}, W(x,0) = W_{init}. \quad (20)$$

2. Теплоизоляция формы:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0,L} = 0. \quad (21)$$

3. Отсутствие потока влаги через боковые поверхности:

$$\left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=0,L} = 0. \quad (22)$$

Уравнения (2)–(4), рассматриваемые совместно как система, решались конечно-разностным методом по неявной схеме [7, 10]. Пространственный шаг составлял 1 мм, шаг по времени — 10 с. Устойчивость расчета обеспечивалась выполнением условия сходимости по норме относительной погрешности менее 10^{-4} .

Эффективные параметры D_{eff} , k и коэффициенты, входящие в зависимость $\sigma(T)$, определялись путем минимизации среднеквадратичного отклонения между расчетными и экспериментальными кривыми $T(t)$ и $R(t)$.

После задания начальных и граничных условий решение полученной системы уравнений характеризует распределение температуры и влаги в пределах контактной зоны при форсированном электроразогреве. Температурный градиент приводит к снижению электропроводности и тепловыделения, тогда как неоднородность влагосодержа-

ния приводит к формированию градиента парциального давления водяного пара. Совместное действие указанных факторов формирует направленные потоки тепла и влаги, изменяющие локальные условия гидратации и переноса продуктов гидратации цемента.

Проверка работоспособности модели выполнялась путем сравнения расчетного температурного и влажностного профиля с экспериментальными данными. Данные регистрировались с дискретностью 60 с (при необходимости — 10 с) и включали значения температуры $T_{exp}(t)$ и электрического сопротивления $R_{exp}(t)$, характеризующего влагосодержание порового пространства. Расчетные значения $T_{mod}(t)$ и $W_{mod}(t)$ получены численным решением системы уравнений тепломассопереноса при заданных значениях параметров a_{eff} , D_{eff} , k и $\sigma(T)$ (таблица).

Установлено, что рост температуры контактной зоны сопровождается изменением электрического сопротивления материала, что косвенно отражает перераспределение влаги в поровом пространстве цементной системы (рис. 3).

Наблюдаемая обратная зависимость между температурой и электропроводностью соответствует активационному механизму переноса заряда в поровом растворе и подтверждает нелинейный характер электрофизического поведения влажного цементного камня (рис. 4) [3, 6].

Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры и парциального давления водяного пара

| t, c | $T_{exp}, ^\circ C$ | R_{exp}, kPa | $T_{mod}, ^\circ C$ | R_{mod}, kPa | $\Delta T, ^\circ C$ | $\Delta R, kPa$ | $ \Delta T /T_{exp}, ^\circ C$ | $\Delta R/R_{exp}, kPa$ |
|--------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|----------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------|
| 0 | 18,28 | 103,5 | 18,28 | 103,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 217 | 20,88 | 111,6 | 28,9 | 91,9 | -8,02 | 19,70 | 0,28 | 0,21 |
| 450 | 45,60 | 89,2 | 44,70 | 74,7 | 0,90 | 14,50 | 0,02 | 0,19 |
| 790 | 46,30 | 71,5 | 53,10 | 63,8 | -6,80 | 7,70 | 0,13 | 0,12 |
| 800 | 55,30 | 66,9 | 56,80 | 59,8 | -1,50 | 7,10 | 0,03 | 0,12 |
| 810 | 69,20 | 65,6 | 63,90 | 52,1 | 5,30 | 13,50 | 0,08 | 0,26 |
| 1720 | 70,80 | 42,7 | 70,40 | 43,8 | 0,40 | -1,10 | 0,01 | 0,03 |
| 1770 | 71,50 | 31,5 | 71,20 | 42,9 | 0,30 | -11,40 | 0,00 | 0,27 |

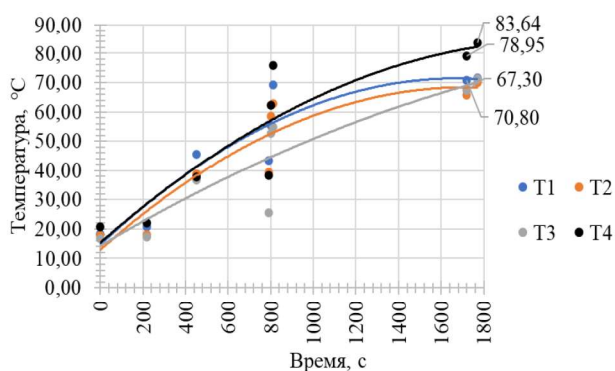


Рис. 3. Кинетика изменения температуры (T1–T4) во времени

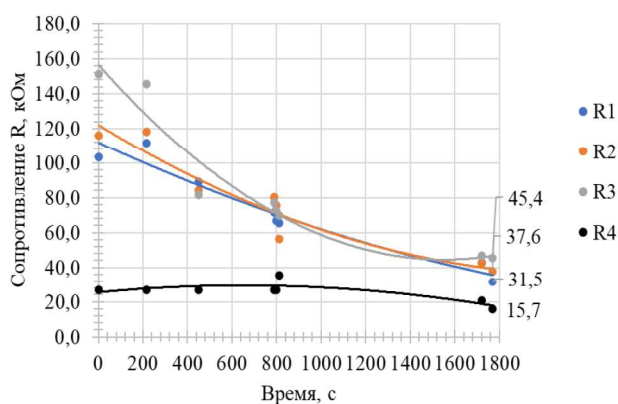


Рис. 4. Кинетика изменения электрического сопротивления (R1–R4) во времени

Для подтверждения сопряженного характера процессов теплопереноса дополнительно построена зависимость температуры, влагосодержания и электрического сопротивления материала от времени. Графическое представление результатов выполнено на основе идентифицированной математической модели (рис. 5).

Разработанная математическая модель удовлетворительно воспроизводит кинетику нагрева и изменение электрофизических характеристик материала. Среднеквадратическая ошибка аппроксимации для температурного поля находилась в диапазоне $RMSE \approx 1,4\text{--}4,3$ °C для парциального давления водяного пара 0,02–0,05 кПа. Относительная погрешность моделирования не превышала 6 %, коэффициент детерминации

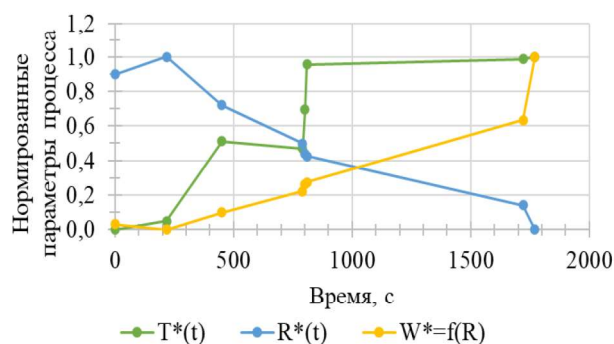


Рис. 5. Интегральная зависимость нормированных значений температуры, электросопротивления и влагосодержания в зоне электроразогрева контактной области

составил $R_T^2 \approx 0,90\text{--}0,98$; $R_{P_v}^2 \approx 0,95\text{--}0,98$. Максимальное расхождение не превышает 6 %, а среднее значение остатков аппроксимации $|\bar{\varepsilon}| = 0,00 \div 0,01$ °C близко к нулю, что указывает на отсутствие систематического смещения модели относительно экспериментальных данных.

Теоретическая зависимость давления насыщенного пара (рис. 6) демонстрирует экспоненциальный рост с увеличением температуры [5]. Однако расчетное фактическое парциальное давление [4, 8], учитывающее кинетику деградации, после достижения максимума (через ≈ 800 с) снизится вследствие уменьшения влагосодержания. В начальной стадии нагрева рост P_v определяется температурным фактором, тогда как на завершающей стадии доминирует фактор истощения влаги.

Особое значение имеет различие электрофизического отклика между карбонизованным основанием и свежим ремонтным составом. Точки измерения, расположенные в зоне карбонизованного бетона, демонстрируют более выраженную зависимость сопротивления от температурного воздействия по сравнению с зоной свежего материала, что объясняется структурными особенностями порового пространства и различием механизмов переноса влаги [1, 8].

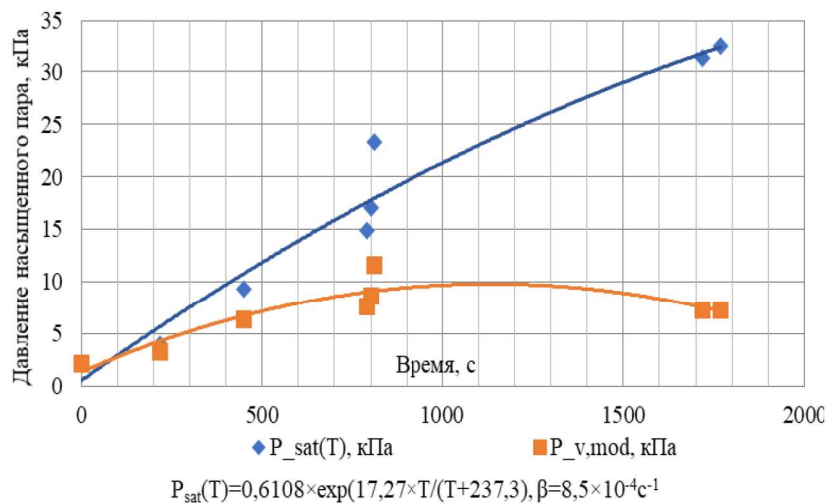


Рис. 6. Сравнение теоретического давления насыщенного пара с расчетным парциальным давлением в зоне электроразогрева

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что форсированный электроразогрев способствует формированию температурно-влажностного градиента, который может рассматриваться как фактор интенсификации миграции влаги и повышения подвижности продуктов гидратации в контактной зоне. Разработанная модель может быть использована для прогнозирования температурно-влажностного режима и оценки кинетики проникновения ремонтного состава при восстановлении карбонизированных железобетонных конструкций [11–14].

Выводы

1. Форсированный электроразогрев ремонтной смеси в контактной зоне обеспечивает формирование устойчивого температурного градиента и активизацию сопряженных процессов нестационарного теплопереноса в капиллярно-пористой цементной системе. Численная реализация математической модели с источником джоулева тепловыделения показала удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных ($R^2 = 0,90\text{--}0,98$; относительная погрешность $\leq 6\%$).

2. Температурное воздействие изменяет кинетику влагопереноса и условия форми-

рования парциального давления водяного пара, что способствует перераспределению влаги в поровом пространстве цементной матрицы и повышению плотности контактной зоны «карбонизированное основание–ремонтный состав».

3. Применение технологии форсированного электроразогрева обосновано как эффективный способ технологической интенсификации восстановления карбонизированных железобетонных конструкций, обеспечивающий улучшение структурных характеристик сцепления и снижение риска дефектного развития в условиях эксплуатации в агрессивной среде.

Библиографический список

1. Neville A. M. Properties of Concrete. 5th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2012. 846 p.
2. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
3. Bažant Z. P., Najjar L. J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete // Materials and Structures. 1972. Vol. 5. Pp. 3–20.
4. Bažant Z. P., Thonguthai W. Pore pressure and drying of concrete at high temperature // Journal of the Engineering Mechanics Division (ASCE). 1978. Vol. 104 (EM5). Pp. 1059–1080.
5. Wagner W., Pruß A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water

substance for general and scientific use // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2002. Vol. 31 (2). Pp. 387–535. DOI 10.1063/1.1461829.

6. Wang Y., Xi Y. The effect of temperature on moisture transport in concrete // *Materials*. 2017. Vol. 10 (8). 926. DOI 10.3390/ma10080926.

7. Bažant Z. P., Chern J. C., Thonguthai W. Finite element program for moisture and heat transfer in heated concrete // *Nuclear Engineering and Design*. 1982. Vol. 68 (1). Pp. 61–70.

8. Li Y., Yang E.-H., Zhou A., Liu T. Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: A review // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 284 (6). 122818. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122818.

9. Mohammed H., Ahmed H., Kurda R., Alyousef R., Deifalla A. F. Heat-induced spalling of concrete: A review of the influencing factors and their importance to the phenomenon // *Materials*. 2022. Vol. 15 (5). 1693. DOI 10.3390/ma15051693.

10. Berger J., Dutykh D., Mendes N., Rysbaiuly B. A new model for simulating heat, air and moisture transport in porous building materials // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 134. Pp. 1041–1060. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.050.

11. Калабурдин И. В. Форсированный электро-разогрев бетонных смесей // *Евразийский научный журнал*. 2017. № 2. С. 294–297.

12. Молодин В. В., Ануфриева А. Е., Навоян А. Х. Форсированный разогрев смеси как фактор увеличения сцепления бетонов, подвергшихся коррозии // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 2 (734). С. 56–71. DOI 10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71.

13. Молодин В. В., Новиков Д. С. Восстановление железобетонных конструкций, разрушенных в агрессивной среде хлора // *Строитель Донбасса*. 2023. № 3 (24). С. 26–30.

14. Молодин В. В., Леонович С. Н. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 36–41.

Reference

1. Neville A. M. *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow, Pearson Education Limited, 2012, 846 p.

2. Lykov A. V. *Vavleniya perenosa v kapillyarno-poristykh telakh* [Phenomena of transfer in capillary-porous bodies]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1954, 296 p.

3. Bažant Z. P., Najjar L. J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 1972, vol. 5, pp. 3–20.

4. Bažant Z. P., Thonguthai W. Pore pressure and drying of concrete at high temperature. *Journal of the Engineering Mechanics Division (ASCE)*, 1978, vol. 104 (EM5), pp. 1059–1080.

5. Wagner W., Pruß A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2002, vol. 31 (2), pp. 387–535. DOI 10.1063/1.1461829.

6. Wang Y., Xi Y. The effect of temperature on moisture transport in concrete. *Materials*, 2017, vol. 10 (8), 926. DOI 10.3390/ma10080926.

7. Bažant Z. P., Chern J. C., Thonguthai W. Finite element program for moisture and heat transfer in heated concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 1982, vol. 68 (1), pp. 61–70.

8. Li Y., Yang E.-H., Zhou A., Liu T. Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: A review. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 284(6), 122818. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122818.

9. Mohammed H., Ahmed H., Kurda R., Alyousef R., Deifalla A. F. Heat-induced spalling of concrete: A review of the influencing factors and their importance to the phenomenon. *Materials*, 2022, vol. 15 (5), 1693. DOI 10.3390/ma15051693.

10. Berger J., Dutykh D., Mendes N., Rysbaiuly B. A new model for simulating heat, air and moisture transport in porous building material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 134, pp. 1041–1060. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.050.

11. Kalaburdin I. V. *Forsirovanniy elektrorazogrev betonnykh smesey* [Forced electric heating of concrete mixtures]. *Evraziyskiy nauchniy zhurnal – Eurasian Scientific Journal*, 2017, no. 2, pp. 294–297.

12. Molodin V. V., Anufrieva A. E., Navoyan A. Kh. *Forsirovanniy razogrev smesi, kak faktor uvelicheniya stsepleniya betonov, podvergshikhsya korrozii* [Forced heating of the mixture as a factor in increasing the adhesion of corroded concretes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – Bulletin of higher educational institutions. Construction*, 2020, no. 2 (734), pp. 56–71. DOI 10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71.

13. Molodin V. V., Novikov D. S. *Vosstanovlenie zhelezobetonnykh konstruksiy, razrushennykh v agressivnoy srede khloro* [Restoration of reinforced concrete structures destroyed in an aggressive environment of chlorine]. *Stroitel' Donbassa – Donbass Builder*, 2023, no. 3 (24), pp. 26–30.

14. Molodin V. V., Leonovich S. N. *Stseplenie betona vosstanovleniya s korroziionno-destruktirovannoy zhelezobetonnoy konstruksiey* [Adhesion of reduction concrete with corrosion-destroyed reinforced concrete structure]. *Nauka i tekhnika – Science and Technology*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 36–41.