

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-81-91

*\*Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: shaknv1978@mail.ru*

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ

**Аннотация.** Эксплуатационная морозостойкость – одно из основных требований, предъявляемых к строительным материалам. Основными факторами, приводящими к ухудшению свойств кирпича, являются циклы замораживания и оттаивания. Самым надежным способом проверки строительных материалов на морозостойкость является тестирование изделий на циклы замораживания-оттаивания. Однако, стандартный метод определения морозостойкости является длительным во времени, энергозатратным и требует использование дорогостоящего и сложного в эксплуатации оборудования. Инженерная отрасль заинтересована в сокращении количества времени испытаний, необходимых для оценки морозостойкости. Исследователи уже длительное время работают над созданием экспресс-методов определения морозостойкости кирпича. В статье предложены новые количественные критерии оценки морозостойкости стеновой керамики на основе гидродинамических параметров пористого твердого тела. Предлагаемые методологии оценки морозостойкости позволяют учесть текстурные свойства пористых изделий. В результате изучения кинетики водонасыщения и водоотдачи керамического черепка установлена закономерность влияния площади петли гистерезиса на морозостойкость стеновой керамики. Благодаря их взаимосвязи получены уравнения регрессии зависимости площади петли гистерезиса от коэффициента водонасыщения и водоотдачи. Предложены расчетные выражения морозостойкости, где морозостойкость кирпича оценивается по значению площади петли гистерезиса или коэффициенту водонасыщения и водоотдачи.

**Ключевые слова:** количественные критерии оценки морозостойкости, гидродинамические параметры, кривая водонасыщения, кривая водоотдачи, площадь петли гистерезиса, коэффициент водонасыщения и водоотдачи, морозостойкость

**Введение.** Одним из важнейших эксплуатационных показателей стеновой керамики является морозостойкость [1–3]. Снижение морозостойкости пористых материалов происходит в основном из-за взаимодействий структура – вода, которые, в зависимости от характеристик пористой структуры, физического состояния воды (жидкость или пар) и условий окружающей среды, могут иметь разную величину, включая различные механизмы сорбции. Вода в пористый материал может проникать из нескольких источников: атмосферных осадков, капиллярного впитывания грунтовой влаги, увлажнения вследствие конденсации и сорбции. Большая проникающая способность воды обусловлена малым размером ее молекулы по сравнению с капиллярами и межмолекулярными полостями в твердых материалах и равна 0,28 нм [4–6].

Проникновение дождевой воды в капилляры и более крупные поры возможно только тогда, когда вся поверхность пористого материала покрыта одинарным или двойным слоем молекул воды; иначе вода не сможет проникнуть, когда поверхность полностью сухая. Движущая сила водяного пара представлена градиентом давления, а для переноса жидкой воды – силами капиллярного всасывания [7]. Замораживание кирпича происходит при понижении температуры ниже нуля, после чего начинается процесс замерзания

воды в кирпиче. Плотность льда при 0°C составляет 0,917 г/см<sup>3</sup>, а плотность воды при 20°C 0,998 г/см<sup>3</sup>. Один грамм воды, при переходе в лед, увеличивается на 8,8 %, создавая напряжения внутри материала. Развивающееся при этом давление, в зависимости от характера пор, достигает 2500–2800 кгс/см<sup>2</sup>. В системе капилляров, где возникающий лед может вытеснить избыточную влагу в свободные от воды поры, такие большие напряжения исключаются. Если же свободных пор от воды объемов мало, то в капиллярах возможно давление, превышающее предел прочности материала и приводящее к его разрушению при замораживании [8, 9].

Связь между морозостойкостью и капиллярностью идет через микроструктурные характеристики пористых изделий. Пропитанные водой изделия могут вести себя по-разному при охлаждении, несмотря на одинаковую общую поглощающую способность, или эффекты замерзания могут быть одинаковыми для изделий с различной поглощающей способностью. Решающим фактором, влияющим на морозостойкость, является распределение пор по размерам в твердом материале, а их размер и количество влияет на процессы адсорбции, испарения, капиллярности, содержание замерзающей воды, ее миграцию на поверхность [9, 10]. Именно, объем и размер пор определяют способность хранить жидкость и

легкость циркуляции жидкости внутри материалов, а не суммарная пористость, поскольку не дает информации о распределении пор внутри камня [12–16]. В литературе имеется множество работ [17–21], посвященных исследованию кинетики поглощения и ее взаимосвязи с порометрическими характеристиками. Согласно изучению параметров, связанных с поглощением и транспортом жидкости: водопоглощение, капиллярное водопоглощение и высыхание, по анализу графиков кривых сушек кирпичных образцов предполагали наличие мелких или крупных пор, а по скорости водоотдачи и оценивали негативное влияние воды на кирпич. Понимание влияния микроструктуры материала на гигрометрические свойства керамического кирпича играет фундаментальную роль для управления явлениями конденсации и предотвращения разрушения структуры кладки.

Параметры для оценки морозостойкости подразделяют на прямые и косвенные. Прямым, единственным параметром для оценки морозостойкости является устойчивость к циклам замораживания и оттаивания, определяемая согласно ГОСТ 530-2012, в соответствии с которым кирпич должен быть морозостойким и выдерживать определенное количество циклов без видимых признаков разрушения. К косвенным параметрам относят прочность на сжатие, пористая структура, коэффициент насыщения, начальная скорость водопоглощения, водопоглощение и др. В настоящее время ускоренных способов измерения морозостойкости стеновой керамики не существует. До 1954 года в нашей стране определяли морозостойкость ускоренным методом по коэффициенту насыщения, и этот метод был регламентирован в качестве факультативного в ГОСТ 530-41. Считалось, что чем меньше коэффициент насыщения, тем больше объем мелких пор, которые относили к резервным, и считалось, что в них может вытесняться избыточная вода при замерзании. Между тем, такая зависимость наблюдалась далеко не всегда. Это явилось причиной исключения из ГОСТ допускавшейся ранее оценки морозостойкости продукции по коэффициенту насыщения с выпуском нового ГОСТ 530-54 [9].

Из множества литературных источников, очевидно, что разработке методов определения морозостойкости кирпича посвящено большое количество работ [11, 22–24]. Предпринимались попытки улучшить, сократить длительность испытания кирпичей на морозостойкость и тем самым улучшить прогнозирование показателей долговечности конструкций, но линейные корреляции были специфичны для одного материала,

или выявленные зависимости не дали корреляции со стандартным тестом. В литературных источниках [25, 26] авторы использовали ряд физических тестов, включая капиллярное всасывание, воздухопроницаемость, коэффициент насыщения, ртутную порометрию и тесты на прочность. Авторы пришли к выводу, что сочетание таких свойств, как абсорбция и капиллярное всасывание или абсорбция и индекс прочности, распределение пор по размерам и водопоглощение, отношение прочности на сжатие до замораживания и после и коэффициенту десорбции воды при 180–360 минутах сушки, является более предсказуемым для кирпичей, прошедших испытание в морозильной камере, чем использование коэффициента насыщения. Тестирование, которое фокусируется на единичной реакции по косвенным методам оценки, не дает полной информации для анализа морозостойкости в эксплуатации.

Целью данной работы являлось выявить взаимосвязь между гидродинамическими параметрами (водонасыщение, водоотдача) и структурой пористых твердых тел, позволяющей прогнозировать их морозостойкость.

Решением, не применяемым ранее, является разработка принципиально нового подхода к оценке морозостойкости на основе установления закономерностей кинетики водопоглощения и водоотдачи и получении уравнений регрессии, позволяющих прогнозировать и оценивать морозостойкость стеновой керамики.

**Материалы и методы.** Исследование гидродинамических параметров и морозостойкости осуществляли на образцах в форме кубиков с размером ребра 5 см изготовленных пластическим и двухсторонним двухступенчатым полусухим прессованием при первом удельном давлении 50 кгс/см<sup>2</sup> и максимальном удельном давлении 300 кгс/см<sup>2</sup>. Керамические массы для изготовления образцов отличались количественным соотношением каолинита к монтмориллониту в глинах, фракционным составом кварцевого песка. Обжиг образцов проводился при температурах 950, 1000 и 1050 °С. Режим обжига: 200 °С – выдержка 1 час, 600 °С – 2 часа, при максимальной температуре выдержка составляла 3 часа. В качестве эталона для сопоставительного анализа для морозостойкости были использованы образцы стеновой керамики промышленно выпускаемыми отечественными предприятиями РФ с морозостойкостью, удовлетворяющей ГОСТ 530-2012.

Для исследования кинетики водонасыщения каждый образец погружали в воду на глубину 1–2 мм так, чтобы нижняя поверхность образца контактировала с водой, и в таком положении выдерживали заданное время (10, 20, 30, 60, 90, 120,

180, 240, 360, 480, 660, 840, 1020, 1440, 2880 мин) в герметично закрытой емкости, где поддерживался постоянный уровень воды. По истечении заданного времени, образцы извлекали из воды, взвешивали и вновь погружали в воду. Отсчет времени выдержки в воде ведут с момента первого погружения образца в воду. Конечной точкой взвешивания была точка 2880 мин, так как за это время произошло полное капиллярное водонасыщение образцов. Количество поглощенной воды  $C_{\text{кап}}$  (%) вычисляли по формуле (1):

$$C_{\text{кап}} = \frac{(m_{\tau} - m_{\text{сух}})}{(m_{48} - m_{\text{сух}})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $m_{\tau}$  – масса образца через определенное время водонасыщения, г;  $m_{\text{сух}}$  – масса сухого образца, г;  $m_{48}$  – масса образца через 2880 мин (48 часов) капиллярного водонасыщения, г.

Для исследования кинетики сушки образцов водонасыщенные образцы подвергали сушке в сушильном шкафу при постоянной температуре 120°C. Измерение количества испарившейся воды производили путем взвешивания через промежутки времени с шагом 15 минут до полного испарения находящейся в образце воды. Максимальное время водоотдачи для всех образцов составило 12 часов. Количество испарившейся воды  $C_{\text{исп}}$  (%) вычисляли по формуле (2):

$$C_{\text{исп}} = \frac{(m_{48} - m_{\tau})}{(m_{48} - m_{\text{сух}})} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $m_{48}$  – масса образца через 2880 мин (48 часов) капиллярного водонасыщения, г;  $m_{\tau}$  – масса образца через определенное время сушки, г;  $m_{\text{сух}}$  – масса сухого образца, г.

Коэффициент водонасыщения и водоотдачи ( $K$ ) [30] рассчитывали, как результат частного чисел количества поглощенной воды и количества испарившейся воды в фиксированных точках от времени водонасыщения и водоотдачи по формуле (3):

$$K = \frac{C_{\text{кап}}}{C_{\text{исп}}}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{кап}}$  – количество поглощенной воды в материале при капиллярном водонасыщении при 5 % от времени водонасыщения, что соответствует 2,4 часа водонасыщения, при 10 % от времени водонасыщения – 4,8 часа и при 20 % – 9,6 часа водонасыщения;  $C_{\text{исп}}$  – количество испарившейся

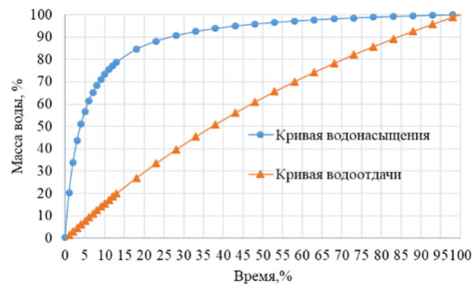
воды в материале в процессе сушки при 5 %, что соответствует 0,6 часа сушки, при 10 % от времени водонасыщения – 1,2 часа сушки и при 20 % от времени водонасыщения – что соответствует 2,4 часа сушки.

Контроль морозостойкости образцов проводили методом объемного замораживания согласно ГОСТ 7025-91, пункт 7 «Контроль морозостойкости при объемном замораживании». Согласно ГОСТ 7025-91 «Кирпич и камни керамические и силикатные», для контроля морозостойкости по степени повреждений отбирают не менее пяти образцов. Все образцы насыщают водой и подвергают попеременному многократному замораживанию и размораживанию при температуре воздуха в камере от минус 15 до минус 20 °С. Продолжительность одного замораживания образцов должна быть не менее 4 ч. Продолжительность оттаивания должна быть не менее половины продолжительности замораживания. При оценке морозостойкости по степени повреждений производят визуальный осмотр образцов и фиксируют появившиеся дефекты. Согласно техническим требованиям ГОСТ 530-2012 пункт 5.2.7 – кирпич и камень должны быть морозостойкими и в зависимости от марки по морозостойкости в насыщенном водой состоянии должны выдерживать без каких-либо видимых признаков повреждений или разрушений – растрескивание, шелушение, выкрашивание, отколы (кроме отколов от известковых включений) – не менее 25; 35; 50; 75; 100; 200 или 300 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Марка по морозостойкости клинкерного кирпича должна быть не ниже F75, лицевых изделий – не ниже F50. Допускается по согласованию с потребителем поставлять лицевые изделия марки по морозостойкости F35.

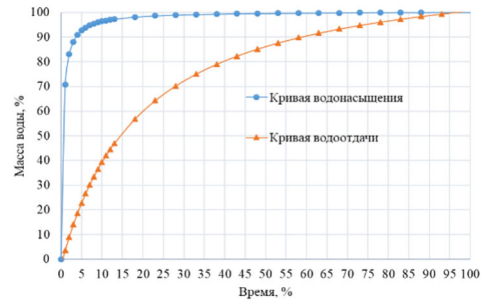
**Основная часть.** По экспериментально полученным результатам количества поглощенной и испарившейся воды для всех исследуемых образцов были построены графики зависимости в одной системе координат кривых водонасыщения и кривых водоотдачи от времени водонасыщения и сушки образцов [27]. Между кривыми образовались различные по площади области, так называемые петли гистерезиса, которые являются количественными критериями оценки морозостойкости стеновой керамики (рис. 1). На основе экспериментальных исследований впервые была установлена зависимость влияния площади петли гистерезиса на морозостойкость образцов: увеличение площади петли гистерезиса соответствует снижению морозостойкости образцов (табл. 1). Площадь петли гистерезиса варьируется от 3156 ед. до 600 ед. Варьирование площади

петли гистерезиса связано с изменением следующих факторов: количественным соотношением

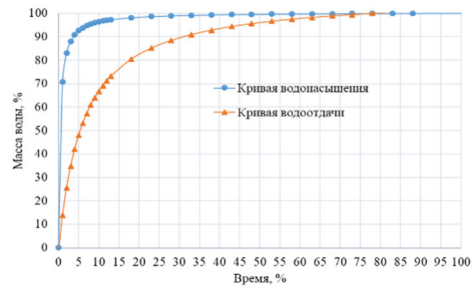
каолинита к монтмориллониту, фракционным составом кварцевого песка, способом формования и температурной обработкой образцов.



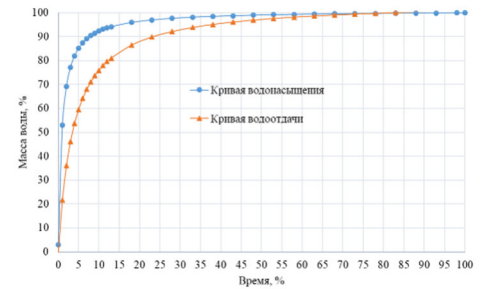
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Зависимости кривых кинетики водонасыщения и водоотдачи образцов, отличающиеся размером площади петли гистерезиса: а) – площадь петли 3156 ед.; б) – площадь петли 2079 ед.; в) – площадь петли 1000 ед.; г) – площадь петли 600 ед.

Таблица 1

**Результаты расчета площади петли гистерезиса и морозостойкости образцов**

№ образца	Площадь петли гистерезиса, ед.	Коэффициент водонасыщения и водоотдачи (K), %	Морозостойкость, рассчитанная по формуле (4), циклы	Морозостойкость, рассчитанная по формуле (5), циклы	Морозостойкость ГОСТ 7025-91, циклы
1	3156	7,2	7	7	7
2	2679	5,34	7	8	9
3	2074	3,96	14	14	15
4	2507	5,28	8	8	8
5	2283	4,74	10	9	9
6	2079	3,96	14	14	15
7	1211	2,32	67	61	65
8	1195	2,28	70	64	65
9	1118	2,11	81	79	80
10	1667	3,2	29	25	25
11	1498	2,67	39	41	40
12	1310	2,44	56	53	50
13	1498	2,74	39	38	35
14	1289	2,43	58	54	55
15	1000	1,92	102	101	100
16	1528	2,88	37	33	30
17	1325	2,45	54	52	47
18	1000	1,89	102	105	100
19	600	1,37	252	240	250
20	710	1,52	192	183	190
21	790	1,62	160	156	150

Площадь петли гистерезиса для каждого образца была рассчитана путем интегрирования уравнений кривых регрессий, подобранных к каждой кривой водонасыщения и кривой водоотдачи. Обратная пропорциональная зависимость между морозостойкостью образцов и площадью петли гистерезиса (рис. 2) описывается следующим уравнением:

$$M = a + b \cdot S^{0.5} + \frac{c}{S}, \quad (4)$$

где  $M$  – морозостойкость, циклы;  $S$  – площадь петли гистерезиса, относит. ед.;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты уравнения регрессии:  $a = -266,23$ ;  $b = 3,39$ ;  $c = 261143,96$ .

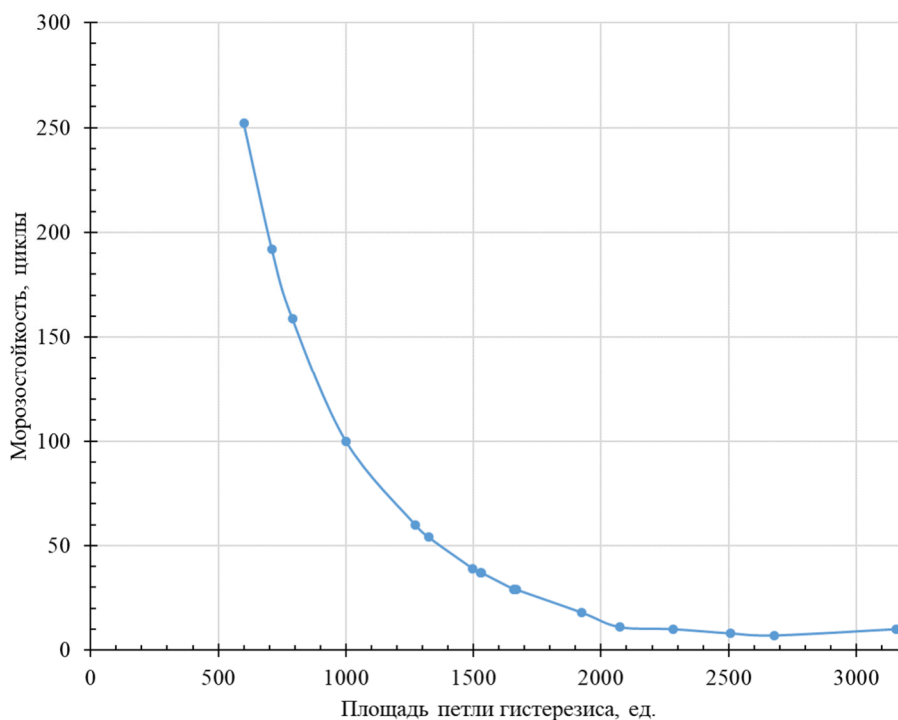


Рис. 2. Зависимость морозостойкости образцов от площади петли гистерезиса

Определение морозостойкости образцов по формуле 4 соответствует морозостойкости, определенной прямым объемным замораживанием согласно ГОСТ 7025-91 (табл. 1).

Для исключения математического процесса расчета площади петли гистерезиса по формуле (4) был рассчитан коэффициент водонасыщения и водоотдачи ( $K$ ), полученный как результат частного чисел количества поглощенной воды и количества испарившейся воды в фиксированных точках водонасыщения и сушки образцов при:

- 5 %, что соответствует 2,4 часа водонасыщения (%) и 0,6 часа сушки (%);
- 10 %, что соответствует 4,8 часа водонасыщения (%) и 1,2 часа сушки (%);
- 20 %, что соответствует 9,6 часа водонасыщения (%) и 2,4 часа сушки (%).

Установлен уровень пропорциональности между площадью петли гистерезиса и количеством поглощенной и испарившейся воды в данных точках, построены графики зависимости коэффициента водонасыщения и водоотдачи от морозостойкости образцов (рис. 3).

При коэффициенте водонасыщения и водоотдачи при 5 % от времени водонасыщения и сушки (рис. 3, а) уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,0023x - 0,3985,$$

где коэффициент корреляции имеет максимальное значение, равное 0,982.

При коэффициенте водонасыщения и водоотдачи при 10 % от времени водонасыщения и сушки (рис. 3, б) уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,0012x + 0,2571,$$

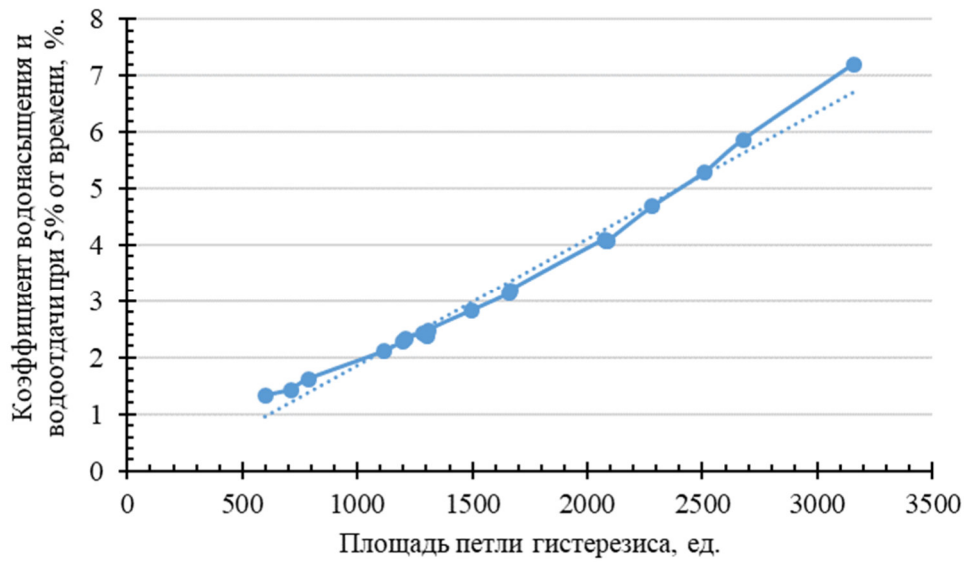
однако коэффициент корреляции снизился на 0,062 и составил 0,922.

При коэффициенте водонасыщения и водоотдачи при 20 % от времени водонасыщения и сушки (рис. 3, в) уравнение регрессии имеет вид:

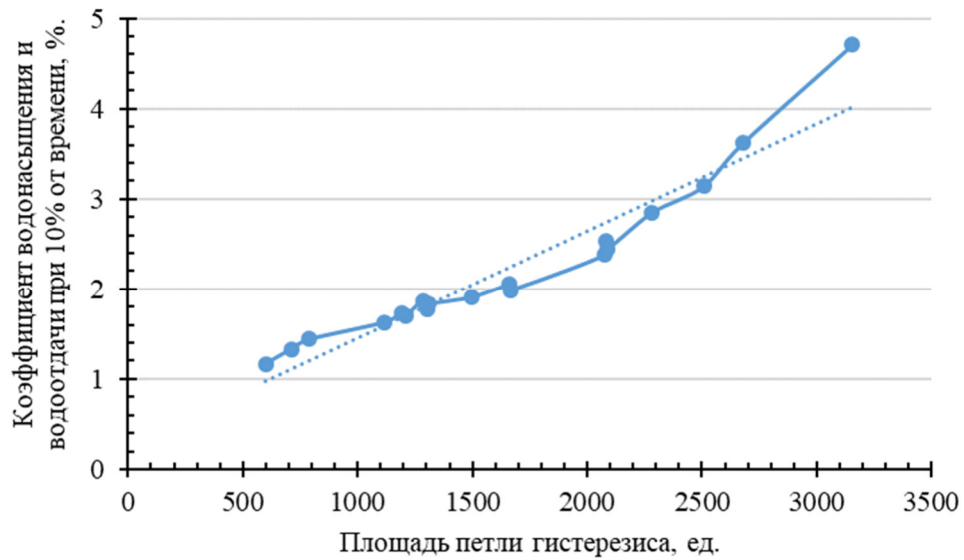
$$y = 0,0006x + 0,5353,$$

а коэффициент корреляции имеет наименьшее значение, равное 0,815.

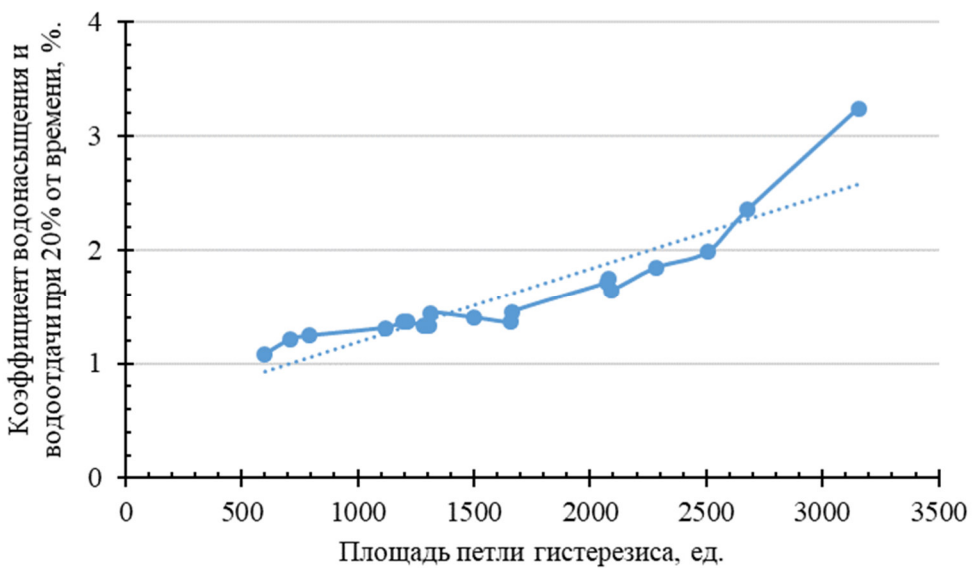
Более высокое значение коэффициента корреляции, равное 0,982, может быть объяснено тем, что именно при этом времени происходит наиболее важное капиллярное водонасыщение и испарение, а размер поровых каналов способствует более свободному передвижению воды и миграции на поверхность материала.



a)



b)



v)

Рис. 3. Зависимость площади петли гистерезиса от коэффициента водонасыщения и водоотдачи: а – при 5%; б – 10%; в – 20% от времени водонасыщения и сушки

Таким образом, для построения графика зависимости (рис. 4) морозостойкости от коэффициента водонасыщения и водоотдачи были взяты значения коэффициента водонасыщения и водоотдачи при 5 % от времени водонасыщения и

сушки, где наблюдался коэффициент корреляции с максимальным значением. Это позволит наиболее адекватно оценивать показатели морозостойкости.

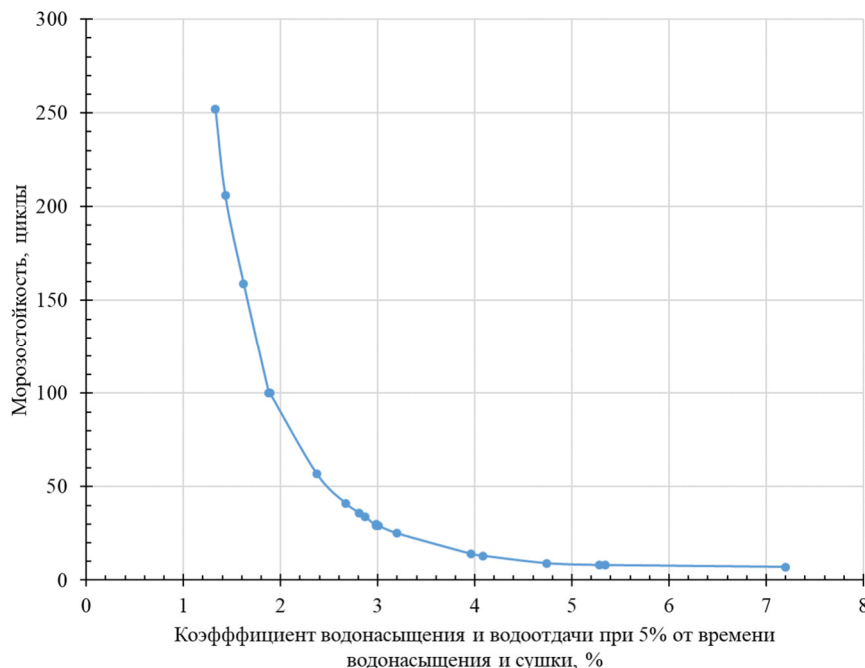


Рис. 4. График зависимости морозостойкости образцов от коэффициента водонасыщения и водоотдачи при 5 % от времени водонасыщения и сушки

Выявленная зависимость морозостойкости от коэффициента водонасыщения и водоотдачи пористого образца описывается следующим уравнением:

$$M = a + \frac{b}{K} + \frac{c}{K^2}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент водонасыщения и водоотдачи, равен результату частного чисел количества поглощенной воды  $C_{кан}$  и количества испарившейся воды  $C_{исп}$  при 5 % от времени водонасыщения и сушки, что соответствует 2,4 часа водонасыщения и 0,6 часам сушки;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты уравнения регрессии:  $a = 22,195$ ;  $b = -204,845$ ;  $c = 682,944$ .

Полученные данные расчета морозостойкости образцов с использованием формулы (5) показали хорошую корреляцию с морозостойкостью, рассчитанной согласно ГОСТ 7025-91 (табл. 1).

Определение морозостойкости по данным формулам может быть использовано для пористых материалов с водопоглощением от 6 до 20 % [27, 28].

**Вывод.** Разработанная на основе принципиально новых подходов методология оценки морозостойкости стеновой керамики позволяет оце-

нить структуру пор изделий на основе комбинации двух параметров – водонасыщения и сушки. Использование предложенных количественных критериев, регрессивных зависимостей и принципиально новых расчётных выражений позволяет существенно сократить время проведения испытаний за счет исключения трудоемкого и длительного процесса циклического тестирования кирпичей на циклы замораживания-оттаивания. Данные методы прогнозирования морозостойкости запатентованы и рекомендуются к широкому промышленному внедрению в центральных заводских лабораториях на предприятиях строительной индустрии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуров Н.Г., Наумов А.А., Иванов Н.Н. Пути повышения морозостойкости кирпича полусухого прессования // Строительные материалы. 2012. № 3. С. 40–42.
2. Shakurova N.V., Ivleva I.A., Doroganov E.A., Doroganov V.A., Evtushenko E.I. Influence of the mineralogical composition of clays on the capillary-porous structure and the frost resistance of ceramic brick // Glass and Ceramics. 2023. Vol. 80. Pp. 137–142. DOI: 10.1007/s10717-023-00572-y
3. Ивлева И.А., Беликова М.Е. Минералогический состава глин как один из основополагаю-



щих факторов морозостойкости теплоэффективной керамики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 185–188.

4. Raimondo M., Dondi M., Mazzanti F., Stefanizzi P. Equilibrium moisture content of clay bricks: the influence of the porous structure // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.10.017

5. Медведев А., Разоренов А., Сержантов А. Кинетика влагонасыщения композиционных материалов // *Технология в электронной промышленности*. 2014. № 4. С. 11–16.

6. Старцев С.А., Ступак М.В., Чиркин А.С. Оценка степени влияния капиллярного подсоса на увлажнение кирпичной кладки // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 4. С. 293–297.

7. Delgado J.M.P.Q., Guimaraes A.S., Guimaraes, Freitas V.P., Antepara I. Salt damage and rising damp treatment in building structures // *Advances in materials science and engineering*. 2016. Vol. 2016. 1280894. DOI:10.1155/2016/1280894

8. Макарова И.А., Лохова Н.А. Физико-химические методы исследования строительных материалов. Учеб. пособие. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 139 с.

9. Беркман А.С., Мельникова И.Г. Структура и морозостойкость стеновых материалов. Ленинград, Москва: Госстройиздат, 1962. 166 с.

10. Valdeon L., Esbert R.M., Grossi C.M. Hydric properties of some spanish building stones: a petrophysical interpretation // *Materials Research Society symposia proceedings*. Materials Research Society. 2011. Vol. 267. Pp. 911–916. DOI: 10.1557/PROC-267-911

11. Gummerson R.J., Hall C., Hoff W.D. The Suction Rate and the Sorptivity of Brick // *Transactions and journal of the British ceramic society*. 1981. Vol. 80. № 5. Pp. 150–152.

12. Raimondo M.M. Dondi, F. Mazzanti, Stefanizzi P. Equilibrium moisture content of clay bricks: the influence of the porous structure // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932.

13. Наумов А.А., Юдин А.Н. Повышение морозостойкости керамического черепка из глинистого сырья Шахтинского завода // *Материалы международной науч.-практ. конф. Строительство*. Ростов-на-Дону. 2012. С. 46–47.

14. Maage M. Frost resistance and pore size distribution in bricks // *Materials and Structures*. 1984. Vol. 17. Pp. 345–350.

15. Абдрахимов А.В., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Технические свойства черепицы из техногенного сырья с пиритными огарками // *Стекло и керамика*. 2006. № 4. С. 26–28.

16. Лохова Н.А. Морозостойкие строительные керамические материалы и изделия на основе кремнеземистого сырья: монография. Братск: БрГУ, 2009. 268 с.

17. Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Теплова М.Ф. Исследование кинетики водопоглощения мелкозернистого бетона // *Технические науки «Молодой ученый»*. 2015. № 13. С.132–134.

18. Cultrone G., Sebastian E., Elert K., Torre M.J., Cazalla O., Rodriguez-Navarro C. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks // *Journal of the European Ceramic Society*. 2004. Vol. 24. № 3. Pp. 547–564. DOI: 10.1016/S0955-2219(03)00249-8

19. Медведев А., Разоренов А., Сержантов А. Кинетика влагонасыщения композиционных материалов // *Технология в электронной промышленности*. 2014. № 4. С. 11–16.

20. Raimondo M., Dondi M., Gardini D., Guarini G., Mazzanti F. Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks // *Construction and building materials*. 2009. Vol. 23. № 7. Pp. 2623–2630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.009

21. Романенко И.И., Еличев К.А. Факторы, влияющие на капиллярное водонасыщение бетонных образцов // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 10 (часть 2). С. 343–348.

22. Netinger I., Vravec M., Ranogajec J., Vucetic S. Evaluation of brick resistance to freeze / thaw cycles according to indirect procedures // *Gradevinar*. 2014. Vol. 66. № 3. Pp. 197–209. DOI: 10.14256/JCE.956.2013

23. Netinger Grubesa I., Vravec M., Ranogajec J., Vucetic S. Influence of pore-size distribution on the resistance of clay brick to freeze–thaw cycles // *Materials*. 2020. Vol. 13. 2364. DOI: 10.3390/ma13102364

24. Denis A. Testing and freeze-thaw durability prediction for clay bricks // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014. Vol. 3. № 7. Pp. 1270–1275. DOI: 10.17577/IJERTV3IS070791

25. Sereda P.J., Litvan G.G. Durability of Building Materials and Components // *American Society for Testing and Materials*. 1980. Vol. 8. P. 455–463.

26. Koroth S., Fazio P., Feldman D. Comparative Study of Durability Indices for Clay Bricks // *Journal of Architectural Engineering*. 1998. Vol. 4. № 1. Pp. 26–33. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0431(1998)4:1(26)

27. Пат. 2794714 Российская Федерация МПК G01N 17/100, G01N 25/02 Способ определения морозостойкости пористых материалов / Н.В. Шакурова, Е.А. Дороганов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022119139; заявл. 13.07.2022; опубл. 24.04.2023, Бюл. № 12. 12 с.



28. Пат. 2794714 Российская Федерация МПК G01 25/02 Способ определения морозостойкости пористых материалов / Н.В. Шакурова, Е.А. Дороганов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022125339; заявл. 27.09.2022; опубл. 25.05.2023, Бюл. № 15. 16 с.

рога, Е.А. Дороганов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022125339; заявл. 27.09.2022; опубл. 25.05.2023, Бюл. № 15. 16 с.

*Информация об авторах*

**Шакурова Наталия Васильевна**, ведущий инженер кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: shaknv1978@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дороганов Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: doroganov@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бессмертный Василий Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Ивлева Ирина Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: iviran1964@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

Поступила 25.09.2024 г.

© Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А., 2024

**\*Shakurova N.V., Doroganov E.A., Bessmertnyi V.S., Ivleva I.A.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: shaknv1978@mail.ru*

## QUANTITATIVE CRITERIA FOR ASSESSING FROST RESISTANCE BASED ON THE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF WALL CERAMICS

**Abstract.** Operational frost resistance is one of the main requirements for building materials. The main factors leading to deterioration of the properties of bricks are freeze-thaw cycles. The most reliable way to check building materials for frost resistance is to test products for freeze-thaw cycles. However, the standard method for determining frost resistance is time-consuming, energy-consuming, and requires the use of expensive and difficult-to-use equipment. The engineering industry is interested in reducing the amount of testing time required to assess frost resistance. Researchers have been working for a long time to create express methods for determining the frost resistance of bricks. The article proposes new quantitative criteria for assessing the frost resistance of wall ceramics based on the hydrodynamic parameters of a porous solid. The proposed methodologies for assessing frost resistance make it possible to take into account the textural properties of porous products. As a result of studying the kinetics of water saturation and water yield of ceramic shards, a pattern of the influence of the hysteresis loop area on the frost resistance of wall ceramics was established. Due to their interrelation, regression equations were obtained for the dependence of the hysteresis loop area on the coefficient of water saturation and water yield. Calculation expressions for frost resistance are proposed, where the frost resistance of brick is estimated by the value of the hysteresis loop area or the coefficient of water saturation and water yield.

**Key words:** quantitative criteria for assessing frost resistance, hydrodynamic parameters, water saturation curve, water yield curve, hysteresis loop area, water saturation and water yield coefficient, frost resistance

### REFERENCES

1. Gurov N.G., Naumov A.A., Ivanov N.N. Ways to increase the frost resistance of semi-dry pressed bricks [Puti povysheniya morozostojkosti kirpicha polusukhogo pressovaniya]. Building materials. 2012. No. 3. Pp. 40–42. (rus)
2. Shakurova N.V., Ivleva I.A., Doroganov E.A., Doroganov V.A., Yevtushenko E.I. Influence

of the mineralogical composition of clays on the capillary-porous structure and frost resistance of ceramic bricks. Glass and ceramics. 2023. Vol. 80. Pp. 137–142. DOI: 10.1007/s10717-023-00572-y

3. Ivleva I.A., Belikova M.E. Mineralogical composition of clays as one of the fundamental factors of frost resistance of heat-efficient ceramics [Mineralogicheskij sostava glin kak odin iz osnovo-

polagayushchikh faktorov morozostojkosti teploeffektivnoj keramiki]. Bulletin of BGTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 8. Pp. 185–188. (rus)

4. Raimondo M., Dondi M., Mazzanti F., Stefanizzi P. Equilibrium moisture content in clay bricks: the influence of a porous structure. Construction and the environment. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.10.017

5. Medvedev A., Razorenov A., Sergeants A. Kinetics of moisture saturation of composite materials [Kinetika vlonasyscheniya kompozitsionnykh materialov]. Technologies in electronic industry. 2014. No. 4. Pp. 11–16. (rus)

6. Startsev S.A., Stupak M.V., Chirkin A.S. Assessment of the effect of capillary suction on the moistening of brickwork [Ocenka stepeni vliyaniya kapillyarnogo podsosa na uvlazhnenie kirpichnoj kladki]. Innovations and investments. 2021. No. 4. Pp. 293–297. (rus)

7. Delgado H.M.P.K., Guimaraes A.S., Guimaraes V.P., Freitas V.P., Antepara I. Salt damage and increased humidity of building structures. Achievements in materials science and engineering. 2016. Vol. 2016. 1280894. DOI:10.1155/2016/1280894

8. Makarova I.A., Lokhova N.A. Physico-chemical methods of research of building materials. [Fiziko-himicheskie metody issledovaniya stroitelnykh materialov]. Guide. Bratsk: BrGU Publishing House. 2011. 139 p. (rus)

9. Berkman A.S., Melnikova I.G. Structure and frost resistance of wall materials. [Struktura i morozostojkost stenovykh materialov]. Leningrad, Moscow: Gosstroyizdat, 1962. 166 p. (rus)

10. Valdeon L., Esbert R.M., Grossi K.M. Hydrate properties of some Spanish building stones: petrophysical interpretation. Proceedings of the symposia of the Society of Materials Science. Society for Materials Science Research. 2011. Vol. 267. Pp. 911–916. DOI: 10.1557/PROC-267-911

11. Hammerson R.J., Hall K., Hoff W.D. The suction rate and sorption capacity of bricks // Proceedings and Journal of the British Ceramic Society. 1981. Vol. 80. No. 5. Pp. 150–152.

12. Raimondo M.M., Dondi F., Mazzanti F., Stefanizzi P. Equilibrium moisture content in clay bricks: the influence of porous structure. Construction and the environment. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932.

13. Naumov A.A., Yudin A.N. Increasing the frost resistance of ceramic shards made from clay raw materials of the Shakhty plant [Povyshenie morozostojkosti keramicheskogo cherepka iz glinistogo syrya Shahtinskogo zavoda]. Materials of the international scientific and practical conference. conf. Construction. Rostov-on-Don. 2012. Pp. 46–47. rus

14. Maage M. Frost resistance and pore size distribution in brick. Materials and structures. 1984. Vol. 17. Pp. 345–350.

15. Abdrakhimov A.V., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Technical properties of tiles made from technogenic raw materials with pyrite stubs [Tehnicheskie svoystva cherepicy iz tehnogenogo syrya s piritnymi ogarkami]. Glass and ceramics. 2006. No. 4. Pp. 26–28. (rus)

16. Lokhova N.A. Frost-resistant ceramic building materials and products based on silica raw materials: monograph. [Morozostojkie stroitelnye keramicheskie materialy i izdeliya na osnove kremnezemistogo syrya: monografiya]. Bratsk: BrGU. 2009, 268 p. (rus)

17. Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Eroshkina M.F., Teplova M.F. Investigation of the kinetics of water absorption of fine-grained concrete [Issledovanie kinetiki vodopoglosheniya melkozernistogo betona]. Technical sciences «Young scientist». 2015. No. 13. Pp. 132–134. (rus)

18. Caltrone G., Sebastian E., Elert K., Torre M.H., Casaglia O., Rodriguez-Navarro K. The influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. Journal of the European Ceramic Society. 2004. Vol. 24. No. 3. Pp. 547–564. DOI: 10.1016/S0955-2219(03)00249-8

19. Medvedev A., Razorenov A., Sergeants A. Kinetics of moisture saturation of composite materials [Kinetika vlonasyscheniya kompozitsionnykh materialov]. Technologies in electronic industry. 2014. No. 4. Pp. 11–16. (rus)

20. Raimondo M., Dondi M., Gardini D., Guarini G., Mazzanti F. Predicting the initial rate of water absorption of clay bricks. Construction and building materials. 2009. Vol. 23. No. 7. Pp. 2623–2630. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.009

21. Romanenko I.I., Elichev K.A. Factors influencing capillary water saturation of concrete samples [Fakторы vliyayushie na kapillyarnoe vodonasyschenie betonnykh obrazcov]. Fundamental research. 2016. No. 10 (part 2). Pp. 343–348. (rus)

22. Netinger I., Vrachevich M., Ranogaets Yu., Vuchetich S. Assessment of brick resistance to freezing/thawing cycles by indirect methods. Gradevinar. 2014. Vol. 66. No. 3. Pp. 197–209. DOI: 10.14256/JCE.956.2013

23. Netinger I., Grubesa, Vrachevich M., Ranogaets J., Vuchetich S. The effect of pore size distribution on the resistance of clay bricks to freeze-thaw cycles. Materials. 2020. Vol. 13. 2364. DOI: 10.3390/ma13102364

24. Denis A. Testing and forecasting the durability of clay bricks during freezing and thawing. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 2014. Vol. 3. No. 7. 1270–1275. DOI: 10.17577/IJERTV3IS070791

25. Sereda P.J., Litvan G.G. Durability of building materials and components. American Society for Testing and Materials. 1980. Vol. 8. Pp. 455–463.

26. Koroth S., Faze P., Feldman D. Comparative Study of Durability Indices for Clay Bricks. Journal of Architectural Engineering. 1998. Vol. 4. No.1. Pp. 26–33. DOI: 10.1061/(ICQ)1076-0431(1998)4:1(26)

27. Shakurova N.V., Doroganov E.A. Method for determining the frost resistance of porous materials Patent RF, no. 2022119139, 2023.

28. Shakurova N.V., Doroganov E.A. Method for determining the frost resistance of porous materials Patent RF, no. 2022125339, 2023.

*Information about the authors*

**Shakurova, Natalia V.** Leading Engineer of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: shaknv1978@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Doroganov, Evgeny A.** Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: doroganov@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Bessmertnyi, Vasily S.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Standardization and Quality Management. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

**Ivleva, Irina A.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: iviran1964@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

---

*Received 25.09.2024*

**Для цитирования:**

Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А. Количественные критерии оценки морозостойкости на основе анализа гидродинамических параметров стеновой керамики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 81–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-81-91

**For citation:**

Shakurova N.V., Doroganov E.A., Bessmertnyi V.S., Ivleva I.A. Quantitative criteria for assessing frost resistance based on the analysis of hydrodynamic parameters of wall ceramics. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 81–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-81-91