DOI 10.22337/2077-9038-2018-3-149-154

Исследование равновесной сорбционной влажности материалов ограждающих конструкций зданий при температуре –20 °С

И.Я.Киселёв, НИИСФ РААСН, Москва

Равновесная сорбционная влажность (далее: сорбционная влажность) наряду с теплопроводностью является важнейшим теплотехническим показателем строительных материалов, так как она в значительной мере определяет ход процессов тепло- и влагопереноса через наружные ограждающие конструкции зданий, а следовательно и теплотехнические свойства этих конструкций. Экспериментально (эксикаторным методом) определены изотермы сорбции паров воды для пенобетона, газобетона, керамзитобетона, керамзитоперлитобетона, шунгизитобетона и арболита при температурах -20, -10,4, +1,2, +20 и +35 °С. Анализ полученных результатов показал, что сорбционная влажность всех исследованных материалов увеличивается при уменьшении температуре от +35 °С до –10,4 °С. Однако при температуре –20 °С сорбционная влажность уменьшается и, более того, она становится меньше, чем сорбционная влажность этих материалов при температуре +20 °С. Причинами уменьшения сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С по сравнению со значениями этого показателя при температуре +20 °С являются:

– при относительной влажности воздуха $\varphi < 80\%$: резкое уменьшение подвижности молекул воды первого адсорбированного монослоя при некоторой температуре, принадлежащей температурному диапазону от –10,4 до –20 °С и, как следствие, резкое увеличение времени жизни молекулы воды в первом адсорбированном монослое;

– при относительной влажности воздуха $\varphi > 80\%$ возникает вторая причина уменьшения равновесной сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С, а именно – замерзание некоторой доли капиллярно-конденсированной воды и блокирование образовавшимся неподвижным льдом доступа паров воды в часть внутреннего порового объёма материала.

Ключевые слова: строительные материалы, равновесная сорбционная влажность, экспериментальные исследования, диапазон температуры, от +35 °С до –20 °С.

Study of the Equilibrium Sorption Humidity of the Materials of the Enclosing Constructions of Buildings at a Temperature –20 °C

I.Ya.Kiselev, NIISF RAASN, Moscow

Equilibrium sorption humidity (further: sorption humidity) together with the thermal conductivity is the most important thermo-technical property of building materials, since itlargely determines the course of the process of heat- and moisture transfer through the enclosing constructions of buildings and, consequently, also the thermo-technical properties of these constructions. The isotherms of the absorption of vapors of water for foam concrete, cellular concrete, expanded-clay lightweight concrete, expanded-clay-pearlite lightweight concrete, expanded-shungizitlightweight concrete and arbolit were experimentally (by exiccator method) determined at temperatures –20, –10,4, +1,2, +20 and +35 °C. The analysis of the obtained results showed that the sorption humidity of all investigated materials increases with the temperature decrease from +35 °C to –10,4 °C. However, at a temperature –20 °C sorption humidity decreases, and what is more, that, it becomesless than the sorption humidity of these materials at a temperature of +20 °C. The reasons for the decrease of the sorption humidity of building materials at a temperature –20 °C in comparison with the values of this property at a temperature of +20 °C appears:

– with the relative humidity of air $\varphi < 80\%$: the sharp decrease of the mobility of water molecules of the first adsorbed monolayer at a certain temperature, which belongs to temperature range from –10,4 to –20 °C, and, as a result, a sharp increase of thelifetime of a water molecule in the first adsorbed monolayer;

– with the relative humidity of air $\varphi > 80\%$ appears the second reason for the decrease of the equilibrium sorption humidity of building materials at a temperature –20 °C, namely, the freezing of some share of the capillary-condensed water and blocking by formed fixed ice the access of water vapor into the internal pore volume of material.

Keywords: building materials, equilibrium sorption humidity, experimental studies, temperature range, from +35 °C to –20 °C.

Равновесная сорбционная влажность наряду с теплопроводностью является важнейшим теплотехническим показателем строительных материалов, так как она в значительной мере определяет ход процессов тепло- и влагопереноса через ограждающие конструкции зданий, а следовательно, и теплотехнические свойства этих конструкций.

В таблицах 1–3 представлены значения равновесной сорбционной влажности (далее: сорбционная влажность) строительных материалов при температурах –20, –10,4, +1,2, +20 и +35 °С, полученные автором [1] экспериментально эксикаторным методом. Из сопоставления этих значений следует, что сорб-

ционная влажность каждого из исследован-ных материалов при температуре –20 °С при каждом исследованном значении относительной влажности воздуха меньше, чем сорбционная влажность этих материалов при температурах –10,4, +1,2 и +20 °С. Более того, сорбционная влажность всех исследованных материалов при температуре –20 °С и относительной влажности воздуха 80% меньше, чем сорбционная влажность этих материалов при температуре +35 °С и относительной влажности воздуха 80%. Из данных, приведённых в таблицах 1–3, следует, что сорбционная влажность исследованных материалов линейно увеличивается при понижении температуры от +35 °С вплоть до –10,4 °С. Однако из представленных данных также следует, что при температуре ниже –10,4 °С сорбционная влажность начинает уменьшаться при понижении температуры. Очевидно, что значение отрицательной температуры, при которой начинается это уменьшение, зависит от вида материала и относительной влажности воздуха. Логично предположить, что основной причиной уменьшения сорбционной влажности исследованных материалов при температуре –20 °С является переход части адсорбированной воды в твёрдое состояние. Но ни в теории моно- и полимолекулярной адсорбции Брунауэра-Эммета-Тейлора [БЭТ] [2], ни в теории капиллярной конденсации [3] не рассмотрена возможность перехода части адсорбированного вещества в твёрдое состояние в процессе сорбции. Поэтому не представляется возможным количественно объяснить ход изотерм сорбции паров воды исследованными строительными материалами при температуре –20 °С.

Сопоставление изотерм сорбции исследованных материалов, полученных экспериментально при температурах –20 и +20 °С, показывает, что при малых значениях относительной влажности воздуха (20–60%) равновесная сорбционная влажность каждого исследованного материала при температуре –20 °С незначительно меньше, чем равновесная сорбционная влажность этого материала при температуре +20 °С. Но начиная с некоторого значения относительной влажности воздуха (для каждого материала своё значение), изотерма, полученная при температуре –20 °С, начинает резко «отставать» от изотермы, полученной при температуре +20 °С. В работе [1] для каждого исследованного материала вычислены значения относительной влажности воздуха, при которых в этом материале начинается капиллярная конденсация при различных температурах. Результаты этих вычислений представлены в таблице 4. Проведённое для каждого исследованного материала сопоставление значения относительной влажности воздуха, при котором изотерма, соответствующая –20 °С, начинает резко «отставать» от изотермы, соответствующей +20 °С, со значением относительной влажности воздуха, при котором в этом материале начинается капиллярная конденсация, показывает, что это близкие значения.

Вышеизложенное даёт основание предположить, что причиной уменьшения сорбционной влажности исследованных материалов при температуре –20 °С является замерзание

Таблица 1. Сорбционная влажность строительных материалов при температуре –20 °С

Материал	Плотность γ_0, кг/м³	Сорбционная влажность w_P, %, при относительной влажности воздуха φ, %				
		6,1 (5,0)*	19 (16)*	48 (40)*	82 (68)*	98 (81)*
Керамзитоперлитобетон	850	1,0	–	2,4	2,8	6,3
Арболит	650	–	2,3	3,6	6,1	8,7
Шунгизитобетон	1100	0,6	–	1,2	1,8	2,5
Пенобетон	750	1,1	–	2,0	2,7	4,8
Керамзитобетон	1200	–	0,7	1,1	1,4	2,5
Газобетон	400	1,3	1,9	2,0	2,3	2,9
Газобетон	700	1,5	1,6	2,0	2,9	5,8
Фильтровальная бумага	–	–	5,6	6,7	8,4	13

*Примечание. В скобках указана относительная влажность воздуха в эксикаторе при температуре –20 °С над водой.

Таблица 2. Сорбционная влажность строительных материалов при температуре +20 °С

Материал	Плотность γ_0, кг/м³	Сорбционная влажность w_P, %, при относительной влажности воздуха φ, %					
		20	40	60	80	90	97
Керамзитоперлитобетон	850	1,7	2,3	3,4	5,3	7,0	9,5
Арболит	650	4,0	4,8	7,3	13,0	20,0	31,0
Шунгизитобетон	1100	1,2	1,6	2,3	3,2	3,9	5,3
Пенобетон	750	1,6	2,4	3,1	5,7	9,1	13,0
Керамзитобетон	1200	0,9	1,2	1,5	2,6	3,1	5,4
Газобетон	400	1,5	2,0	2,6	4,2	5,6	9,1
Газобетон	700	2,3	2,9	3,8	7,8	12,0	20,0
Фильтровальная бумага	–	3,5	5,0	6,8	11	14,0	19,0

Таблица 3. Сорбционная влажность строительных материалов при температурах –10,4, +1,2 и +35 °С

Температура, °С		–10,4		+1,2		+35	
Относительная влажность воздуха φ, %		40	80	40	80	40	80
Материал	Плотность γ_0, кг/м³	Сорбционная влажность w_P, %					
Керамзитоперлитобетон	850	2,5	7,5	2,4	6,8	2,2	4,6
Арболит	650	5,5	17,0	5,4	15,0	4,3	11,0
Шунгизитобетон	1100	1,8	3,8	1,7	3,6	1,5	3,0
Пенобетон	750	3,1	7,7	2,8	6,9	2,0	4,5
Керамзитобетон	1200	1,5	3,5	1,4	3,1	1,05	2,0
Газобетон	400	3,8	6,0	3,4	5,3	1,3	3,4
Газобетон	700	3,7	13,0	3,4	11,0	2,5	5,6
Фильтровальная бумага	–	7,5	15,0	6,8	12,0	3,7	9,1

Таблица 4. Зависимость относительной влажности воздуха φ'_0, при которой в порах исследованных материалов начинается капиллярная конденсация, от температуры

Материал	Плотность γ_0, кг/м³	Минимальный геометрический радиус пор, r_m, 10^{-10}м	Относительная влажность воздуха φ_0, Па/Па, при температуре				
			308,15 К (+35°С)	293,15 К (+20°С)	274,35 К (+1,2°С)	262,75 К (–10,4°С)	253,15 К (–20°С)
Керамзитоперлитобетон	850	39,5	0,70	0,68	0,65	0,63	0,61
Арболит	650	30,6	0,601	0,58	0,55	0,52	0,50
Шунгизитобетон	1100	61,5	0,81	0,80	0,78	0,77	0,75
Пенобетон	750	32,0	0,62	0,60	0,57	0,55	0,53
Керамзитобетон	1200	29,4	0,59	0,56	0,53	0,50	0,48
Газобетон	400	28,7	0,58	0,55	0,51	0,49	0,47
Газобетон	700	33,0	0,63	0,61	0,58	0,56	0,54
Фильтровальная бумага	—	51,2	0,77	0,76	0,73	0,72	0,70

части воды, конденсированной в порах материала в процессе капиллярной конденсации. Возможно, что образовавшийся неподвижный лёд блокирует доступ паров воды в часть внутреннего порового объёма материала и таким образом является причиной уменьшения сорбционной влажности материала при температуре –20 °С.

Это предположение качественно объясняет резкое «отставание» изотерм сорбции паров воды строительными материалами, полученных при температуре –20 °С, от изотерм сорбции паров воды теми же материалами, полученных при температуре +20 °С. Однако замерзание капиллярно-конденсированной влаги не может быть единственной причиной уменьшения сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С. Это предположение не объясняет, почему и при малых значениях относительной влажности воздуха сорбционная влажность материалов при температуре –20 °С меньше соответствующих значений этого показателя при температуре +20 °С.

Обобщая результаты работ П. Кубельки (P. Kubelka) [4], И. Хигути (I. Higuty) [5] и Г. Фагерлунда (G. Fagerlund) [6] по исследованию процесса замерзания жидкостей, сорбированных капиллярно-пористыми телами, запишем для воды, сорбированной строительными материалами:

$$r_{\min} = \frac{2\sigma_\infty M T_0}{\rho q \Delta T} + 19{,}7 \cdot 10^{-10} \left(\frac{1}{\Delta T}\right)^{\frac{1}{3}}, \qquad (1)$$

где $r_{\min}$ – минимальный радиус капилляра, в котором вода замерзает при температуре ($T_o - \Delta T$), м; σ_∞ – поверхностное натяжение воды при плоской поверхности воды, Н/м; M – молярная масса воды, кг/кмоль; $T_o = 273{,}15\ K$ – температура замерзания несорбированной воды; ρ – плотность воды, кг/м^3; ΔT – понижение температуры замерзания воды, K; q – удельная теплота плавления льда, Дж/кмоль.

Подставив в формулу (1) значения коэффициента поверхностного натяжения воды σ_∞ и удельной теплоты плавления q льда при температуре –20 °С, заимствованные из работы [7] и справочника [8], получим, что при температуре –20 °С вода, сорбированная строительными материалами, замерзает в порах, радиус которых равен или больше $72 \cdot 10^{-10}$ м.

С учётом зависимости поверхностного натяжения жидкости от температуры и радиуса капилляра, в котором эта жидкость находится, а также наличия межфазового слоя жидкость–газ уравнение капиллярной конденсации Кельвина принимает следующий вид:

$$r(\varphi, T) = \frac{2\sigma_\infty(T) M}{\rho R T(-\ln\varphi)} + 2\delta + \frac{c\varphi}{1 + (c-1)\varphi} N(\varphi, T) D, \qquad (2)$$

где r – геометрический радиус поры, в которой при относительной влажности воздуха φ и температуре T имеет место капиллярная конденсация, м; φ – относительная влажность воздуха, Па/Па; T – температура, K; $R = 8{,}314 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная; $\delta = 2{,}8 \cdot 10^{-10}$ м – толщина межфазового слоя вода – воздух, м [9]; c – константа уравнения БЭТ [2]; $D = 2{,}76 \cdot 10^{-10}$ м – диаметр молекулы воды [8]; $N(\varphi, T)$ – N-функция, равная

$$N(\varphi, T) = \left(\frac{a^*}{-\ln\varphi}\right)^{0{,}392}, \qquad (3)$$

где

$$a^* = \begin{cases} \dfrac{7{,}84 \cdot 10^6}{RT}\sqrt{\dfrac{\varphi}{0{,}1}} & \text{при } 0 < \varphi < 0{,}1 \\ \dfrac{7{,}84 \cdot 10^6}{RT} & \text{при } 0{,}1 \le \varphi \le 0{,}85 \\ \dfrac{7{,}84 \cdot 10^6}{RT}\sqrt{\dfrac{1-\varphi}{0{,}85}} & \text{при } 0{,}85 < \varphi < 1 \end{cases} \qquad (4)$$

Численно решив уравнение (2) для определения относительной влажности φ воздуха, получим, что при температуре –20 °С капиллярная конденсация водяных паров в порах строительных материалов, радиус которых равен $72 \cdot 10^{-10}$ м, происходит при относительной влажности воздуха $\varphi = 0{,}8$ (80%). Следовательно, предположение о том, что неподвижный лёд, образовавшийся при замерзании воды, блокирует доступ паров воды в часть внутреннего порового объёма материала:

– может качественно объяснить резкое «отставание» при $\varphi > 80\%$ изотерм сорбции, полученных при температуре –20 °С, от изотерм сорбции, полученных при температуре +20 °С;

– не может объяснить, почему при $\varphi < 80\%$ равновесная сорбционная влажность материалов при температуре –20 °С меньше соответствующих значений этого показателя при +20 °С.

Такое взаимное расположение изотерм сорбции паров воды строительными материалами при температурах –20 °С и +20 °С при $\varphi < 80\%$ нельзя объяснить тем, что при определении относительной влажности воздуха при температуре –20 °С необходимо парциальное давление паров воды делить на парциальное давление насыщенных паров воды не надо льдом, а над переохлаждённой водой. Во-первых, вода в жидком состоянии при температуре –20 °С может существовать только в лабораторных условиях. В реальных условиях эксплуатации наружных ограждающих конструкций при температуре –20 °С наружный воздух контактирует только со снегом или льдом, то есть с водой в твёрдом состоянии. Во-вторых, даже если относительную влажность воздуха при температуре –20 °С рассчитывать исходя из того, что он находится в контакте с переохлаждённой водой, то и в этом случае при относительной влажности воздуха $\varphi < 80\%$ равновесная сорбционная влажность исследованных материалов при температуре –20 °С будет меньше, чем значения этого показателя при температуре +20 °С. Этот вывод следует из сопоставления данных таблиц 1 и 2.

В таблице 5 приведены значения ёмкости первого монослоя w_m паров воды и константы с уравнения БЭТ для строительных материалов при температурах +20 °С и –20 °С, полученные автором [1].

Из данных таблицы 5 следует, что для исследованных строительных материалов ёмкость монослоя w_m при температуре –20 °С меньше, чем ёмкость монослоя w_m при температуре +20 °С, хотя в соответствии с зависимостью $w_m(T)$, полученной для диапазона температур от –10,4 до

+35 °С [1], она должна быть больше. Из зависимостей $w_m(T)$ для строительных материалов, представленных в работе [1], следует, что при уменьшении температуры от +35 до –10,4 °С ёмкость монослоя линейно увеличивается, а в соответствии с результатами обработки изотерм сорбции, полученных при температуре –20 °С, ёмкость монослоя резко уменьшается. Таким образом, в диапазоне температуры от –10,4 до –20 °С имеет место резкое изменение самого характера зависимости $w_m(T)$, так как в диапазоне температуры от –10,4 до –20 °С ёмкость начинает резко убывать с уменьшением температуры.

Из данных таблицы 5 также следует, что для исследованных строительных материалов при температуре –20 °С значения константы с уравнения БЭТ больше, чем её значение при температуре +20 °С. Более того, значения константы с при температуре –20 °С, определённые по изотерме сорбции, больше значений этого показателя при температуре –20 °С, вычисленных по зависимости $c(T)$ [1], полученной для диапазона температуры от –10,4 до +35 °С. Следовательно, при уменьшении температуры от –10,4 до –20 °С значение константы с продолжает увеличиваться, более того, скорость её увеличения возрастает.

Из вышеизложенного следует, что при уменьшении температуры от –10,4 до –20°С имеет место резкое изменение хода процесса адсорбции паров воды строительными материалами. Так как в этом температурном диапазоне не происходит каких-либо резких изменений в характере движения молекул воды в газообразном состоянии, то можно предположить, что при некоторой температуре, принадлежащей к температурному диапазону от –10,4 до –20°С, имеет место резкое изменение характера движения адсорбированных молекул воды. В монографии [3] показано, что:

$$c \sim \frac{\tau_1}{\tau_2}, \qquad (5)$$

где τ_1 – время жизни молекулы воды в первом адсорбированном монослое, с; τ_2 – время жизни молекулы воды в последующих монослоях, с.

В свою очередь, [3]:

$$t_1 \sim 1/n_1, \qquad (6)$$

где n_1 – частота колебаний молекул воды в первом адсорбированном монослое, $с^{-1}$.

Следовательно, резкое увеличение значения константы с при некоторой температуре, принадлежащей к температурному диапазону от –10,4 до –20 °С, может быть объяснено резким уменьшением частоты колебаний n_1 молекулы воды в первом адсорбированном монослое и, как следствие, увеличением времени t_1 жизни молекулы воды в первом адсорбированном монослое, то есть резким изменением характера движения адсорбированных молекул воды. Не представляется возможным назвать это изменение характера движения молекул воды первого адсорбированного монослоя «замерзанием», хотя в процессе кристаллизации упорядочивается движение молекул жидкости и увеличивается время их «осёдлого» существования [9; 10]. Поэтому в качестве возможной причины уменьшения равновесной сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С и относительной влажности воздуха φ < 80%, назовём не замерзание воды, образующей первый монослой на поверхности пор материала, а резкое уменьшение подвижности молекул воды первого монослоя при некоторой температуре, принадлежащей к температурному диапазону от –10,4 до –20 °С, и, как следствие, резкое увеличение времени жизни t_1 молекул воды в первом монослое.

Далее для исследованных строительных материалов по методике, разработанной автором [1], по изотермам сорбции, полученным экспериментально при температуре –20 °С, были определены зависимости интегральной пористости V(r) и удельной поверхности S(r) этих материалов от радиуса пор r. Учитывая ранее высказанное предположение о том, что при температуре –20 °С определённая доля капиллярно-конденсированной воды замерзает и блокирует доступ паров воды в часть порового объёма материала, некорректно использовать эти зависимости V (r) и S(r) для получения информации о поровой структуре исследованных материалов. Однако эти зависимости – V(r) и S(r) – могут быть использованы для анализа причин уменьшения равновесной сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С. Было проведено сопоставление зависимостей интегральной пористости V(r) и удельной поверхности S(r) исследованных строительных материалов, полученных по результатам обработки изотерм сорбции, измеренных при температурах +20 и –20 °С. Из сопоставления следует, что для всех исследованных материалов максимальные значения интегральной пористости и удельной поверхности (значения, соответствующие окончанию капиллярной конденсации), которые получены путём обработки изотерм при температуре –20 °С, меньше, чем соответствующие значения этих показателей, которые получены путём обработки изотерм при температуре +20 °С.

Эти различия можно считать подтверждением предположения о том, что при относительной влажности воздуха φ > 80% возникает вторая причина уменьшения равновесной

Таблица 5. Сопоставление значений ёмкости монослоя w_m и константы с уравнения БЭТ для исследованных материалов при температурах +20 и –20°С

Материал	Плотность ρ, кг/м³	Ёмкость монослоя w_m, кг/кг, при температуре		Константа c, при температуре	
		293,15 К (+20°С)	253,15 К (–20°С)	293,15 К (+20°С)	253,15 К (–20°С)
Керамзитоперлитобетон	850	0,0166	0,0131	13,6	33,9
Арболит	650	0,0361	0,0200	22,3	217,0
Шунгизитобетон	1100	0,0112	0,00635	17,0	79,3
Пенобетон	750	0,0160	0,0106	13,0	208,0
Керамзитобетон	1200	0,0075	0,00614	47,5	–
Газобетон	400	0,0136	0,0118	19,6	575,0
Газобетон	700	0,0184	0,0123	75,0	189,0
Фильтровальная бумага	–	0,0343	0,0416	13,7	16,2

сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20°С, а именно – замерзание некоторой доли капиллярно-конденсированной воды.

Показано, что причинами уменьшения сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С по сравнению со значениями сорбционной влажности при температуре +20 °С являются:

– при относительной влажности воздуха $\varphi < 80\%$: резкое уменьшение подвижности молекул воды первого адсорбированного монослоя при некоторой температуре, принадлежащей температурному диапазону от –10,4 до –20 °С, и, как следствие, резкое увеличение времени жизни молекулы воды в первом адсорбированном монослое;

– при относительной влажности воздуха $\varphi > 80\%$ возникает вторая причина уменьшения равновесной сорбционной влажности строительных материалов при температуре –20 °С, а именно – замерзание некоторой доли капиллярно-конденсированной воды и блокирование образовавшимся неподвижным льдом доступа паров воды в часть внутреннего порового объёма материала.

Литература

1. *Киселёв, И.Я.* Экспериментальное исследование зависимости равновесной сорбционной влажности строительных материалов от температур / И.Я. Киселёв //Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 492–495.

2. *Брунауэр, С.* Адсорбция паров и газов. Т. 1. Физическая адсорбция / С. Брунауэр. – М., 1948. – 482 с.

3. *Грег, С.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, Л. Синг. – М., 1984. – 527 с.

4. *Kubelka, P.* Uber den Schmelxpunkt in Sehr engen Capillaren / P. Kubelka // Z. Electrochem. Angewendte Phys. Chem. – 1932. – Bd. 38. – № 8a. – S. 611–614.

5. *Higuti, I.* Calorimetric evidence for the capillary condensation theory / I. Higuti, Y. Iwagami // J. Phys. Chem. – 1952. – Vol. 56. – № 7. – P. 921–926.

6. *Fagerlund, G.* Determination of pore-size distribution from freezing-point depression / G. Fagerlund // Materiaux et constructions. – 1973. – Vol. 6. – № 33. – P. 191–201.

7. *Hacker, P.T.* Experimental values of surface tension of super-cooled water / P.T. Hacker // Chem. Astr. – 1952. – Vol. 46. – № 6. – P. 2363.

8. Физические величины. Справочник. – М., 1991. – 1232 с.

9. *Бакаев, В.А.* Понижение температуры плавления льда в капиллярах пористого тела / В.А. Бакаев, В.Ф. Киселёв, К.Г. Красильников // Докл. АН СССР – 1959. – Т. 125 – №4. – С. 31–834.

10. *Бейм, И.Г.* О состоянии сорбата в мезопорах при температурах ниже тройной точки / И.Г. Бейм, Т.М. Буркаш, Д.П. Добычин // Докл. АН СССР – 1974. – Т. 215. – № 1. – С. 116–119.

11. *Алумяэ, А.Э.* Методика экспериментально-расчётного определения изотерм сорбции местных ячеистых бетонов / А.Э. Алумяэ // Труды НИИ строительства ЭССР. Исследования по строительству. – Таллин, 1970. – Вып. 11. – С. 161–167.

12. *Брунауэр, С.* Гидратация трёхкальциевого и р-двухкальциевого силиката при комнатной температуре / С. Брунауэр, С.А. Гринберг // В кн. IV международный конгресс по химии цемента. – М., 1964. – С. 21–32.

13. *Гагарин, В.Г.* О модификации t-метода для определения удельной поверхности макро- и мезопористых адсорбентов / В.Г. Гагарин // Журн. физ. химии. – 1985. – Т. 59 – № 5 – С. 1838, 1839.

14. *Дубинин, М.М.* К вопросу об уравнении характеристической кривой для активированных углей / М.М. Дубинин, Л.В. Радушкевич // Докл. АН СССР. – 1947. – Т. 55. – № 4. – С. 331–334.

15. *Дубинин, М.М.* Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел / М.М. Дубинин. – М., 1958. – 147 с.

16. *Горохов, М.М.* Методы исследования поровой структуры капиллярно-пористых тел / М.М. Горохов, В.И. Латнев, Н.В. Чураев // Тепло- и массоперенос. Вып. 6. Часть 1. – Киев, 1968. – С. 43–48.

17. *Полозова, Л.Г.* Сорбционное увлажнение некоторых местных неорганических строительных материалов / Л.Г. Полозова // Известия АН ЭССР. – 1956. –Т. V. – № 4. – С. 255–265.

18. *Скоблинская, Н.Н.* Модифицированный метод измерения изотерм сорбции-десорбции воды / Н.Н. Скоблинская – М.: ПЭМ ВНИИС Госстроя СССР, 1983.

19. *Франчук, А.У.* Методика определения влажностных характеристик строительных материалов / А.У. Франчук, К.Ф. Фокин. – Киев, 1970. – 47 с.

20. *Чуприна, А.И.* Динамический метод определения равновесной влажности материалов / А.И. Чуприна // Исследования по сушильным и термическим процессам. – Минск, 1968. – С. 17–22.

Literatura

1. *Kiselev I.Ya.* Eksperimental'noe issledovanie zavisimosti ravnovesnoj sorbtsionnoj vlazhnosti stroitel'nyh materialov ot temperatur / I.Ya. Kiselev //Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2009. – № 5. – S. 492–495.

2. *Brunauer S.* Adsorbtsiya parov i gazov. T. 1. Fizicheskaya adsorbtsiya / S. Brunauer. – M., 1948. – 482 s.

3. *Greg S.* Adsorbtsiya, udel'naya poverhnost', poristost' / S. Greg, L. Sing. – M., 1984. – 527 s.

8. Fizicheskie velichiny. Spravochnik. – M., 1991. – 1232 s.

9. *Bakaev V.A.* Ponizhenie temperatury plavleniya l'da v kapillyarah poristogo tela / V.A. Bakaev, V.F. Kiselev, K.G. Krasil'nikov // Dokl. AN SSSR – 1959. – T. 125 – №4. – S. 31–834.

10. *Bejm I.G.* O sostoyanii sorbata v mezoporah pri temperaturah nizhe trojnoj tochki / I.G. Bejm, T.M. Burkash, D.P. Dobychin // Dokl. AN SSSR – 1974. – T. 215. – № 1. – S. 116 –119.

11. *Alumyae A.E.* Metodika eksperimental'noraschetnogo opredeleniya izoterm sorbtsii mestnyh yacheistyh betonov /

A.E. Alumyae // Trudy NII stroitel'stva ESSR. Issledovaniya po stroitel'stvu. – Tallin, 1970. – Vyp. 11. – S. 161 –167.

12. *Brunauer S.* Gidratatsiya trehkal'tsievogo i p-dvuhkal'tsievogo silikata pri komnatnoj temperature / S. Brunauer, S.A. Grinberg // V kn. IV mezhdunarodnyj kongress po himii tsementa. – M., 1964. – S. 21 –32

13. *Gagarin V.G.* O modifikatsii t-metoda dlya opredeleniya udel'noj poverhnosti makro – i mezoporistyh adsorbentov / V.G. Gagarin // Zhurn. fiz. himii. – 1985. – T. 59 – № 5 – S. 1838, 1839.

14. *Dubinin M.M. K* voprosu ob uravnenii harakteristicheskoj krivoj dlya aktivirovannyh uglej / M.M. Dubinin, L.V. Radushkevich // Dokl. AN SSSR. – 1947. – T. 55. – № 4. – S. 331 –334.

15. *Dubinin M.M.* Metody issledovaniya struktury vysokodispersnyh i poristyh tel / M.M. Dubinin. – M., 1958. – 147 s.

16. *Gorohov M.M.* Metody issledovaniya porovoj struktury kapillyarno-poristyh tel / M.M. Gorohov, V.I. Latnev, N.V. Churaev // Teplo- i massoperenos. Vyp. 6. Chast' 1. – Kiev, 1968. – S. 43–48.

17. *Polozova L.G.* Sorbtsionnoe uvlazhnenie nekotoryh mestnyh neorganicheskih stroitel'nyh materialov / L.G. Polozova // Izvestiya AN ESSR. – 1956. – T. V. – № 4. – S. 255–265.

18. *Skoblinskaya N.N.* Modifitsirovannyj metod izmereniya izoterm sorbtsii –desorbtsii vody / N.N. Skoblinskaya – M.: PEM VNIIS Gosstroya SSSR, 1983.

19. *Franchuk A.U.* Metodika opredeleniya vlazhnostnyh harakteristik stroitel'nyh materialov / A.U. Franchuk, K.F. Fokin. – Kiev, 1970. – 47 s.

20. *Chuprina A.I.* Dinamicheskij metod opredeleniya ravnovesnoj vlazhnosti materialov / A.I. Chuprina // Issledovaniya po sushil'nym i termicheskim protsessam. – Minsk, 1968. – S. 17–22.

Киселёв Игорь Яковлевич, 1940 г.р. (Москва). Доктор технических наук, старший научный сотрудник, почётный член РААСН. Учёный секретарь ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (127238, Локомотивный, проезд, д. 21. НИИСФ РААСН). Сфера научных интересов: строительная теплофизика и материаловедение. Автор более 120 научных публикаций. Тел.: 8 (495) 482-39-76, факс: 8 (495) 482-40-60. E-mail: ikiselyov@bk.ru.

Kiselev Igor Yakovlevich, born in 1940. (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Honorary Member of RAACS. Academic Secretary of Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences" (21 Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia). Sphere of scientific interests: building thermophysics and materials science. The author of more than 120 scientific publications. Tel.: +7 (495) 482-39-76, fax: 8 (495) 482-40-60. E-mail: ikiselyov@bk.ru.