

УДК 51-74:699.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕССОЛИВАНИЯ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Пучков Юрий Михайлович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и архитектура».

Аннотация

Соли ускоряют разрушение каменных конструкций. Для обессоливания целесообразно использовать поле постоянного электрического тока.

Процесс обессоливания исследовался на образцах из известняка и глиняного кирпича. В экспериментах применялось математическое планирование и обработка данных при помощи полиномиальных и регрессионных моделей.

Получены оптимальные параметры обессоливания каменных конструкций.

Ключевые слова: обессоливание каменных конструкций, плотность электрического тока, полиномиальная модель, регрессионная модель, оптимальные параметры.

SIMULATION OF DESALINATION OF MASONRY STRUCTURES

Puchkov Yuriy Mikhailovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Urban construction and architecture”.

Abstract

Salt accelerates the destruction of stone structures. Desalination can use the field of direct electric current.

Desalting process was investigated on samples of limestone and clay bricks. The experiment used a mathematical planning and data processing using polynomial regression models and.

The optimal parameters of the desalination of masonry structures.

Keywords: desalination of masonry structures, electric current density, polynomial model, regression model, optimal parameters.

Увеличивающееся с годами содержание водорастворимых солей в каменных конструкциях ускоряет процесс их разрушения. Это особенно актуально для старинных сооружений, многие из которых находятся под охраной государства. В связи с этим целесообразно выполнять объёмное обессоливание каменных конструкций. В частности, можно использовать поле постоянного электрического тока [1], [2].

Процесс обессоливания каменных конструкций под действием полей постоянного электрического тока может быть описан полиномиальными моделями, с помощью которых в данном случае изучался сам процесс и выбирались оптимальные параметры его реализации. Данные для построения моделей получались в лабораторных условиях при испытании водонасыщенных образцов из известняка и глиняного кирпича размером 3х3х5 см с исходным уровнем солесодержания хлорида натрия 3,5% по массе. В эксперименте исследовалось влияние тока плотностью на электродах 0,1, 1,55 и 3,0 мА/см² при продолжительности обработки 5, 10 и 15 часов (соответственно факторы X_1 и X_2). Нижний, средний и верхний уровни этих факторов имели кодированные значения: - 1, 0, +1. После испытания образцов при заданных уровнях факторов x_1 и x_2 они раскалывались, и для анодной (- 1), средней (0) и катодной (+1) частей (фактор x_3) измерялась остаточная засолённость и рассчитывалась величина относительного солеудаления (Y_1 , %). Всего было

выполнено $N=3^3=27$ опытов при различных комбинациях уровней факторов x_1 , x_2 , x_3 . Каждый опыт повторялся трижды [1].

Полиномиальная модель процесса обессоливания, включающая значимые при $\alpha=0,05$ коэффициенты, имеет вид:

$$Y_1=52,5+14,5x_2+2,4x_3+4,2x_1^2+5,4x_1x_2+4,0x_1x_3-9,9x_2^2-5,3x_2x_3+21,1x_3^2. \quad (1)$$

При уровне значимости $\alpha=0,01$ эта модель адекватно предсказывает средние результаты опытов, так как отношение остаточной дисперсии $S^2_{\text{ост.}}=52,4$ с 18 степенями свободы к дисперсии $S^2_{\{y\}}=25,4$ с 54 степенями свободы, характеризующей ошибку эксперимента, не превышает критического $F=2,3$.

Модель (1), отражающая довольно сложный процесс обессоливания образцов, была использована для вычисления характера влияния варьируемых факторов и выбора оптимальных значений их уровней.

При увеличении продолжительности действия тока (фактор x_2) всегда имеет место положительный эффект, который усиливается при высокой плотности тока ($x_1=+1$). Однако по мере увеличения продолжительности действия тока скорость обессоливания уменьшается, что объясняется сложностью удаления остаточного солесодержания. В зоне анода и катода образец обессоливается сильнее, чем между электродами. В зависимости от уровня плотности тока и продолжительности его действия в зоне анода и катода может наблюдаться различие в значениях показателя обессоливания.

Плотность тока влияет неоднозначно. Так, повышение плотности тока при 5-часовой обработке ухудшает обессоливание в зоне анода и середины, а при 15-часовой обработке в этих же зонах – повышение солеудаления. В зоне катода увеличение плотности тока даёт положительный эффект только при обработке в течение 15 часов.

Практическое значение модель (1) имеет при использовании её для оптимизации параметров процесса обессоливания. В результате анализа было найдено три конкурирующих оптимальных решения. В двух из них плотность тока оказалась минимальной для рассматриваемого диапазона ($x_1= - 1$, $X_1=0,1$ мА/см²). Для окончательного выбора оптимальных параметров процесса

обессоливания известняка были учтены соображения физического и экономического характера.

С физической точки зрения наибольший интерес представляет величина общего относительного обессоливания ($Y_2, \%$), определяемая как средневзвешенное относительное солеудаление отдельных зон образца. Тогда зависимость Y_2 от плотности тока (фактор X_1) и продолжительности его действия (фактор X_2) описывается регрессионной моделью, которая при включении в неё только значимых при $\alpha=0,05$ по t – критерию коэффициентов имеет вид:

$$y_2=70,8+7,2x_1 - 2,1x_1^2+(17,7+5,4x_1 - 4,8x_1^2) x_2 - (16,2+9,5x_1 - 9,4x_1^2) x_2^2. \quad (2)$$

С точки зрения экономики важно знать общий расход электричества (Y_3) при обессоливании образцов, рассчитанный по данным о плотности тока и напряжению в цепи для каждого опыта. Регрессионная модель зависимости y_3 от плотности тока (фактор x_1) и продолжительности его действия (фактор x_2) имеет вид:

$$y_3=344,4+405,8x_1+226,3x_2+231,9x_1x_2+55,2x_1^2+16,3x_2^2. \quad (3)$$

Оптимальные параметры, характеризующие процесс обессоливания, наиболее удобно определять на основе анализа графиков, построенных в одних и тех же координатах для различных функций, одна из которых отражает физическую сторону процесса (Y_2), а вторая – экономическую (Y_3). С помощью моделей было установлено, что оптимальный режим обессоливания имеет ступенчатый характер. При этом процесс солеудаления следует организовать таким образом:

этап I ($0 < X_2 \leq 5$ ч) – $X_1=0,1$ мА/см²;

этап II ($5 < X_2 \leq 7,5$ ч) – $X_1=0,8$ мА/см²;

этап III ($7,5 < X_2 \leq 10$ ч) – $X_1=1,55$ мА/см².

Выигрыш во времени обработки могло бы дать повышение плотности тока до 2–2,5 мА/см². Однако, в связи с тем, что в этом случае над электроосмотическим процессом превалирует электродиализ, оказывающий разрушительное воздействие на структуру камня, рекомендуется ограничиться повышением плотности тока до 1,55 мА/см².

Для оценки влияния пористой структуры материала и уточнения параметров процесса обессоливания были выполнены опыты на образцах из глиняного кирпича размером 62,5x62,5x250 мм [2]. Экспериментально оценивалось влияние плотности тока в поперечном сечении образца (фактор x_1) и общей продолжительности его действия (фактор x_2), исходной засолённости образца (фактор x_3) и значения его водопоглощения (фактор x_4) на величину общего относительного солеудаления ($Y, \%$).

Первые три фактора варьировались на трёх уровнях, а четвёртый – на двух. Общая продолжительность действия тока изменялась по пяти одинаковым зонам образца с шагом 0,2 путём перемещения анода. Таким образом, в верхней зоне (зона V) продолжительность действия тока составляла 0,2 от общей, в зоне IV – 0,4 от общей продолжительности и т.д. В нижней зоне (зона I) продолжительность действия тока совпадала с общей. Уровни четвёртого фактора получены после отбора в партии глиняного кирпича образцов, входящих в нижнюю и верхнюю зону распределения величины водопоглощения. Среднее значение нижнего уровня водопоглощения образцов составило 14,12%, а верхнего уровня – 17,66%. Остальные факторы имели следующие уровни:

$$X_1 = 0,007; 0,070; 0,133 \text{ мА/см}^2;$$

$$X_2 = 5; 10; 15 \text{ суток};$$

$$X_3 = 0,5; 2,0; 3,5 \text{ \% по массе.}$$

Было принято решение оценить параметры главных эффектов полиномиальной модели:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}z_1 + b_{22}z_2 + b_{33}z_3, \quad (4)$$

где x_i – линейные функции от X_i ($i=1,2,3,4$);

z_i – квадратичные функции от X_i ($i=1,2,3$).

При выборе плана эксперимента для оценки параметров модели (4) основное внимание уделялось сокращению трудоёмкости эксперимента. Было решено составить план $2^1 \times 3^3 // 9$, включающий $N=9$ опытов. При полном переборе всех комбинаций уровней факторов число опытов составляло бы

$N=2^1 \times 3^3=54$. План $2^1 \times 3^3 // 9$ строился на основе плана $3^4 // 9$, имеющегося в [3]. В каждом опыте испытывалось по четыре образца.

После обработки результатов эксперимента получена регрессионная зависимость, включающая значимые при $\alpha=0,05$ коэффициенты:

$$y = 30,21 + 6,93x_1 + 9,99x_4 - 5,87z_1 + 9,68z_2, \quad (5)$$

где $x_1=15,86(X_1 - 0,07)$; $x_4=0,848(X_4 - 15,3)$;

$$z_1=3(X_1^2 - 0,667); \quad z_2=3(X_2^2 - 0,667);$$

$$x_2=0,2(X_2 - 10,0).$$

Из анализа модели (5) следует, что водопоглощение образцов, определяющее кажущуюся пористость, существенно влияет на величину обессоливания. С ростом кажущейся пористости материала образцов увеличивается общий процент удаления соли. В рассматриваемом диапазоне изменения плотности тока находится оптимум, значение которого составляет $0,0824 \text{ mA/cm}^2$. Это значение практически совпадает с оптимальным уровнем плотности тока, найденным более грубо для образцов из известняка. Продолжительность действия тока влияет неоднозначно. При увеличении её с 5 до 10 суток наблюдается положительный эффект, который постепенно затухает к 10 суткам. Дальнейшее увеличение продолжительности действия тока при выбранной схеме перемещения анода не даёт положительного эффекта, так как с поверхности открытых верхних зон образца происходит процесс испарения влаги, вызывающий перенос водорастворимых солей из нижележащих зон к вышележащим. Исходная засолённость образцов не оказывает статистически значимого влияния на общий процент удаления солей. Однако масса удалённой соли увеличивается с увеличением исходной засолённости.

Для более тонкого анализа процесса обессоливания была произведена оценка параметров модели (4) в каждой зоне, которая показала, что влияние варьируемых факторов сильнее сказывается в верхних зонах (III, IV, V), чем в нижних (I, II). Так, в верхних зонах имеется пять значимых при $\alpha=0,05$ коэффициентов, в зоне II – только два, а в зоне I – не одного. При переходе от верхних зон к нижним просматривается тенденция к увеличению процента обессоливания. В верхних зонах (IV, V) возможно даже повторное засоление

образца от смежных зон. Однако при определённых комбинациях уровней варьируемых факторов можно достичь обессоливания образца в верхних зонах. В нижних зонах во всех случаях степень обессоливания образца довольно высокая (до 100%).

Кажущаяся пористость проявляется одинаково во всех зонах образцов. Довольно устойчиво влияние плотности тока. Положение оптимума всегда находится в области эксперимента и смещается от нижнего уровня к верхнему при переходе от верхних зон образца к нижним. Это говорит о том, что между факторами x_1 и x_3 имеется взаимодействие и при высокой засолённости материала его обработку следует вести током малой плотности, а по мере обессоливания можно повышать плотность тока. Увеличение продолжительности действия тока отрицательно сказывается только в верхней зоне образца. Поэтому при выборе схемы обессоливания следует принять меры по исключению миграции влаги в верхнюю зону при перемещении анода вниз.

Таким образом, результаты эксперимента, выполненного на образцах из глиняного кирпича, подтвердили результаты, полученные в опытах на образцах из известняка, и расширили представление о процессе удаления водорастворимых солей из капиллярно-пористых каменных конструкций в поле постоянного электрического тока.

Библиографический список:

1. Аксёнова И.В., Объедков В.А., Муджири Б.Г. Исследование возможности удаления водорастворимых солей из толщи стен памятников архитектуры. М., 1982. 7 с. Рукопись депонирована во ВНИИИС 10.09.82, №3505.
2. Пучков Ю.М. Долговечность каменных памятников архитектуры: монография. Пенза: ПГУАС, 2015. 129 с.
3. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. М.: Недра, 1976. 224 с.