

Расход глины для получения суспензии заданной плотности определяется по зависимости:

$$P = \frac{\rho_g \cdot (\rho - \rho_g)}{(\rho_g - \rho_g) \cdot (1 - 0,01w)},$$

где P – масса глины в кг на 1 м^3 суспензии; w – влажность глины, %; ρ_g , ρ , ρ_g – соответственно плотность глины, суспензии и воды, кг/м^3 . При необходимости изменения консистенции глинистой обмазки объем добавочной воды рекомендуется определять по зависимости:

$$\Delta V = V \times \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 - \rho_g},$$

где ρ_1 , ρ_2 , ρ_g – соответственно плотности имеющейся и требуемой суспензий и воды, кг/м^3 ; V – объем корректируемого раствора, м^3 .

Установка для механизированного нанесения обмазок применима как в рыхлых, пористых и слабых грунтах, так и в грунтах средней плотности и прочности.

Преимущество установки состоит в ее инвентарности, дешевизне, простоте и безопасности эксплуатации.

Для ускорения процесса погружения свай кроме вышеописанной установки и способа по патенту РБ №7213 можно применять разработанный в УО «БрГТУ» наголовник (патент РБ №10518) для погружения свай гидравлическим способом путем подачи воды в зону контакта сваи с грунтом.

Заключение. Применение в практике обоснованных видов обмазок позволяет снизить энергоемкость погружения свай в грунт на 18–30% и увеличить их несущую способность по грунту основания, а с помощью разработанной установки механизировать обмазку, ис-

ключить трудоемкий ручной процесс и соответственно снизить стоимость работ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кречин, А.С. Ресурсосберегающие фундаменты на сельских стройках / А.С. Кречин, В.П. Чернюк, П.В. Шведовский, А.Т. Мальцев, Н.А. Мальцева. – Кишинев: Картия Молдовеняскэ, 1990 – 248 с.
2. Чернюк, В.П. Расчет, проектирование и устройство свайных фундаментов / В.П. Чернюк, П.С. Пойта. – Брест: Облтипография, 1998 – 216 с.
3. Чернюк, В.П. К расчету величины отказа забивных свай при погружении в грунт / В.П. Чернюк, В.А. Тимошук // Вестник Брестского государственного технического университета, №1. Строительство и архитектура. Научно-теоретический журнал. – Брест, 2003 – С. 120–121.
4. Чернюк, В.П. Определение величины отказа забивной сваи / В.П. Чернюк, В.Н. Пчелин, Г.И. Юськович, В.П. Щербач // Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вопросы строительства и архитектуры. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – Вып. 17. – С. 90–93.
5. Чернюк, В.П. Определение отказа забивных свай при погружении в грунт / В.П. Чернюк, П.В. Шведовский, В.Н. Пчелин, Г.И. Юськович, А.Т. Мальцев // Сборник научных трудов. Расчет конструкций и теплофизика зданий и сооружений АПК – М.: ЦНИИЭП Сельстрой, 1989. – С. 64–70.
6. Спиридонов, В.В. Определение величины погружения забивной сваи в грунт / В.В. Спиридонов, В.П. Чернюк, Г.И. Юськович, В.Н. Пчелин // Научно-технический информационный сборник. Передовой производственный опыт, рекомендуемый для внедрения в строительстве предприятий нефтяной и газовой промышленности. – М.: ВНИИПК Техоргнефтегазстрой, 1989. – Вып. 7. – С. 23–27.

Материал поступил в редакцию 06.02.12

CHARNIUK V.P., YUSKOVICH V.I., YUSKOVICH G.I., SHVEDOVSKII P.V. The use of coatings in immersion driven piles into the ground

Use in practice sound of coatings to reduce energy consumption of piling into the ground at 18-30% and increase the carrying capacity of the ground base, and with the help of plaster designed to mechanize the installation, eliminate time consuming manual process and thus reduce the cost of the work.

УДК 666.71/.72

Никитин В.И., Бацкель-Бжозовска Б.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

1. Введение. Вопросам изучения механизмов разрушающего действия замерзающей в порах материала воды и разработке методов определения морозостойкости бетона и других строительных материалов посвящено много научных публикаций. Однако до настоящего времени в странах Объединенной Европы и не только нет единой методики и критериев оценки морозостойкости бетонов.

Европейской нормой EN206-1 [1] и идентичной Польской нормой PN-EN206-1:2003 [2] не предусматривается исследование морозостойкости бетона и считается, что долговечность бетонных конструкций будет обеспечена, если выполнены требования по граничным значениям состава и свойств бетона с учетом четырех классов экспозиции XF1, XF2, XF3 и XF4, описывающих степень агрессивного воздействия замораживания и оттаивания в различных условиях эксплуатации.

В некоторых странах Европы (Австрия, Дания, Швеция и др.) EN206-1 дополнена национальными нормами, предусматривающими испытания бетона на морозостойкость. Действующая в Польше от июня 2007 года норма PKN-CEN/TS12390-9:2007 [3] дополняет норму PN-EN206-1:2003 и предусматривает испытания бетона на циклические воздействия отрицательных температур. При проведении этих испытаний рекомендуется использовать три методики, в которых показателем морозостойкости бетона является значение утраты

массы с поверхности образцов в результате шелушения после 56 циклов замораживания и оттаивания Δm_{56} .

Сравнение трех рекомендованных методик показало, что утрата массы в одной из них измеряется в процентах (*Cube test*), а в двух остальных – в кг/м^2 (*Stab test*, *CF/CDF test*). Кроме того, существуют различия в размерах образцов, условиях их подготовки перед замораживанием и условиях самого замораживания.

К сожалению, авторами нормы PKN-CEN/TS12390-9:2007 не даются ясных критериев оценки морозостойкости бетона по каждой из рекомендованных методик. Только для бетонов, используемых в дорожных покрытиях, даются граничные значения утраты массы в кг/м^2 , с помощью которых они относятся к одной из трех категорий морозостойкости. При этом для бетонов, отнесенных к высокой категории качества, должно выполняться условие:

$$\Delta m_{56} / \Delta m_{28} \leq 2. \quad (1)$$

Однако не оговаривается, по какому из трех рекомендованных методов определяются значения утраты массы.

Не трудно предположить, что в связи с различиями в условиях испытаний и способов оценки поверхностной деструкции, рекомендованные методы дадут различные результаты, использование которых может привести к неоднозначным выводам.

Никитин Вадим Иванович, доктор технических наук, профессор Государственной высшей школы в Бялэй Подляске, Польша.

Бацкель-Бжозовска Беата, кандидат технических наук Политехники Белостоцкой, Польша.

В данной работе это предположение проверялось с помощью спланированного эксперимента, позволившего статистически достоверно оценить влияние размеров образцов пенобетона, числа циклов замораживания и оттаивания, температуры и продолжительности замораживания на утрату массы в результате шелушения, измеряемой в различных единицах. Использование пенобетона вместо обычного бетона при моделировании процесса замораживания и оттаивания позволило сократить продолжительность изготовления и испытания образцов при сохранении подобия механизмов морозной деструкции этих материалов.

2. Методика и планирование исследования. В экспериментальном исследовании использовались образцы в виде кубиков различных размеров, вырезанных из блоков пенобетона плотностью около 800 кг/м^3 . При отборе этих образцов руководствовались принципом случайности, чтобы уменьшить влияние неоднородности их структуры. После водонасыщения образцы подвергались объемному циклическому замораживанию в морозильной камере и оттаиванию в воде. Условия замораживания образцов были различными (менялась температура замораживания и продолжительность выдержки при этой температуре), а условия их оттаивания были одинаковыми. Число циклов замораживания и оттаивания, которым подвергались испытываемые образцы, менялось. При этом максимальное число циклов было выбрано с учетом кинетики утраты массы водонасыщенных образцов пенобетона в процессе циклических морозных воздействий. Из известных нам литературных данных и результатов собственных исследований следует, что при циклическом замораживании и оттаивании образцов бетона и других капиллярно-пористых материалов до их полного разрушения процесс утраты массы характеризуется двумя основными этапами. Графическое представление этого процесса приведено на рис. 1, из которого видно, что первый этап отличается от второго заметно меньшей скоростью утраты массы и большей продолжительностью. Число циклов замораживания и оттаивания, при котором начинается переход от первого этапа ко второму, является критическим $N_{кр}$, поскольку при $N > N_{кр}$ происходит очень быстрое (лавинное) усталостное разрушение материала. Поэтому значение $N_{кр}$ может быть принято в качестве оценки морозостойкости бетона.

Исходя из характера кинетики утраты массы (см. рис. 1), принятое в существующих методиках условие (1) можно объяснить тем, что заданное число циклов, для которого определяется утрата массы Δm_N , не должно превышать критического значения $N_{кр}$.

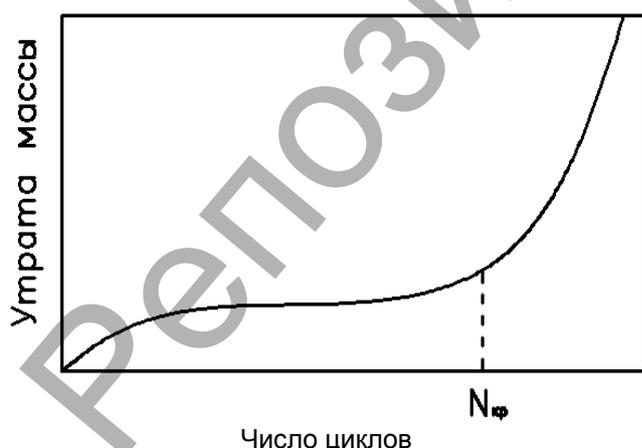


Рис. 1. Примерная кинетика процесса утраты массы бетонных образцов в результате циклического замораживания и оттаивания

Предварительные исследования показали, что для кубических образцов пенобетона со стороной 10 см и плотностью около 800 кг/м^3 , охлаждаемых до температуры -15°C , критическое число циклов замораживания и оттаивания составляет $N_{кр} \geq 30$. Экспериментальным

и расчетным путем было установлено, что продолжительность охлаждения этих образцов до установленной в морозильной камере температуры -15°C составляет около одного часа. С учетом этой информации было принято, что в эксперименте число циклов замораживания и оттаивания образцов не должно превышать 25, продолжительность выдержки образцов в морозильной камере должна быть не менее двух часов. Предполагалось рассматривать довольно широкий диапазон изменения температуры в морозильной камере (от -5°C до -25°C) и стороны квадратных образцов (от $2,5 \text{ см}$ до $12,5 \text{ см}$). При планировании эксперимента и статическом анализе его результатов целесообразно, чтобы для факторов число рассматриваемых уровней q было одинаковым. Поэтому для каждого из отмеченных факторов было выбрано одинаковое число уровней $q=5$.

Таким образом, в планируемом эксперименте варьируемыми факторами являлись: фактор A — размер стороны квадратного образца на уровнях $A_1=2,5 \text{ см}$, $A_2=5 \text{ см}$, $A_3=7,5 \text{ см}$, $A_4=10 \text{ см}$, $A_5=12,5 \text{ см}$; фактор B — температура замораживания в холодильной камере на уровнях $B_1=-5^\circ\text{C}$, $B_2=-10^\circ\text{C}$, $B_3=-15^\circ\text{C}$, $B_4=-20^\circ\text{C}$, $B_5=-25^\circ\text{C}$; фактор C — продолжительность выдержки образцов в морозильной камере при заданной температуре замораживания на уровнях $C_1=2 \text{ ч}$, $C_2=4 \text{ ч}$, $C_3=6 \text{ ч}$, $C_4=8 \text{ ч}$, $C_5=10 \text{ ч}$; фактор D — число циклов замораживания и оттаивания на уровнях $D_1=5$, $D_2=10$, $D_3=15$, $D_4=20$, $D_5=25$. Изучалось влияние этих факторов на утрату массы образцов в результате шелушения, определяемую двумя способами:

$$y_1 = \frac{\Delta m}{m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$y_2 = \frac{\Delta m}{S} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}, \quad (3)$$

где m и S — соответственно масса и площадь поверхности сухих образцов перед началом циклических испытаний на морозостойкость.

В качестве основного метода статического анализа опытных данных был выбран дисперсионный анализ, который выделяет факторы, вызывающие изменчивость изучаемой величины. На основе опыта, накопленного при анализе данных предыдущих работ, предполагалось, что в рассматриваемом факторном пространстве эффектами взаимодействия факторов можно пренебречь без ущерба для оценки главных эффектов факторов. Поскольку число факторов равнялось четырем и каждый из них рассматривался на одинаковом числе уровней $q=5$, то для оценки главных эффектов факторов целесообразно использовать план эксперимента в виде греко-латинского квадрата. Такой план при $q=5$ позволяет сократить число рассматриваемых комбинаций уровней факторов в $q^2=25$ раз. Повторные опыты в запланированном эксперименте не были предусмотрены. План эксперимента и его результаты представлены в таблице 1.

3. Статический анализ результатов эксперимента

3.1 Дисперсионный анализ. В связи с допустимой возможностью пренебречь эффектами взаимодействий факторов при дисперсионном анализе данных предполагалось, что результат любого наблюдения, приведенного в таблице 1, можно представить в виде модели главных эффектов

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \varepsilon_{ijkl}, \quad (4)$$

где y_{ijkl} — значение исследуемого показателя, наблюдаемое для $(ijkl)$ -той комбинации уровней факторов;

α_i — эффект i -го уровня фактора A ;

β_j — эффект j -го уровня фактора B ;

γ_k — эффект k -го уровня фактора C ;

δ_l — эффект l -го уровня фактора D ;

ε_{ijkl} — случайная ошибка опыта, относящаяся к $(ijkl)$ -й комбинации уровней факторов.

Таблица 1. План и результаты эксперимента

№ образца	Факторы				Утрата массы	
	A, см	B, °C	C, ч	D	y ₁ , %	y ₂ , кг / м ²
1	2,5	-5	2	5	4,0	0,133
2	2,5	-15	4	10	4,6	0,153
3	2,5	-20	10	15	5,7	0,190
4	2,5	-25	6	20	13,6	0,453
5	2,5	-10	8	25	15,3	0,510
6	5,0	-10	4	5	1,3	0,087
7	5,0	-20	6	10	3,2	0,213
8	5,0	-25	2	15	6,0	0,400
9	5,0	-5	8	20	17,5	1,167
10	5,0	-15	10	25	11,6	0,773
11	7,5	-15	6	5	1,0	0,100
12	7,5	-25	8	10	10,0	1,000
13	7,5	-5	4	15	13,1	1,310
14	7,5	-10	10	20	10,0	1,000
15	7,5	-20	2	25	6,6	0,660
16	10,0	-20	8	5	5,0	0,667
17	10,0	-5	10	10	6,2	0,827
18	10,0	-10	6	15	1,9	0,253
19	10,0	-15	2	20	6,4	0,853
20	10,0	-25	4	25	11,2	1,497
21	12,5	-25	10	5	1,3	0,217
22	12,5	-10	2	10	5,0	0,833
23	12,5	-15	8	15	3,0	0,500
24	12,5	-20	4	20	10,0	1,667
25	12,5	-5	6	25	15,6	2,600

Случайная величина ε характеризуется математическим ожиданием $E(\varepsilon) = 0$ и дисперсией $D^2(\varepsilon) = \sigma_e^2$. Дополнительно принимается, что она имеет нормальное распределение.

Проверялись четыре нулевых гипотезы H_0 об отсутствии эффектов уровней факторов. Это означает, что рассеяние величины y , вызванное любым фактором $\sigma_{факт}^2$. Аналогично σ_e^2 . Так как альтернативой равенству $\sigma_{факт}^2 = \sigma_e^2$ является неравенство $\sigma_{факт}^2 > \sigma_e^2$, то для проверки гипотезы H_0 применяется односторонний F -критерий (критерий Фишера-Снедекора). В соответствии с этим тестом для каждого фактора по опытным данным вычисляется средний квадрат отклонений $S_{факт}^2$, обусловленный влиянием фактора и имеющий $V_1 = (q-1)$ степеней свободы. Дисперсия $S_{факт}^2$ сравнивается со средним квадратом отклонений для ошибки S_e^2 , имеющим $V_2 = (q-3)(q-1)$ степеней свободы и являющимся оценкой фактора случайности σ_e^2 . Влияние считается значимым, если выборочное отношение $F_{emp} = S_{факт}^2 / S_e^2$ превышает критическое значение F_{α, v_1, v_2} , найденное для выбранного уровня значимости α , степенях свободы для числителя v_1 и знаменателя v_2 .

Результаты реализации процедуры дисперсионного анализа опытных данных об утрате массы образцов y_1 (см. таблицу 1) сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Таблица дисперсионного анализа в соответствии с моделью (4) данных таблицы 1 для утраты массы образцов y_1 , %

Источники дисперсии	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F_{emp}
A	19,9256	4	4,9814	0,7693
B	112,3336	4	28,0834	4,3369
C	57,2096	4	14,3024	2,2087
D	334,4856	4	83,6214	12,9137
Остаток	51,8032	8	6,4754	
Общая сумма	575,7576	24		

Критическое значение F - критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ для числа степеней свободы числителя $v_1 = 4$ и знаменателя $v_2 = 8$ находим из статических таблиц. Имеем $F_{0,05;4;8} = 3,84$. Согласно неравенству $F_{emp}(A) = 0,7693 < F_{0,05;4;8} = 3,84$ и $F_{emp}(C) = 2,2087 < 3,84$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ нет оснований отклонить гипотезу H_0 о статически незначимом влиянии фактора A (размер стороны квадратного образца) и фактора C (время выдержки образцов в морозильной камере) на утрату массы образцов y_1 . Поскольку $F_{emp}(B) = 4,3369 > 3,84$ и $F_{emp}(D) = 12,9137 > 3,84$, то имеем основания отклонить гипотезу H_0 и при уровне значимости $\alpha = 0,05$ утверждать, что температура замораживания (фактор B) и число циклов замораживания и оттаивания (фактор D) существенно влияют на исследуемый показатель y_1 .

Для рассматриваемых уровней статически значимых факторов B и D были вычислены средние значения \bar{y}_1 и выполнено их сравнение с использованием наименьшей значимой разницы Newman-Keuls [5]

$$NIR^{NK} = T_{\alpha, v, k} \sqrt{\frac{S_e^2}{q}}, \quad (5)$$

где $T_{\alpha, v, k}$ – критическое значение студентизированного размаха для уровня значимости α , степени свободы v среднего квадрата S_e^2 и числа сравниваемых средних k , расположенных в порядке возрастания или убывания;

q – число образцов, по которым определялись средние \bar{y}_1 .

После выбора уровня значимости $\alpha = 0,05$ при $q = 5$, $v = 8$ и $S_e^2 = 6,4754$ (см. таблицу).

2) из статических таблиц находим T и по формуле (5) вычисляем NIR .

k	$T_{0,05;8;k}$	NIR^{NK}
2	3,261	3,711
3	4,041	4,599
4	4,529	5,154
5	4,886	5,560

Запишем сравниваемые средние в порядке возрастания. Тогда для фактора B (температура замораживания) получим ряд:

$B_j, ^\circ C$	$B_3 = -15$	$B_4 = -20$	$B_2 = -10$	$B_5 = -25$	$B_1 = -5$
$\bar{y}_{1j}, \%$	5,32	6,10	6,70	8,42	11,28

При $\alpha = 0,05$ имеем три статически значимые разницы средних:

$$\bar{y}_{11} - \bar{y}_{13} = 11,28 - 5,32 = 5,96 > NIR^{NK} (k = 5) = 5,56,$$

$$\bar{y}_{11} - \bar{y}_{14} = 11,28 - 6,10 = 5,18 > NIR^{NK} (k = 4) = 5,154,$$

$$\bar{y}_{11} - \bar{y}_{12} = 11,28 - 6,70 = 4,58 > NIR^{NK} (k = 3) = 4,399.$$

Это означает, что средние значения показателя утраты массы y_1 при температуре замораживания $-5^\circ C$ существенно превышает значения этих показателей, полученные при температурах замораживания $-10^\circ C, -15^\circ C$ и $-20^\circ C$. Такой эффект температуры замораживания оказался довольно неожиданным и позднее дополнительными опытами был оценен еще раз.

В определенной мере этот эффект можно объяснить на основе термодинамической концепции замерзания воды в порах и капиллярах [6], а также других литературных данных [7, 8, 9, 10], освещающих процессы миграции влаги в капиллярно-пористых материалах при их замораживании. Многими авторами признается, что основной причиной разрушения водонасыщенного капиллярно-пористого материала при его замораживании является избыточное давление. Так, согласно [6] избыточное давление Δp , которое может развиваться при замораживании в более крупных порах с радиусом R , соединенных с зонами воды капиллярами с малым радиусом r , пропорционально разности обратных величин радиусов

$$\Delta p = 2\sigma \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right),$$

где σ – поверхностное напряжение на раз-

деле фаз вода – лед. Это давление возникает в наиболее крупных порах и капиллярах поверхностного слоя образца вследствие замерзания в них воды и дальнейшего их пополнения влагой из мелких пор и капилляров за счет миграции. При дальнейшем замораживании образца этот лед под влиянием избыточного давления, развивающегося внутри образца, по сообщающимся порам и капиллярам, вытесняется на поверхность, вызывая ее шелушение.

Согласно [7] количество вытесненного льда, отражающего фактор миграции влаги, должно быть прямо пропорционально давлению, возникающему во время замерзания воды в порах и капиллярах материала, и обратно пропорционально сопротивлению движения замораживающей влаги, которое обратно пропорционально эквивалентному радиусу.

Экспериментально установлено [7], что при замораживании водонасыщенных керамических образцов размером $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$ максимальное количество вытесненного льда наблюдается при постоянной температуре замораживания в холодильной камере $-4^\circ C$ в течение 6 часов. Для образцов размером $4 \times 4 \times 5 \text{ см}$ соответственно: $t = -1,3^\circ C$ и $\tau = 5$ часов. При понижении температуры пластичность льда уменьшается. Лабораторные испытания однотипных образцов при различных температурах циклического замораживания демонстрируют тенденцию увеличения морозостойкости с уменьшением количества вытесненного льда. Следует отметить, что наибольшее количество льда в порах образуется при понижении температуры до $-5^\circ C$.

Результаты дисперсионного анализа показателей утраты массы y_1 и y_2 в определенной мере подтверждают данные, полученные в работе [11] с помощью метода акустической эмиссии при замораживании образцов газобетона. Оказалось, что начало разрушения материала регистрируется аппаратурой после $5 - 10 \text{ мин}$ выдерживания в морозильной камере. Общее время интенсивного разрушения колеблется в пределах $40 - 60 \text{ мин}$. Температурный интервал активного разрушения образцов заключен между $-4^\circ C$ и $-7^\circ C$.

Для другого значимого фактора D (число циклов замораживания и оттаивания) имеем следующий ряд средних:

D_i	$D_1 = 5$	$D_2 = 10$	$D_3 = 15$	$D_4 = 20$	$D_5 = 25$
$\bar{y}_{1i}, \%$	2,52	5,80	5,94	11,50	12,06

После сравнения этих средних с использованием NIR^{NK} оказалось, что при $\alpha = 0,05$ шесть разниц следует признать статически значимыми и нет необходимости их приводить, так как количественно изменение средних значений подтверждает хорошо известный факт увеличения значений \bar{y}_1 с увеличением числа циклов замораживания и оттаивания. Каждые очередные 10 циклов приводят к статически значимому приросту утраты массы.

Анализируемые средние хорошо описываются линейной зависимостью:

$$\bar{y}_1 = 0,504D. \quad (6)$$

Отклонения средних от этой прямой следует признать случайными, так как отношение среднего квадрата этих отклонений $S_0^2 = 1,3775 (v = 4)$ к среднему квадрату для ошибки среднего $S_e^2 = 6,4754 / 5 = 1,295 (v = 8)$ при $\alpha = 0,05$ не превышает критической величины $F_{0,05;4;8} = 3,84$. Справедливость линейной зависимости (6) свидетельствует о том, что процесс накопления поверхностных повреждений не вышел за рамки первого этапа и максимальное число циклов $N = 25$, принятое в исследовании, не превысило критического значения.

Дисперсионный анализ был выполнен и для другого показателя утраты массы y_2 , вычисленного по формуле (3) и приведенного в таблице 1. Результаты этого анализа сведены в таблицу 3. Приведенные в ней значения величины F_{emp} для факторов A, B и D при $\alpha = 0,05$ превышают критическое значение $F_{0,05;4;8} = 3,84$, а для фактора C нет. Это означает, что для факторов A, B и D нулевая гипотеза отклоняется и их влияние на утрату массы образцов y_2 признается существенным. Чего нельзя сказать в отношении фактора C .

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа опытных данных таблицы 1 для утраты массы образцов y_2 , кг/м^2

Источники дисперсии	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F_{emp}
1	2	3	4	5
A	2,194	4	0,549	7,521
1	2	3	4	5
B	1,663	4	0,416	5,699
C	1,016	4	0,254	3,479
D	3,055	4	0,764	10,466
Остаток	0,583	8	0,073	
Общая сумма	8,511	24		

Сравнение средних значений \bar{y}_2 с использованием NIR^{NK} для факторов B и D привело к выводам, которые были получены при сравнении средних значений \bar{y}_1 . Поэтому рассмотрим средние

значения \bar{Y}_2 только для уровней фактора A (размер стороны квадратных образцов), признанного значимым. Имеем следующий ряд средних:

$A_i, \text{см}$	$A_1 = 2,5$	$A_2 = 5,0$	$A_3 = 7,5$	$A_4 = 10$	$A_5 = 12,5$
$\bar{Y}_{2i}, \text{кг/м}^2$	0,2878	0,5280	0,8140	0,8186	1,1634

С помощью теста NIR^{NK} при $\alpha = 0,05$ установлено, что три разницы этих средних являются статически значимыми. Приведенный ряд показывает, что увеличение массы (объема) геометрически подобных образцов одинаковой плотности приводит к росту утраты массы с единицы поверхности.

Эта зависимость может быть описана прямой, проходящей через начало координат

$$\bar{y}_2 = 0,963A. \quad (7)$$

Средний квадрат отклонений использованных опытных данных относительно модели (7) составляет $S_0^2 = 0,00882$ и не превышает среднего квадрата для ошибки среднего $S_0^2 = 0,073/5 = 0,0146$. Это свидетельствует о соответствии прямолинейной модели (7) опытным данным, по которым она получена.

Следует отметить, что при использовании показателя утраты массы y_1 статически значимого эффекта фактора A не было установлено. Поэтому в дальнейшем был выполнен дополнительный проверочный эксперимент.

3.2 Регрессионный анализ. Регрессионный анализ опытных данных таблицы 1 был выполнен с целью оценки возможных взаимодействий исследуемых факторов. Их отсутствие подтверждало бы справедливость принятой модели дисперсионного анализа (4).

При проведении регрессионного анализа целесообразно использовать кодированные значения факторов ($-1 \leq x_i \leq +1$). В нашем случае значения кодированных факторов x_i определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{2(A_i - A_3)}{A_5 - A_1}, & x_2 &= \frac{2(B_j - B_3)}{B_5 - B_1}, \\ x_3 &= \frac{2(C_k - C_3)}{C_5 - C_1}, & x_4 &= \frac{2(D_l - D_3)}{D_5 - D_1}, \end{aligned} \quad (8)$$

($i, j, k, l = 1, 2, \dots, 5$).

Не трудно проверить, что при выбранных уровнях факторов A, B, C и D их кодированные значения будут изменяться от -1 (нижний уровень) до $+1$ (верхний уровень).

Анализ средних \bar{y}_1 и \bar{y}_2 для уровней значимых факторов показал, что результаты эксперимента могут быть представлены полиномами второй степени, учитывающими линейные и квадратичные эффекты факторов, а также эффекты их взаимодействий первого порядка.

После реализации процедуры регрессионного анализа и исключения незначимых при $\alpha = 0,05$ коэффициентов регрессии получены следующие уравнения регрессии для кодированных факторов, которые адекватно описывают результаты эксперимента,

$$\bar{y}_1 = 5,284 + 4,56x_2^2 + 4,956x_4, \quad (9)$$

$$\bar{y}_2 = 0,4287 + 0,4084x_1 + 0,5872x_2^2 + 0,3610x_4 - 0,3146x_1x_3 + 0,3556x_1x_4. \quad (10)$$

Из уравнения (9) следует, что среди анализируемых факторов статически значимо на утрату массы y_1 влияет только температура замораживания x_2 с квадратичным эффектом $b_{22} = 4,56$ и число циклов замораживания и оттаивания x_4 с линейным эффектом $b_4 = 4,956$. Это полностью подтверждает результаты дисперсионного анализа и принятое предположение о незначимости эффектов взаимодействия факторов.

онного анализа и принятое предположение о незначимости эффектов взаимодействия факторов.

Однако, как показывает уравнение (10), при измерении утраты массы с помощью показателя y_2 регрессионный анализ данных выявил два взаимодействия с эффектами $b_{13} = -0,3143$ и $b_{14} = 0,3556$. Это означает, что эффект фактора x_3 (продолжительность замораживания) и эффект фактора x_4 (число циклов) зависят от уровня, на котором находится фактор x_1 (размер образцов). При учете этих взаимодействий можно заметить, что для малых образцов ($x_1 = -1$) эффект прироста утраты массы y_2 с увеличением числа циклов замораживания (x_4) оказался минимальным и статически незначимым, а увеличение продолжительности замораживания (x_3) от 2 до 10 часов приводит к значимому приросту утраты массы. Для больших образцов ($x_1 = +1$) эффект прироста показателя утраты массы y_2 с увеличением числа циклов становится статически значимым и наибольшим, зато увеличение продолжительности замораживания уменьшает значения утраты массы. Эффект фактора x_1 (размер образцов) зависит от комбинации знаков факторов x_3 и x_4 . Только для комбинации $x_3 = 1$ и $x_4 = -1$ этот эффект незначим. Для остальных комбинаций он значим и положителен.

Таким образом, переход от одних единиц измерения утраты массы к другим существенно изменил характер регрессионной зависимости. В целом результаты статического анализа опытных данных двумя методами показали, что наибольшее влияние на утрату массы образцов оказывает начальная стадия замораживания независимо от единиц измерения.

4. Проверка эффекта температуры замораживания и размера образцов.

Для проверки выявленного эффекта снижения утраты массы образцов при снижении температуры замораживания с -5°C до -15°C были выполнены дополнительные опыты на кубических образцах со стороной $7,7 - 7,8$ см. Эти образцы были вырезаны из пенобетонных блоков со средней плотностью $\bar{\rho} = 552$ кг/м³. После водонасыщения серия из 5 образцов ($n_1 = 5$) замораживалась в морозильной камере при температуре $t_1 = -5^\circ\text{C}$, а другая серия образцов ($n_2 = 4$) при температуре $t_2 = -15^\circ\text{C}$. Продолжительность замораживания образцов не менялась и составляла 6 часов. Значения утраты массы образцов определялись после каждого цикла замораживания и оттаивания. Испытания продолжались только 15 циклов, так как у двух образцов (по одному из каждой серии) после 13-го цикла появились признаки перехода от медленного этапа накопления повреждения к лавинному. Поэтому полученные значения утраты массы сравнивались после 12-го цикла замораживания и оттаивания. Если посмотреть на план эксперимента, приведенный в таблице 1, то можно заметить, что принятые в данном эксперименте размеры образцов, продолжительность их замораживания и число циклов соответствует центру этого плана.

Результаты описанного эксперимента представлены в таблице 4, из которой видно, что значения плотности ρ и водопоглощения V образцов внутри каждой серии заметно меняются. Такие изменения, объясняемые неоднородностью поровой структуры пенобетонных блоков, из которых были вырезаны образцы, затрудняют оценку эффекта температуры замораживания. Поэтому необходимо было исключить влияние этой неоднородности на показатели утраты массы y_1 и y_2 .

Корреляционный анализ показал, что значения плотности и водопоглощения образцов коррелируют со значениями утраты массы.

Таблица 4. Утрата массы кубических образцов пенобетона y_1 и y_2 со стороны A , плотностью ρ , водопоглощением B после 12 циклов замораживания и оттаивания при температуре $t_1 = -5^\circ\text{C}$ и $t_2 = -15^\circ\text{C}$

№ п/п	$A, \text{мм}$	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	$B, \%$	$y_1, \%$	$y_2, \text{кг} / \text{м}^2$
Температура замораживания $t_1 = -5^\circ\text{C}$					
1	76,8	540	64,1	12,7	0,878
2	77,2	544	63,6	17,3	1,211
3	78,0	516	72,2	30,8	2,066
4	77,3	608	53,0	0,7	0,055
5	77,5	544	60,1	6,9	0,485
Температура замораживания $t_2 = -15^\circ\text{C}$					
1	77,3	556	63,4	8,6	0,616
2	78,2	530	68,8	14,7	1,015
3	77,2	533	75,1	26,8	1,838
4	77,2	607	57,0	2,7	0,211

При этом наиболее сильная корреляция наблюдается между значениями водопоглощения B и значениями показателей утраты массы как y_1 , так и y_2 . Для первой серии образцов, замораживаемых при температуре $t_1 = -5^\circ\text{C}$, коэффициент парной корреляции между B и y_1 составлял $r_{By_1} = 0,972$, а между B и y_2 равнялся $r_{By_2} = 0,973$. Для второй серии образцов ($t_2 = -15^\circ\text{C}$) имели: $r_{By_1} = 0,990$ и $r_{By_2} = 0,983$. Такие значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что опытные данные можно описать линейной зависимостью

$$y = b_0 + b_1 B.$$

После реализации процедуры наименьших квадратов для данных таблицы 4 получены уравнения линейной регрессии. Для первой серии образцов ($t_1 = -5^\circ\text{C}$) получили:

$$y_{1t_1} = 1,589B - 85,79, \quad (11)$$

$$y_{2t_1} = 0,1064B - 5,7212. \quad (12)$$

Для второй серии образцов ($t_2 = -15^\circ\text{C}$) имеем:

$$y_{1t_2} = 1,314B - 73,63; \quad (13)$$

$$y_{2t_2} = 0,0885B - 4,9291. \quad (14)$$

Графическая иллюстрация этих зависимостей представлена на рисунке 2, из которого видно, что для однородных образцов, имеющих одинаковые значения водопоглощения, снижение температуры замораживания с $t_1 = -5^\circ\text{C}$ до $t_2 = -15^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению значения показателя y_1 , а также y_2 . Для проверки статической значимости этого эффекта вначале был выполнен анализ остатков $e_i = y_i - \hat{y}_i$, определяющих отклонения опытных данных y_i от линии регрессии, построенной по этим данным.

Из рисунка 2 можно заметить, что между значениями e_i и \hat{y}_i не наблюдается явной зависимости. Это позволяет предположить, что дисперсии σ_1^2 и σ_2^2 случайных величин y_1 и y_2 не зависят от значений этих величин.

В качестве оценки параметра σ_1^2 случайной величины y_1 был использован средний квадрат остатков $S_{y_1}^2$, вычисленный по данным первой ($n_1 = 5$) и второй ($n_2 = 4$) серий образцов. Имеем:

$$S_{y_1}^2 = \left(\sum_{i=1}^{n_1} e_i^2 + \sum_{i=1}^{n_2} e_i^2 \right) / (n_1 + n_2 - 4) = 7,706.$$

При степенях свободы $\nu = n_1 + n_2 - 4 = 5$.

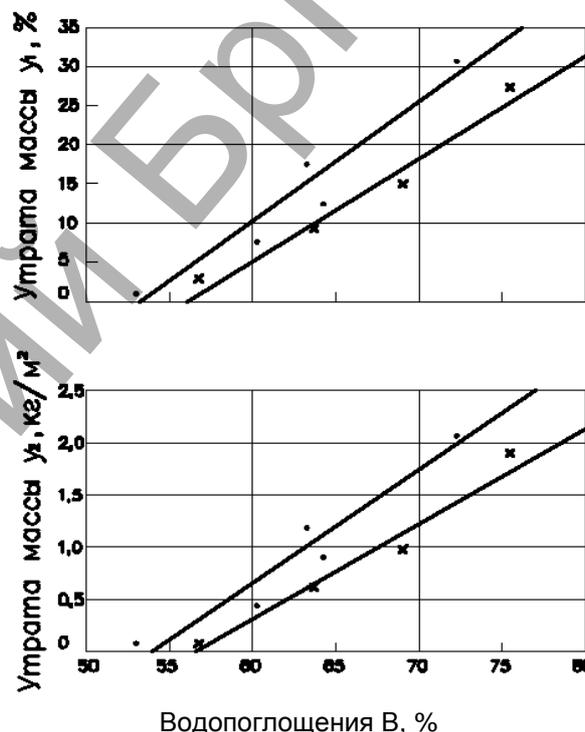


Рис. 2. Зависимость утраты массы образцов y_1 и y_2 от водопоглощения и температуры замораживания
• $t_1 = -5^\circ\text{C}$, x $t_2 = -15^\circ\text{C}$

Соответственно оценка параметра σ_2^2 случайной величины y_2 оказалась равной $S_{y_2}^2 = 0,03447$ при степенях свободы $\nu = 5$.

Далее при среднем значении водопоглощения $B = 64\%$ по формулам (11) и (13) была определена пара значений $\hat{y}_{1t_1} = 15,906$ и $\hat{y}_{1t_2} = 10,466$, а по формулам (12) и (14) – пара значений $\hat{y}_{2t_1} = 1,0884$ и $\hat{y}_{2t_2} = 0,7362$. Для проверки статической значимости разниц значений в каждой из этих пар были вычислены величины:

$$t_1 = \frac{\hat{y}_{1t_1} - \hat{y}_{1t_2}}{\sqrt{S_{y_1}^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} = 2,92 \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{\hat{y}_{2t_1} - \hat{y}_{2t_2}}{\sqrt{S_{y_2}^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} = 2,83,$$

которые имеют распределение t – Стьюдента при степенях свободы $\nu = 5$.

При выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ из распределения t – Стьюдента находим критическое значение $t_{0,05;5} = 2,57$. Видно, что это критическое значение меньше значений проверяемых величин $t_1 = 2,92$ и $t_2 = 2,83$. В таком случае имеем основания утверждать, что эффект температуры является статически значимым. Полученный результат подтверждает предыдущий вывод о том, что снижение температуры замораживания образцов с -5°C до -15°C приводит к уменьшению значений показателей утраты массы y_1 и y_2 .

Для дополнительной проверки эффекта размера образцов было испытано три серии кубических образцов, вырезанных из пенобетонных блоков. Каждая серия состояла из трех образцов, имеющих среднюю сторону квадрата на уровнях: $\bar{A}_1 = 5,72\text{см}$, $\bar{A}_2 = 6,98\text{см}$ и $\bar{A}_3 = 8,21\text{см}$. По сравнению с предыдущим экспериментом материал образцов характеризовался более низкой средней плотностью $\bar{\rho} = 498\text{кг} / \text{м}^3$ и более высоким водопоглощением $B = 73,47\%$.

Температура замораживания образцов составляла -15°C . После семи циклов замораживания и оттаивания у двух наиболее крупных образцов наблюдался переход к этапу лавинообразного разрушения. Поэтому при анализе сравнивались результаты утраты массы образцов, полученные после пяти циклов замораживания и оттаивания. При этом эффект влияния водопоглощения образцов на утрату массы предварительно был исключен с помощью зависимости утраты массы y_1 от водопоглощения B . Поскольку ранее была подтверждена статистическая гипотеза об отсутствии влияния размера образцов на утрату массы y_1 , то при оценке зависимости $y_1 = f(B)$ были использованы данные испытаний образцов всех трех серий.

Как и ранее, данные были описаны уравнением прямолинейной прогрессии:

$$y_1 = -59,65 + 0,95N, \quad (15)$$

для которого средний квадрат остатков составлял $S_{y_1}^2 = 8,4$ при степенях свободы $\nu = 7$. Эта оценка параметра σ^2 случайной величины y_1 практически совпала с предыдущими оценками $S_{y_1}^2 = 6,475$ при $\nu = 8$ и $S_{y_1}^2 = 7,706$ при $\nu = 5$.

С помощью формулы (15) все данные были приведены к среднему значению водопоглощения $B = 73\%$. Приведенные данные об утрате массы y_1 и y_2 характеризуются следующими средними значениями:

$\bar{A}, \text{см}$	5,72	6,98	8,21
$\bar{y}_1, \%$	7,46	9,33	10,70
$\bar{y}_2, \text{кг} / \text{м}^2$	0,344	0,531	0,664

и выборочными дисперсиями: $S_{y_1}^2 = 6,87$ при $\nu = 6$ и $S_{y_2}^2 = 0,018$ при $\nu = 6$.

При сравнении средних \bar{y}_1 оказалось, что при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ ни одна из разниц средних не является статически значимой. При сравнении средних \bar{y}_2 статически значимой можно признать только одну наибольшую разницу средних (0,664 – 0,344). Это еще раз подтверждает вывод о том, что в рассмотренном факторном пространстве при использовании показателя утраты массы y_1 эффект размера образца является несущественным и им можно пренебречь. При использовании же показателя утраты массы y_2 этим эффектом нельзя пренебрегать.

С физической точки зрения с увеличением стороны квадрата образцов A утрата массы с единицы поверхности должна возрастать; так как увеличение A обратно пропорционально уменьшает удельную поверхность образцов, что затрудняет процессы переноса тепла и влаги и интенсифицирует процессы деградации материала. Это хорошо подтверждает показатель утраты массы $y_2, \text{кг} / \text{м}^2$. При использовании показателя $y_1, \text{кг} / \text{кг}$, одновременно с увеличением потери массы с единицы поверхности учитывается также увеличение массы самого образца.

Заключение. По специальному плану выполнено циклическое замораживание и оттаивание образцов пенобетона различных размеров, замораживаемых при различных температурах и продолжительностях ее действия и подвергнутых действию различного числа циклов. Максимальное число циклов выбиралось таким образом, чтобы первый относительно медленный процесс накопления повреждений, характеризуемый утратой массы с поверхности образцов, не переходил в лавинообразный. В результате статического анализа полученных данных установлено, что в рассмотренном четырехфакторном пространстве утрата массы y_1 , измеряемая в %, зависит только от температуры замораживания и числа циклов. В то время как утрата массы y_2 , измеряемая в $\text{кг} / \text{м}^2$, зависит не только от указанных факторов, но и от размеров образцов, а также взаимодействия размера образцов с продолжительностью замораживания и числом циклов. Следовательно, измерение одного и того же показателя морозостойкости материала с использованием различных единиц может приводить к неоднозначным выводам. Анализ опытных данных показал, что наибольшее влияние на утрату массы оказывает начальная стадия замораживания. Наибольший эффект утраты массы наблюдался при температуре замораживания -5°C , а не при температуре -15°C или -20°C , как ожидалось. После двух часов замораживания при постоянной температуре практически не наблюдался прирост утраты массы. Довольно неожиданный эффект температуры замораживания был подтвержден дополнительными опытами и объяснен на основе термодинамической концепции замерзания воды в порах и капиллярах.

С физической и формальной (статистической) точек зрения подтверждена неоднозначность эффекта размера образцов при измерении утраты массы с использованием различных единиц. Результаты выполненного исследования говорят о том, что авторам нормы PKN-CEN/TS12390-9:2007 следовало бы уточнить рекомендации по методам и критериям оценки морозостойкости бетона.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. EN 206 – 1 Concrete. Specification, production and conformity.
2. PN – EN 206 – 1:2003, Beton – Czesc 1: Wymagania, Wlasciwosci, produkcja i zgodnosc.
3. PKN-CEN/TS 12390-9:2007, Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling (oryg.).
4. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
5. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
6. Everett, H. Thermodynamic of frost Damage to Poroces Solids. Trans. Farad. Soc., 1961, 57, 1541 – 1551.
7. Садунас, А.С. Морозостойкость стеновых керамических изделий и скоростные методы ее определения: обзорная информация / А.С. Садунас, Р.А. Шячюлис – М.: ВНИИЭСМ, 1979. – 57 с.
8. Hynes, J.M. Frost action as capillary effect. Trans. Brit. Ceram.Soc., nr.11, 1964.
9. Van der Velden, J.H. Wasserabsorption von Baukeramik. Ziegeling. Intern., nr.12, 1981.
10. Setzer, M.J. Micro-ice-lens formation in porous solid. Journal of Colloid and interface Science 243, 193 – 201, 2001.
11. Меркин, А.П. Оценка морозостойкости бетонов / А.П. Меркин, Г.А. Фокин // Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействий различных эксплуатационных факторов: межвуз. сб. КХТИ. – Казань, 1982. – С. 19–22.

Материал поступил в редакцию 11.11.11

The analysis of acting Polish norma PKN-CEN/TS 12390-9:2007 «Testing harden concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling, which supplements European norma EN 206-1 «Concrete. Specification, production and conformity» is made. On the basis of on experimental research and the statistical analysis of the gained date it is show that recommended in the PKN-CEN/TS 12390-9:2007 test methods na frost resistance can give various results.

УДК 691.421:666.9.015.44

Никитин В.И., Кофанов В.А.

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ИЗДЕЛИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАПИЛЛЯРНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА

Введение. Для количественного описания процесса переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых строительных материалах и оценки влажностного состояния ограждающих конструкций необходимо знать зависимость значения коэффициента капиллярного влагопереноса от влагосодержания материала, которое в свою очередь зависит от особенностей его капиллярно-пористой структуры. При установлении этой зависимости известными методами необходимо выполнять довольно длительные и трудоемкие эксперименты, использовать дорогостоящую аппаратуру и непростые вычислительные процедуры, при реализации которых предполагается, что образцы испытываемого материала являются однородными и изотропными. Однако не все изделия строительных материалов могут удовлетворять этому условию. Среди прочих можно отметить изделия стеновой керамики пластического формования. В процессе довольно сложного движения пластичной глиняной массы в корпусе и формирующей части ленточного пресса в сформованном брусе заданного профиля параллельно оси пресса возникают расслоения. В результате готовые изделия имеют осевую текстуру, приводящую к анизотропии физических свойств керамического материала.

В данной работе выполнена количественная оценка влияния анизотропии изделий стеновой керамики пластического формования на значения показателей капиллярных свойств материала и коэффициента капиллярного влагопереноса (коэффициента выравнивания влаги). Для этого вначале экспериментальным путем определялись показатели, характеризующие способность керамического материала впитывать воду в направлении формования и перпендикулярно этому направлению, а затем на основе полученных экспериментальных данных и разработанного авторами метода вычислялись коэффициенты капиллярного влагопереноса в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Теория и методика эксперимента. Для понимания процесса капиллярного переноса влаги в капиллярно-пористых материалах можно воспользоваться основами капиллярной теории, разработанной для отдельного цилиндрического капилляра и описанной во многих работах, например [1, 2, 3]. В соответствии с этой теорией без больших погрешностей процесс всасывания воды вертикальным цилиндрическим капилляром из гидрофильного материала описывается зависимостью:

$$\tau = M_0 \cdot X^2, \quad (1)$$

где τ – продолжительность капиллярного всасывания воды от момента контакта нижнего конца капилляра с поверхностью воды, с;

X – путь, пройденный поднимающимся фронтом воды в капилляре за время τ , м.

Из зависимости (1) следует, что время τ , за которое столб воды в вертикальном цилиндрическом капилляре поднимется на высоту X , пропорционально квадрату этой высоты. Коэффициент пропорциональности M_0 в зависимости (1) характеризует способность данного капилляра сопротивляться всасыванию воды и определяется по формуле:

$$M_0 = \frac{2 \cdot \eta}{r_0 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость воды, Па·с;

r_0 – радиус капилляра, м;

σ – поверхностное натяжение на границе вода-воздух, Н/м;

θ – угол смачивания.

Как видно из формулы (2), сопротивление всасыванию воды возрастает при увеличении вязкости воды и угла смачивания, а также при уменьшении радиуса капилляра и поверхностного натяжения.

Со временем процесс капиллярного всасывания воды затухает (силы внутреннего трения и инерции стремятся к нулю) и в момент времени $\tau = \tau_{\max}$ сила капиллярного всасывания уравновешивается только силой тяжести водяного столба $X = h_{\max}$. Из условия равновесного состояния имеем:

$$h_{\max} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{r_0 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Формула (1) справедлива только для одиночного капилляра при условии, что высота подъема воды в капилляре X значительно меньше высоты столба воды в том же капилляре в состоянии равновесия h_{\max} .

В силу очевидных различий между одиночным капилляром и реальным материалом без дополнительных допущений зависимость (1) нельзя непосредственно использовать для количественного описания процесса впитывания воды капиллярно-пористыми строительными материалами. Однако она может служить основой при построении математической модели для количественного описания процесса одномерного капиллярного впитывания воды сухими образцами капиллярно-пористых материалов.

Известно, что в достаточно высоких образцах (в теоретических исследованиях рассматривается неограниченное однородное и изотропное полупространство) при одномерном капиллярном впитывании воды в момент времени $\tau \leq \tau_{\max}$ граница между влажной и сухой частями образца довольно размыта и влагосодержание материала по высоте образца изменяется от значения W_{κ} , кг/м³, которое соответствует капиллярному насыщению, до начального W_0 , которое для абсолютно сухих образцов равно нулю. Эта зависимость обычно называется профилем влажности $W(X, \tau)$, и ее типичный вид показан на рисунке 1 сплошной линией.