

---

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

---

Е.А. Ивлиев

### ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЕ ОСУШЕНИЕ СТЕН И ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
ул. Лоцманская, 3, г. Санкт-Петербург, 190008, Россия*

**Введение.** При длительной эксплуатации зданий и сооружений средства гидроизоляции частично или полностью теряют свои защитные свойства. При этом грунтовая влага свободно проникает в бетонные и кирпичные конструкции зданий. Высота капиллярного поднятия влаги, особенно когда фундаменты находятся в глинистых грунтах, может достигать пяти и более метров. Кроме этого, в таких зданиях нарушается температурно-влажностный режим, что является недопустимым не только для жилых, но и для большинства технических помещений.

Устранение переувлажнения стен зданий состоит из двух этапов: осушения стен и фундаментов; восстановления гидроизоляции.

Существует много способов восстановления горизонтальной гидроизоляции, основными из которых являются: методы, требующие последовательного пропиливания стен и введения в образовавшуюся щель гидроизоляционных растворов или материалов; механическая забивка в швы кирпичной кладки гофрированных листов из нержавеющей стали посредством виброударной установки (технология немецкой фирмы BOUMAN); методы, основанные на пропитке различными гидрофобными или полимерными составами, подаваемыми под давлением или посредством естественной инъекции через отверстия, просверленные в нижнем основании стены (технология немецкой фирмы SCHOMBURG).

После восстановления гидроизоляции осушение стен здания происходит за счет естественной конвекции в течение двух-трех лет.

Особое место среди способов осушения стен зданий и восстановления гидроизоляции занимают методы, основанные на создании электроосмотического переноса влаги в порах кирпича или бетона в направлении, противоположном силам капиллярного поднятия или всасывания. Эти методы можно разделить на две основные группы – активные и пассивные. В обоих случаях устройство, реализующее электроосмотический метод осушения, содержит ряд электродов–анодов, располагающихся в осушаемой стене или на ее поверхности, и ряд электродов – катодов, размещаемых, как правило, в грунте.

Пассивные методы не требуют каких-либо источников питания, а электроосмотические силы возникают за счет электрохимической разности потенциалов металлов, из которых выполняются анодные и катодные электроды. Существенным недостатком пассивного метода является длительный срок осушения - до 3 лет, что соизмеримо с естественным высыханием стены после восстановления гидроизоляции. Это связано с тем, что в пассивных методах между стеной и грунтом создается разность потенциалов не более 1 В. При этом в стене создаются электроосмотические силы, препятствующие капиллярному поднятию грунтовой влаги, однако энергии для перемещения избыточной влаги из стены в грунт оказывается недостаточно.

Активные методы основаны на подключении между анодными и катодными электродами внешнего источника питания, что позволяет создать силы, достаточные для перемещения влаги против сил капиллярного поднятия по всей толщине и высоте стены. Однако методы активного электроосмотического осушения используют низковольтные источники питания с напряжением не более 12–24 В (например, технология австрийской фирмы ELKINET или немецких фирм HYDROPOL и

DRYMaTec). При этом гарантированное время осушения составляет 3 года, что не отличает их от пассивных методов.

Электроосмос применяется в строительстве достаточно давно. Практические примеры пассивного и низковольтного активного методов электроосмотического осушения приведены, например, в [1].

Наиболее значительный вклад в теоретическое обоснование электроосмотического метода осушения капиллярно-пористых материалов внес румынский ученый Stefan Morarau [2]. Он первым исследовал практические вопросы рационального размещения анодов и дал простые, приближенные соотношения, позволяющие оценить скорость осушения для активного и пассивного методов. Следует отметить также работу [3], где предлагается в процессе электроосмотического осушения подавать в трубчатые аноды гидрофобный раствор. В работах австрийского инженера Hans Oppitz [4–7] предлагаются различные конструкции слаборастворимых анодов. Работы норвежского инженера Utklev Kjell [8, 9] посвящены обоснованию импульсных режимов питания для обеспечения коррозионной стойкости анодных электродов. Аналогичные вопросы рассматриваются в [10].

Техническая реализация активного метода осушения при более высоких напряжениях (150–200 В), помимо дополнительных мероприятий по электробезопасности, требует учета следующих специфических факторов: схема размещения анодов в осушаемой стене и режимы питания должны обеспечивать равномерное осушение по ее толщине и длине; размещение катодных электродов должно выполняться с учетом уровня поверхности земли относительно требуемой границы осушения; необходимы специальные мероприятия по предотвращению растворения анодных электродов и выделения газа на их поверхности; размещение анодных и катодных электродов должно выполняться с учетом наличия в стенах и грунте различных металлических конструкций.

Цель работы – обоснование схем и режимов применения активного электроосмотического метода осушения с использованием напряжений до 200 вольт, что позволяет сократить время осушения до трех-четырех месяцев [11]. Результаты, изложенные в статье, являются как обобщением теоретических, лабораторных и натурных исследований, так и масштабных практических работ.

**Лабораторный эксперимент и его анализ.** Лабораторные исследования активного электроосмоса выполнялись на красном кирпиче с габаритными размерами 260×130×70 мм, который предварительно высушивался в термической печи и взвешивался. После двух недель замачивания кирпича определялась максимальная абсолютная влажность по формуле

$$W_A = \frac{G_0 - G}{G} 100\% = 22,4\% ,$$

где  $G$  – вес сухого кирпича,  $G_0$  – вес влажного кирпича.

Для электроосмотического осушения кирпича была смонтирована лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1, где 1 – кирпич, 2 – электроды (аноды), 3 – электрод (катод) (стальная сетка), 4 – цементный раствор, 5 – амперметр, 6 – вольтметр, 7 – источник постоянного тока, 8 – регулировочное сопротивление. Расстояние между анодом и катодом составляло 0,13 м (аноды из стальной проволоки диаметром 1 мм устанавливались в отверстия, просверленные в центральной части кирпича).

После завершения монтажа электродов исходная абсолютная влажность составляла 20%. После подключения источника питания осушение длилось 12 часов.

Получены следующие результаты:

- среднее напряжение между анодом и катодом – 135 В;
- средняя напряженность электрического поля – 1000 В/м;
- средний ток – 0,1 А;
- средняя плотность анодного тока – 60 А/м<sup>2</sup>;
- удельные затраты электроэнергии – 800 кВт·час/м<sup>3</sup>;
- абсолютная влажность кирпича в конце опыта – 7,5%.

Таким образом, в результате активного электроосмотического осушения кирпича за 12 часов абсолютная влажность уменьшилась на 12,5%.

В процессе осушения периодически измерялись влажность и удельное электрическое сопротивление (табл. 1). На основе данных табл. 1 и метода линейной регрессии найдена эмпирическая зависимость между удельным электрическим сопротивлением и влажностью

$$\rho(W_A) = -29,3 \cdot W_A + 763, \quad (1)$$

где  $\rho$  – в [Ом·м], а  $W_A$  – в [%].

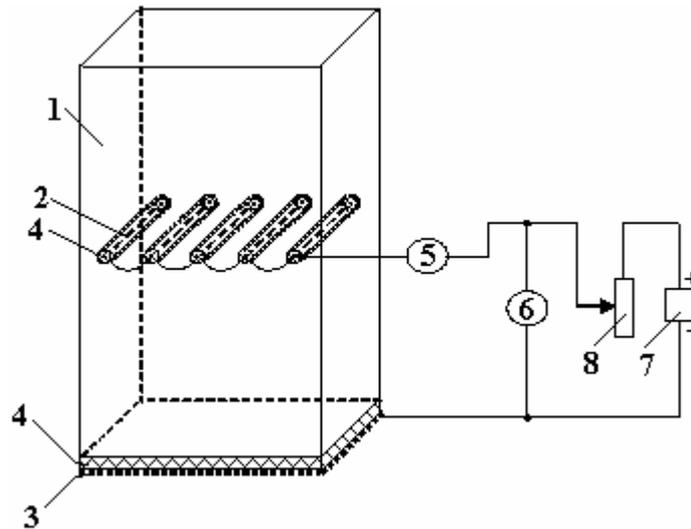


Рис. 1

Таблица 1. Измерение влажности и удельного электрического сопротивления

$W_A, \%$	20	18,8	17,1	14,2	12,9	10,2	7,5
$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$	160	225	275	330	395	450	550

Зависимость удельного электрического сопротивления от влажности в соответствии с (1) и данными табл. 1 представлена на рис. 2.

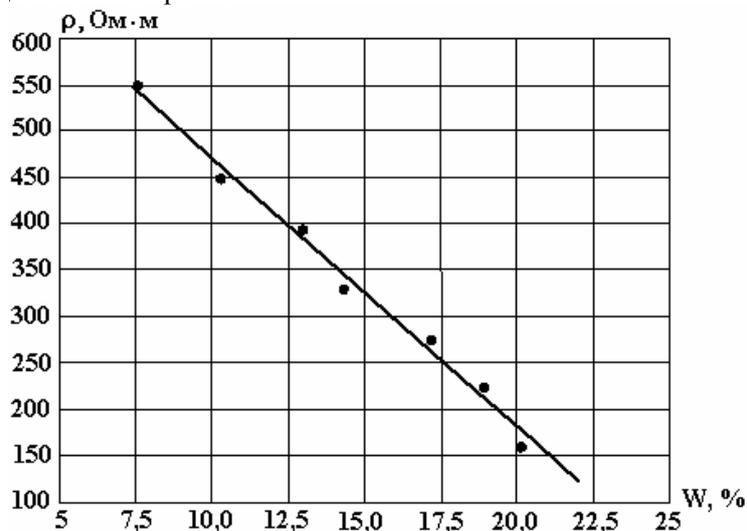


Рис. 2

При практическом осушении зданий обеспечить напряженность электрического поля порядка  $E = 1000 \text{ В/м}$  невозможно, так как ее величина пропорциональна скорости осушения. Скорость электроосмотического движения жидкости в капиллярно-пористой среде определяется из выражения

$$v_E = k_E E,$$

где  $k_E$  [м<sup>2</sup>/(В·сут)] – коэффициент электроосмоса.

При среднем значении коэффициента электроосмоса  $0,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{сут})$  за 12 часов из кирпича влага будет удалена с высоты

$$H = k_E \cdot E \cdot T = 0,43 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,5 = 0,215 \text{ м.}$$

Таким образом, за 12 часов влага из кирпича удалена практически полностью.

Результаты лабораторного эксперимента также показывают, что время электроосмотического осушения строительных конструкций с использованием источника питания с выходным напряжением до 200 В и расстоянием между анодными и катодными электродами единицы метров можно сократить до нескольких месяцев.

**Практические аспекты.** Активное электроосмотическое осушение выполнялось при реконструкции здания, построенного в 1825–1836 гг. в г. Кронштадте, для размещения 1-го Морского кадетского корпуса. Первый этаж представлял собой арочную кирпичную конструкцию на бутовом фундаменте. Толщина стен – 1,5 метра, гидроизоляция здания нарушена, подвальных помещений нет. Уровень капиллярного поднятия влаги в стенах первого этажа составлял 2–2,5 метра. В зоне увлажнения кирпичная кладка имела влажность 20–22%, то есть находилась в состоянии полного влагонасыщения. Работа проводилась в три этапа, по три месяца каждый. За указанный период осушено 930 погонных метров стен с площадью помещений 4000 м<sup>2</sup>. В стенах здания было размещено 900 анодных электродов, образующих 48 независимых контуров питания. Катодные электроды в количестве 50 штук размещались в земле как внутри, так и вне здания. Схемы установки анодов и катодов соответствуют работе [11] и показаны на рис. 3–5, где 1 – источник постоянного тока, 2 – электроды (аноды), 3 – электроды (катоды), 4 – осушаемая стена, 5 – фундамент, 6 – линии электрического тока, 7 – уровень капиллярного поднятия влаги в стене.

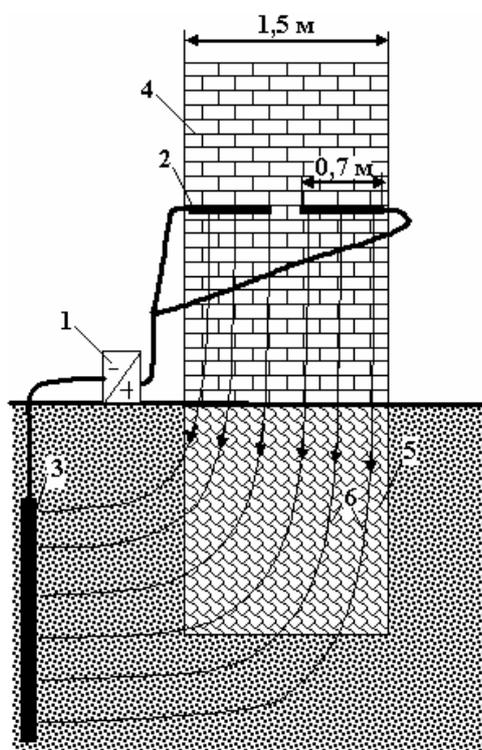


Рис. 3

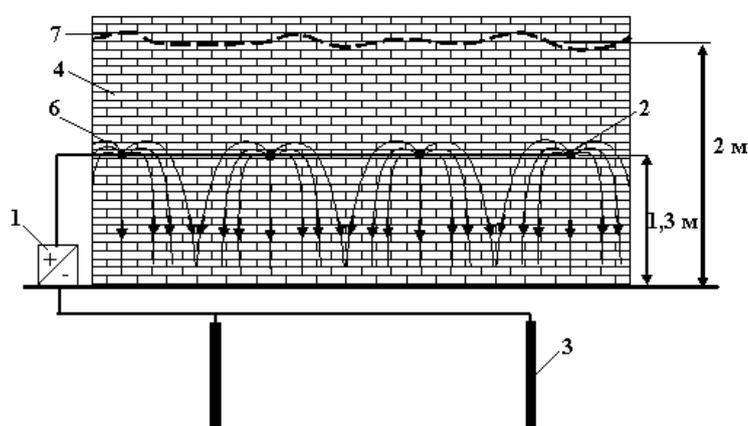


Рис. 4

Одной из основных проблем, связанных с применением электрических напряжений до 200 В, является интенсивное растворение анодных электродов, которое происходит по закону

$$G = D_E I_A t ,$$

где  $G$  – массовые потери материала, кг;  $I_A$  – анодный ток, А,  $D_E$  – массовый электрохимический эквивалент металла, кг/(А·час);  $t$  – время, час.

Для уменьшения растворения анодных электродов в цементный раствор, которым заполнялось свободное пространство между электродом–анодом и кирпичной кладкой, добавлялся порошковый графит. Графит так же, как и металл, обладает электронной проводимостью, поэтому на границе контакта этих материалов не происходит химических реакций, и в местах контакта с графитом стальной анод не подвергается растворению. Кроме этого, массовый электрохимический эквивалент графита ( $D_E = 0.91 \cdot 10^{-5}$ ) на два порядка меньше, чем у стали ( $D_E = 1,04 \cdot 10^{-3}$ , кг/(А·час)).

Перед началом осушения на контрольных образцах кирпича определялась абсолютная весовая влажность. По данным 10 измерений  $W_A = 21\%$ . Объем кирпичной кладки при этой влажности составлял 300 м<sup>3</sup>.

На первом этапе электроосмотическая установка подключалась к источнику питания с напряжением 150–160 В. Через три месяца осушения установка была переведена в режим гидроизоляции с автоматической регулировкой напряжения 6–12 В [11].

**Натурные измерения и их анализ.** Детальное исследование и наблюдение за процессом осушения осуществлялись на участке из трех помещений с погонной длиной стен 100 метров. Электроосмотическая система на данном участке подключалась к независимому источнику питания с контролируемым выходным напряжением 152 В. Анодная часть системы содержала 136 металлических стержней длиной 0,7 м и диаметром 0,032 м, которые закладывались в отверстия диаметром 0,05 м в цементно-графитовом растворе. По высоте стены аноды размещались на расстоянии 1–1,5 м от уровня пола. Анодные электроды были объединены в 14 секций, что позволяло контролировать ток каждой секции. Катодные электроды в количестве 10 штук выполнялись из стальных труб длиной 3 м и диаметром 0,05 м и располагались внутри и вне здания.

Через три месяца после начала осушения были проведены измерения влажности стены микроволновым способом. По данным 12 измерений осредненное значение абсолютной влажности составило 12%. Таким образом, в процессе осушения влажность стены снизилась на 9% , при этом из стены длиной 100 м в грунт удалено примерно  $50 \text{ м}^3$  воды.

Для измерения распределения потенциала по длине и высоте стены на специально выделенном участке были смонтированы измерительные контактные электроды, схема размещения которых показана на рис. 6, где 1 – электроды для измерения потенциала по высоте стены; 2 – электроды для измерения потенциала вдоль стены, установленные через 0,2 м; 3 – электроды (аноды) электроосмотической системы осушения; I, II и III – электроды для измерения электрического сопротивления.

Для контроля удельного электрического сопротивления кирпичной кладки в стену были установлены три измерительных электрода диаметром 0,05 м и длиной 0,7 м, которые располагались на высоте 0,4, 1,0 и 1,6 м от уровня пола.

Данные измерений представлены в табл. 1, 2, 3, при этом в табл. 2 и 3 они ограничены двумя месяцами измерений, так как за это время в помещениях были выполнены штукатурные работы и доступ к контрольным электродам был прекращен.

Таблица 2. Измерение интегральных электрических характеристик

$T$ , сут	1	7	20	30	40	90
$U$ , В	152	152	152	152	152	152
$I$ , А	42	28,5	26	22	16,8	15
$R$ , Ом	3,6	5,3	6,1	6,9	9,05	10,1

Таблица 3. Измерение сопротивления растеканию контрольных электродов

$H$ , м	$R$ , Ом	$T$ , сут			
		1	14	30	60
0,4	$R_{III}$	120	120	130	140
1,0	$R_{II}$	120	159	200	250
1,6	$R_I$	120	197	230	280

В табл. 2 приведены данные измерений интегральных электрических характеристик на выходе источника питания, где  $U$  – выходное напряжение,  $I$  – полный ток,  $R$  – полное сопротивление нагрузки источника питания,  $T$  – время после начала электроосмотического осушения. За время осушения было израсходовано 8000 кВт электроэнергии, то есть на удаление  $1 \text{ м}^3$  воды из стены потребовалось 160 кВт.

В табл. 3 представлены данные измерения сопротивления растеканию контрольных электродов относительно катодной системы, из которых видно, что процесс осушения происходит неравномерно. В табл. 3 приняты следующие обозначения:  $H$  – высота электродов над уровнем пола,  $R$  – сопротивление растеканию,  $T$  – время после начала электроосмотического осушения. Из таблицы видно, что верхние части стены сохнут быстрее, а в ее нижнем основании заметные изменения сопротивления происходят только после месяца осушения. При этом быстрее осушается зона выше анодов. Из данных таблицы можно определить и удельное электрическое сопротивление вокруг измерительных электродов. Так как измерение сопротивления контрольных электродов осуществлялось относительно катодной системы, сопротивление которой намного меньше сопротивления измерительного электрода, то можно использовать следующую формулу для стержневого электрода:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L}{a} \right) - 0,307 \right] \text{ [Ом]},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление среды, Ом·м;  $L, a$  – длина и радиус электрода, м.

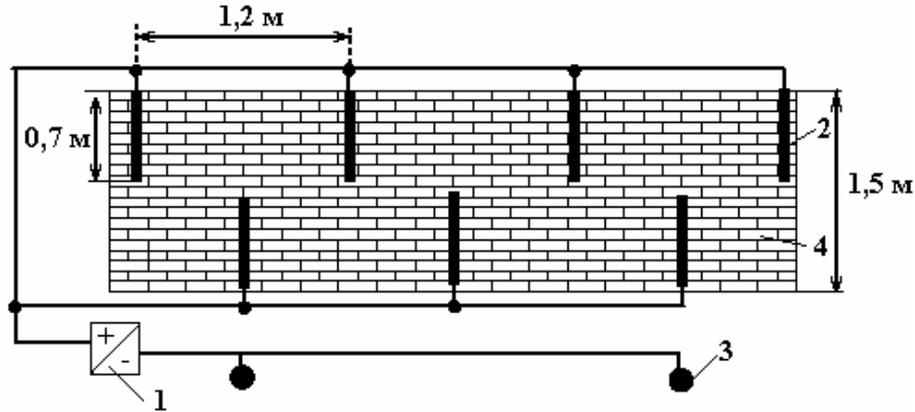


Рис. 5

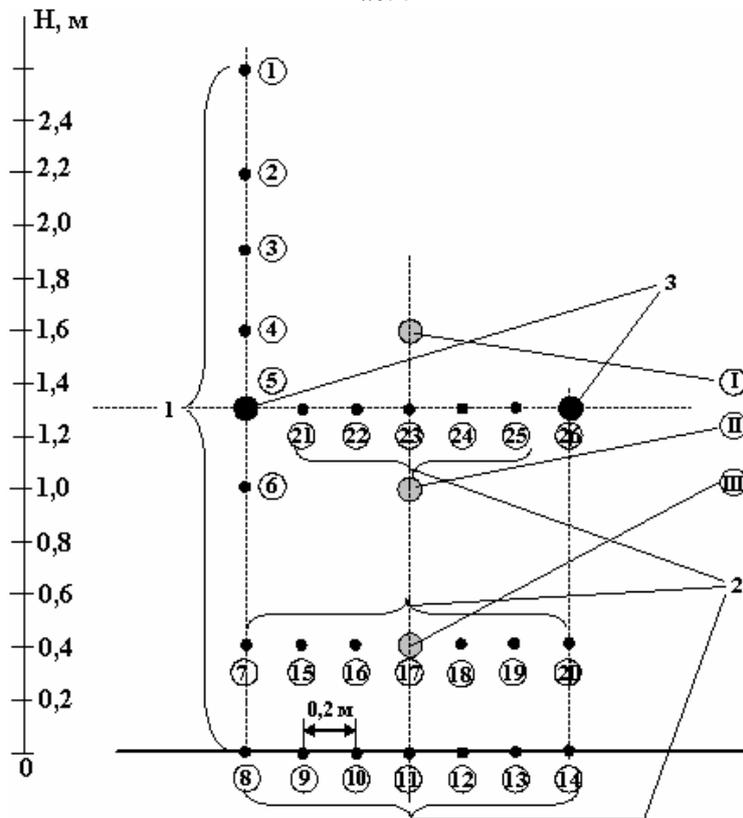


Рис. 6

Для приведенных размеров контрольных электродов удельное электрическое сопротивление определится из данных измерений по формуле

$$\rho = \frac{R}{0,845}, \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (2)$$

Согласно (2) начальному значению сопротивления растеканию измерительных электродов (120 Ом) соответствует значение удельного электрического сопротивления кирпичной кладки – 142 Ом·м, что по (1) равно абсолютной влажности 21,3% и хорошо согласуется с данными прямых ее измерений (21%), выполненных перед началом осушения. Через 60 суток удельное электрическое сопротивление в месте размещения измерительных электродов составляет 166, 296 и 331 [Ом·м], что соответствует абсолютной влажности 20,4%, 15,9% и 14,7%.

Неравномерность процесса осушения подтверждается и данными измерения потенциала по высоте стены, представленными в табл. 4, где  $U$  – потенциал относительно катода,  $H$  и  $T$  те же, что и в табл. 3.

Таблица 4. Распределение потенциала по высоте (а) и длине стены (б)

H, м	U, В	T, сут				
		1	7	20	30	40
2,6	$U_1$	120	111	104	93	89
2,2	$U_2$	121	113	106	95	92
1,9	$U_3$	124	116	110	101	96
1,6	$U_4$	128	120	115	105	101
1,3	$U_5$	152	152	152	152	152
1,0	$U_6$	118	111	107	95	94
0,4	$U_7$	79	72	68	61	56
0,0	$U_8$	50	50	49	47	46

а

H, м	Номер электрода (см. рис.5) и значение потенциала								δ, %
	N	5	21	22	23	24	25	26	
1,3	$U, В$	152	125	118	111	118	125	152	27
	N	7	15	16	17	18	19	20	
0,4	$U, В$	90	85	81	79	81	85	90	14
	N	8	9	10	11	12	13	14	
0,0	$U, В$	50	50	49	48	49	50	50	4
	N	8	9	10	11	12	13	14	

б

Для процесса осушения важным является и неравномерность потенциала по длине стены. Такая неравномерность в максимальной степени проявляется между соседними анодами электроосмотической системы. Выше и ниже анодов распределение потенциала по длине стены более равномерно. Это подтверждается данными измерений, представленными в табл. 4, где  $\delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \cdot 100\%$  –

степень неравномерности потенциала. Из таблицы видно, что неравномерность потенциала вдоль стены незначительна. Следовательно, для инженерных расчетов можно пользоваться моделью «плоского конденсатора».

Учитывая, что между анодами и уровнем пола разность потенциалов составляет примерно 70 В, напряженность электрического поля между анодами и уровнем пола будет 54 В/м. При этом скорость электроосмотического движения жидкости в стене равна  $v_E = k_E E = 2,3$  см/сут. Следовательно, за три месяца из кирпичной кладки влага будет удалена с высоты  $H = v_E \cdot T = 0,023 \cdot 90 = 2,1$  м.

Таким образом, использование напряжений до 200 В позволяет удалить избыточную влагу из стен и фундаментов зданий за несколько месяцев.

#### Заключение

1. Обоснован активный электроосмотический метод осушения стен и фундаментов зданий с использованием напряжений источника питания до 200 вольт, позволяющий сократить время осушения до нескольких месяцев.

2. Контролировать процесс осушения можно посредством измерения сопротивления растеканию специальных электродов, размещаемых по высоте стены на расстояниях друг от друга, существенно превышающих их поперечные размеры.

3. Лучшими свойствами по анодному растворению обладают графитовые электроды или металлические с графитовым покрытием. При этом после окончания активного электроосмотического осушения электродная система остается работоспособной для электроосмотической гидроизоляции при подключении к ней низковольтного источника питания 6–12 В.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кадьерг Р. Изоляция и предохранение зданий. М.: Госстройиздат, 1957.
2. Patent US 3856646. Int. CI B01D13/02. Method and Electrodes for the drying of damp buildings/ Stefan Morarau, Filed dates 20.10.1972.
3. Patent GB 2101188. Int. CI<sup>4</sup> E04B1/70. Damp proofing of walls/ Bacinska Alicia, Bacinski Andrzej, Filed dates 01.12.1983.

4. Patent US 4600486. Int. CI<sup>4</sup> B01D13/02. Electro osmotic movement of polar liquid in a porous structural material/ Oppitz Hans, Filed dates 26.10.1984.
5. Patent DE3541656. Int. CI<sup>4</sup> B01D13/02. Method and device for setting up an electrical constant field/ Oppitz Hans, Filed dates 05.06.1986.
6. Patent DE3714943. ,Int. CI<sup>4</sup> E04B1/70. Electrode arrangement for creating an electric field in construction elements/ Oppitz Hans, Filed dates 12.11.1987.
7. Patent DE4329219. ,Int. CI<sup>4</sup> E04B1/70. Equipment for dehumidifying building structures – includes horizontally arranged foil-type body of water impermeable plastic positioned between two superimposed brickwork parts/ Oppitz Hans, Filed dates 03.03.1994.
8. Patent WO 9010767. Int. CI<sup>4</sup> E04B1/70. Method and apparatus for controlling the relative humidity in concrete and masonry structures/ Utklev Kjell, Filed dates 0.09.1990.
9. Patent EP 0839240. Int. CI<sup>4</sup> E04B1/70. Method and device for regulating and optimizing transport of humidity by means of electroosmosis/ Utklev Kjell, Filed dates 02.06.1997.
10. Patent US 5015351. Int. CI<sup>4</sup> B01D13/02. Method for electrochemical treatment of porous building materials, particularly for drying and re-alkalization/ John Miller, Filed dates 14.05.1991.
11. Патент RU 2103054. МКИ<sup>5</sup> B01D61/56. Способ активного электроосмотического осушения стен зданий и сооружений от грунтовых вод/ Е.А. Ивлиев, Ю.Я. Иоссель, Г.С.Казаров, Е.В. Константинов, В.В. Липатов Оpubл. 20.01.1998. Бюл. №3.

*Поступила 25.12.06*

### **Summary**

In the article are considered active electroosmotic drying of walls and the basement of buildings. Using an electric voltage up to 200 volt it is possible to lower terms of drying to several months. The data of natural measurements are given at practical drying of rooms in 4000 square meters.

---