

УДК 536.2.022, 697.137.2

Куприянов В.Н. – доктор технических наук, профессор

E-mail: Kuprivan@kgasu.ru

Юзмухаметов А.М. – аспирант

E-mail: Aynur.Yuzmuhametov@mail.ru

Сафин И.Ш. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: zavlab17@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Влияние влаги на теплопроводность стеновых материалов. Состояние вопроса

Аннотация

Постановка задачи. В ограждающих конструкциях зданий вследствие изменения влажности материалов в течение года заметно изменяются теплофизические характеристики строительных материалов. Изменение величины коэффициента теплопроводности в большой степени зависит от влажности материала.

Результаты. Исследованием влияния различных эксплуатационных факторов на коэффициент теплопроводности занимались многие ученые. В известных работах определяли влияние структуры материалов, их пористости, размеров пор, температуры, влажности, льдистости и других факторов. Однако многие аспекты этой проблемы остаются неизученными. Так, при исследовании влияния влажности материалов на их теплофизические свойства изучают, как правило, влияние высоких значений влажности материалов (объемной или массовой) на коэффициент их теплопроводности. При этом весьма ограничена информация о влиянии низких значений влажности материалов, связанных с сорбцией влаги из влажного воздуха и процессами диффузии водяного пара через ограждающие конструкции.

Выводы. Установлено, что с ростом влажности материалов растет коэффициент их теплопроводности, однако степень изменения теплопроводности материалов различна на различных диапазонах влажности. Коэффициент теплопроводности строительных материалов исследуется без учета состояния влаги в пористой структуре материала, а именно сорбционной, пленочной, капиллярной и т.д.

Исследование зависимости коэффициента теплопроводности от вида связи влаги с материалом является актуальной задачей, что позволит определять теплотехнические характеристики ограждающих конструкций в зависимости от вида эксплуатационной влаги в широком интервале её изменения в ограждающих конструкциях.

Ключевые слова: теплопроводность, температура, сорбция, десорбция, влажность, капилляры, пористость.

В действующем СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» при оценке теплотехнических характеристик многослойных конструкций стен зданий влажность учитывается только для двух условий эксплуатации – А или Б. Коэффициент теплопроводности материалов при других условиях эксплуатации остается неизученным. Влажностное состояние ограждающих конструкций находится в очень широких пределах, по исследованиям [1] конструкции переувлажнены, а в работах [2, 3] показано, что относительная влажность воздуха в материалах при эксплуатации зданий изменяется, как правило, в диапазоне 20-85 %. В этом диапазоне относительной влажности воздуха и будет формироваться сорбционное увлажнение материальных слоев ограждающих конструкций и их коэффициент теплопроводности.

Поэтому, исследования направленные на совершенствование методики теплотехнического расчёта ограждающих конструкций с учетом фактической влажности материалов и фактических значений их теплопроводности, являются актуальными и имеют практическую значимость.

В.Н. Богословский определил коэффициент теплопроводности (λ) строительных материалов как собирательный эквивалентный коэффициент, учитывающий структурные параметры и все физические процессы, происходящие в материале.

В работах Ф.В. Ушкова, В.Н. Богословского детально освещён физический механизм влияния изменения температурно-влажностного и воздушного режимов эксплуатации стен на теплопроводность материальных слоев. Одним из первых отечественных ученых, изучавших теплопроводность строительных материалов, является Н.Н. Георгиевский. Он установил зависимость коэффициента теплопроводности от одного из наиболее важных физических свойств материалов – степени пористости.

И. Каммерер, Б.П. Кауфман, К.Ф. Фокин изучали влияние структурных характеристик материалов (объемный вес, пористость, характер, форму и размеры пор и т.д.) и основных физических факторов (влажность, температура) на коэффициент теплопроводности строительных материалов. И. Каммерер выявил на примере двух материалов (обожженный изоляционный кирпич со сравнительно грубой пористостью и мелкопористая теплоизоляционная масса), что на величину коэффициента теплопроводности значительное влияние оказывает размер пор, и с увеличением (повышением) пористости материала разница между значениями коэффициентов теплопроводности от соответствующих размеров пор только увеличивается. Так, например, при пористости материалов 70 % разница между величинами коэффициентов теплопроводности двух различных материалов составляет 4 %, а при пористости 95 % эта величина выросла до 45 %. К.Ф. Фокин также отмечает, что при размере пор 0,1 мм $\lambda=0,024$ Вт/(м·°С), а при размере пор 2 мм $\lambda=0,031$ Вт/(м·°С).

Исследованием перемещения парообразной и жидкой влаги в пористых средах занимались В. Каммерер, А.П. Порхаев, А.У. Франчук, В.Г. Гагарин, В.Н. Богословский, К.Ф. Фокин, В.Н. Куприянов [4], К. Шпайдель, Е. Шильд. В. Каммерер предложил физико-математическую модель процесса капиллярного всасывания. А.П. Порхаев вывел уравнение движения жидкости в капилляре. Из которого следует, что, чем меньше радиус капилляров, тем больше высота поднятия воды, и тем меньше скорость поднятия воды. Установил, что плотные материалы (конструкционный бетон, кирпич клинкерный) в виду отсутствия сообщающихся капилляров и крупных пор обладают малыми характеристиками капиллярного всасывания. С другой стороны, эффективные теплоизоляционные материалы тоже плохо всасывают воду по причине отсутствия микрокапилляров (минеральная вата), гидрофобности материалов (пенополиуретан), наличия закрытых пор (ПСБ-С) (Гагарин В.Г. Совершенствование методик определения влажностных характеристик строительных материалов и метода расчета влажностного режима ограждающих конструкций : дис. ... канд. тех. наук. М., 1984. 219 с.).

В работах К.Ф. Фокина, Р.Е. Брилинга, А.У. Франчука, Ф.В. Ушкова, В.Н. Богословского, В.М. Ильинского, А.В. Лыкова, В.Г. Гагарина были разработаны методы расчета влажностного состояния ограждений, учитывающие закономерности переноса парообразной и жидкой влаги. На практике широко применяется графоаналитический метод расчета увлажнения ограждающих конструкций, разработанный К.Ф. Фокиным в 30-х годах XX столетия. Метод заключается в построении линий распределения температур, действительных и максимальных упругостей водяного пара по толщине ограждения. Этот метод позволяет определить расположение плоскости конденсации и количество конденсированной влаги. Однако, этот метод не учитывает влияния температурного поля на перераспределение сорбционной влаги в материале. Как показано на примере лабораторного исследования покрытия промышленного здания, состоящего из металлического листового настила, 2-х слоев торфоплит толщиной по 32 мм, пергамина и 3-х слоев рубероида на мастике. Торфоплиты имели по всей толщине постоянную влажность ≈ 90 % и температуру 18 °С. В течение 45 суток конструкция находилась в климатической камере, где с одной стороны поддерживалось температура воздуха + 14 °С, а с другой – 9 °С. В результате воздействия температуры нарушилась первоначальная равномерно-распределенная влажность. В зоне отрицательных температур влажность материала увеличилась до 230 %, а в зоне положительных температур – уменьшилась до 10 %. (Франчук А.У. Вопросы теории и расчета влажности ограждающих частей зданий. М. : Изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1957. 188 с.). Исследуя однослойную стену из легкого бетона, К.Ф. Фокин отмечает, что в материале ограждения происходит неравномерное перераспределение влаги вследствие изменения относительной влажности воздуха в порах материала (рис. 1а). Следовательно,

даже при отсутствии конденсации влаги в зимнее время влажность материалов ограждения в результате сорбции ими водяного пара будет повышаться. Поскольку влажность материала по толщине ограждения различна, то и коэффициент теплопроводности по толщине ограждения различен (рис. 1б). По толщине ограждения влага может быть одновременно в различных состояниях (пленочная, капиллярная, объемная и т.д.). Поэтому существует некоторая неопределенность относительно влажностных режимов материальных слоев конструкции, и, как следствие, неопределенность фактических значений коэффициента теплопроводности.

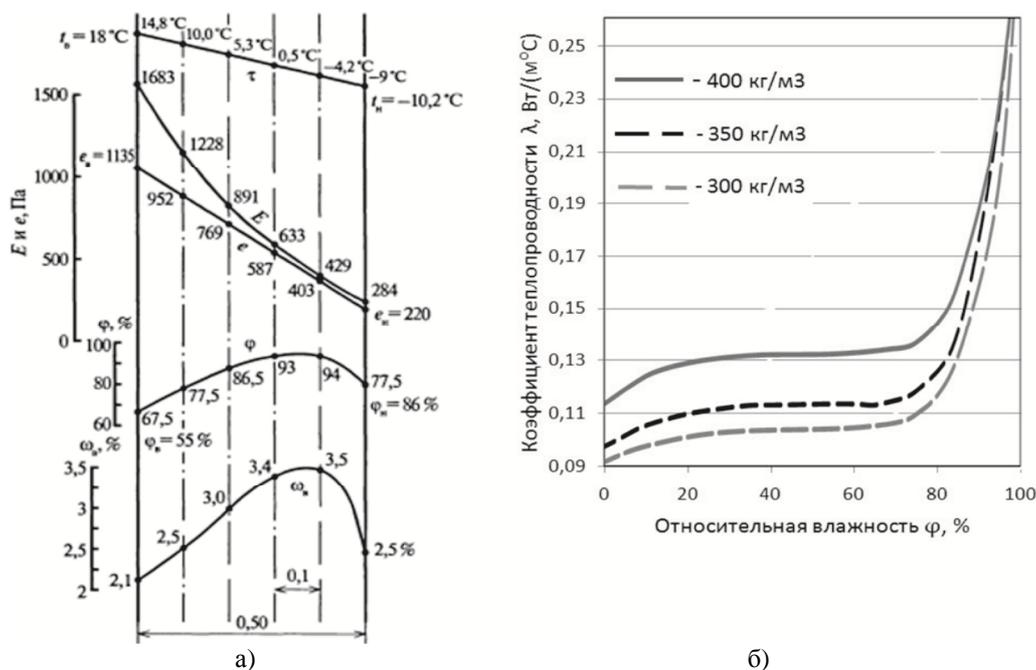


Рис. 1. Схема стационарного влажностного режима сплошной легкогобетонной стены в зимний период по К. Ф. Фокину (а) и график зависимости теплопроводности ячеистого бетона с различной плотностью по R. Drochytka [6] (б)

По мере развития ЭВМ стало возможным использование нестационарных методов расчета в прогнозировании влажностного состояния ограждающих конструкций. Из современных ученых, выделяющихся в этом направлении можно отнести А.Г. Перехоженцева [5], И.Я. Киселева, В.Г. Гагарина, В.В. Козлова, П.П. Пастушкова. Численные исследования позволяют просчитать:

- время выхода конструкции в равновесное состояние с окружающей средой, тем самым спрогнозировать значение эксплуатационной влажности материалов;
- влияние различных факторов;
- распределение влажности по толщине конструкции в любой момент времени.

Как было отмечено ранее, в отечественных нормах по теплозащите зданий расчетные значения теплопроводности определяется для двух режимов эксплуатации А и Б, при этом фактический температурно-влажностный режим эксплуатации конструкций не учитывается. В мировой практике расчет и прогнозирование температурно-влажностного режима выполняется на базе нескольких стандартов (ISO 6949, ISO 10456, ISO 13788, ISO 8301, ISO 8302, ISO 8990). В отличие от отечественного СП в стандарте ISO 6949 введены поправочные коэффициенты, определяемые по ISO 10456, которые позволяют производить преобразование теплотехнических характеристик, определенных при одних условиях (λ_1, R_1) в значения, действительные для других условий (λ_2, R_2). Поправочные коэффициенты учитывают влияние температуры, влажности и влияние старения строительного материала, т.е. учитывают условия максимально приближенные к реальной эксплуатации ограждающих конструкций. Это является определенным преимуществом зарубежных норм перед отечественными.

В настоящее время отсутствует нормативный документ по методу определения зависимости коэффициента теплопроводности от влажности строительных материалов. Не представляется так же возможным установить общую математическую зависимость для всех строительных материалов, т.к. значительное влияние оказывают такие факторы, как химико-минералогический состав, структура, пористость, форма и расположение пор и т.д. Поэтому исследования сводятся к выявлению эмпирических зависимостей теплопроводности материалов (λ) от их влажности (W) – $\lambda(W)$ для отдельных материалов. Эмпирические зависимости $\lambda(W)$ в разные годы были определены такими учеными как Е. Шильд, И. Я. Гнип, С.А. Веялис, А.У. Франчук, Т.И. Рубашкина, R. Drochytka [6], Н.В. Давыденко [7], Z. Suchorab [8]. В качестве примера в табл. приведены зависимости $\lambda(W)$ для некоторых материалов.

Таблица

**Эмпирические зависимости коэффициента теплопроводности
от влажности строительных материалов**

Расчетная формула	Характеристики материалов
$\lambda_w = I \left(1 + \frac{W_m \cdot k}{100}\right)$ (1)	Утеплители органического происхождения
$\lambda_w = I \left(1 + \frac{W_{об} \cdot k}{100}\right)$ (2)	Материалы неорганического происхождения
$\lambda_w = \lambda \cdot (1 + kW)$ (3) $\Delta\lambda_w = a \cdot W^k$ (4)	Органические утеплители ячеистого строения
$\lambda_w = \lambda \cdot e^{k \cdot W}$ (5)	Органические материалы волокнистого строения (рыхлые)
$\lambda_w = I + k \cdot W_{об}$ (6) $\lambda_w = k \cdot \frac{W}{100} + a$ (7)	Неорганические материалы ячеистого строения

Примечание: λ , λ_w – коэф. теплопроводности сухого и влажного материала соответственно, Вт/(м·°С); $\Delta\lambda_w$ – поправочный коэф. теплопроводности, Вт/(м·°С); W_m , $W_{об}$ – влажность материала по массе и по объему соответственно, %; e – основание натуральных логарифмов; k , a – эмпирические коэффициенты.

На рис. 2 и 3 показаны экспериментальные зависимости теплопроводности от влажности для различных материалов, полученные как отечественными, так и зарубежными авторами. Из рисунков видно, что зависимости $\lambda(W)$ имеют, как линейную, так и нелинейную форму.

Нелинейная форма зависимости проявляется при малых значениях влажности (рис. 2б) и после увеличения влажности до некоторого значения на рис. 3а $\approx 15\%$, а на рис. 3б $\approx 8\%$.

По рис. 2в видно, что графики зависимости $\lambda(W)$ для газобетона различной плотности расположены практически параллельно, в отличие от графиков, изображенных на рис. 2г. Прирост теплопроводности от влажности больше проявляется для газобетона меньшей плотности. Для объяснений этого необходимо рассмотреть микро- и макроструктуру материала. Для газобетона характерно равномерно распределенные по всему объему сферические поры, замкнутые, не сообщающиеся друг с другом. Средний размер пор (ячеек) \varnothing 1-3 мм. Вместе с этим пористость отмечается и в стенках пор. В зависимости от плотности газобетона сочетание объема пор (ячеек) и объема пор в стенках ячеек изменяется, в соответствии, с чем и изменяется степень влияния влажности материалов на их теплопроводность.

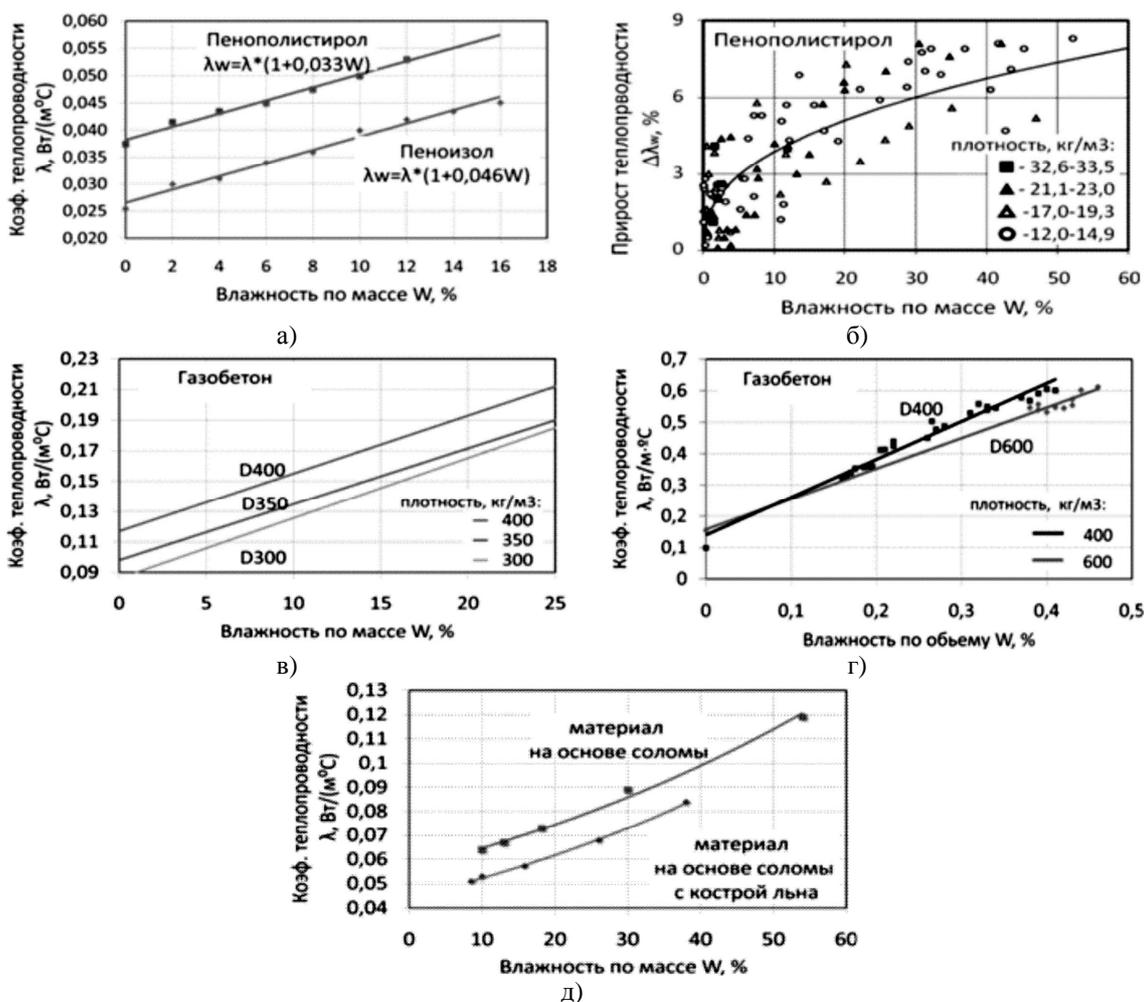


Рис. 2. Зависимость теплопроводности от влажности для различных материалов: по Т.И. Рубашкиной (а), по И.Я. Гнипу (б), по Drochytka [6] (в), по Z. Suchorab [8] (г), по Н.В. Давыденко [7] (д)

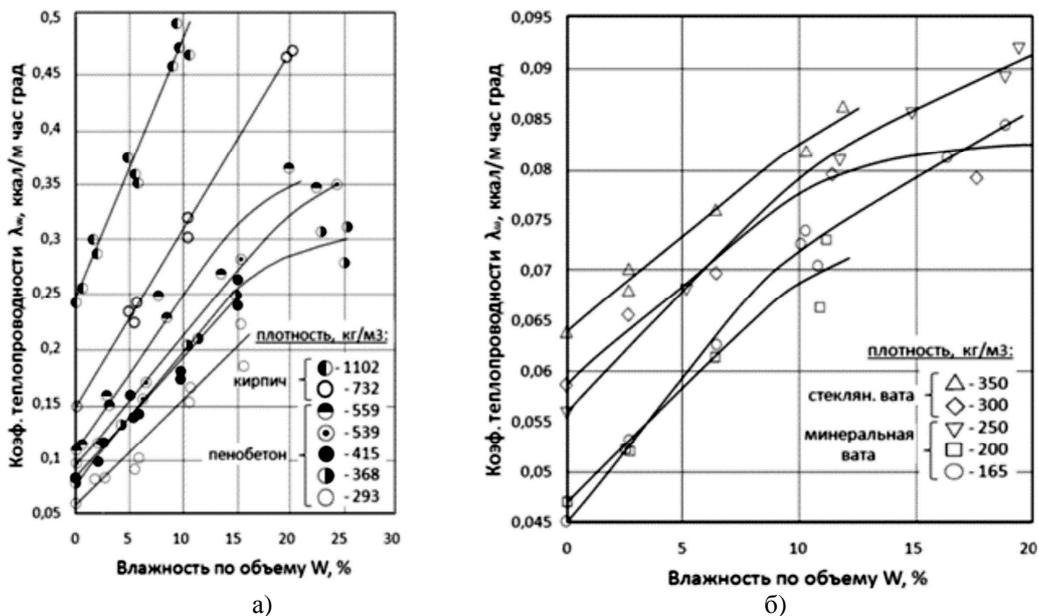


Рис. 3. Влияние влажности материалов ячеистого (а) и волокнистого (б) строения на их теплопроводность

Таким образом, за счет большего количества пор в стенках ячеек материала с большей плотностью, изменение λ от влияния влаги сказывается в меньшей степени. К тому же поры в стенках ячеек на порядок меньшего размеров самих ячеек, что так же оказывает влияние на значение коэффициента теплопроводности.

В работах Б.П. Кауфмана, Т.И. Рубашкиной, И.Я. Гнипа, С.А. Веялиса, R. Drochytka [6], Н.В. Давыденко [7], Z. Suchorab [8] проведены исследования по определению $\lambda(W)$ в широком интервале изменения влагосодержания материалов. Однако в этих работах отсутствует определение границы сорбционного, капиллярного и сверхсорбционного увлажнения. Известно, что при повышении относительной влажности воздуха влага адсорбируется на внутренней поверхности пор и капилляров, образуются так называемые мономолекулярные и полимолекулярные слои влаги, которые постепенно переходят в пленку объемной воды, удерживаемые капиллярными силами и силами смачивания. Эти процессы хорошо были описаны Б. В. Дерягиным, Н. В. Чураевым, В.М. Ильинским и другими.

Таким образом, в известных работах основные зависимости $\lambda(W)$ получены при больших уровнях увлажнения и очень мало работ по исследованию изменения теплопроводности материалов при отдельных видах увлажнения, а именно сорбционного и капиллярного увлажнений.

Z. Suchorab [8] исследуя материал при сверхсорбционном увлажнении, получил зависимость коэффициента теплопроводности от влажности при десорбции материала. Автор также не вскрыл механизм изменения λ при различных состояниях влаги (свободной, объемной, капиллярной, пленочной, парообразной).

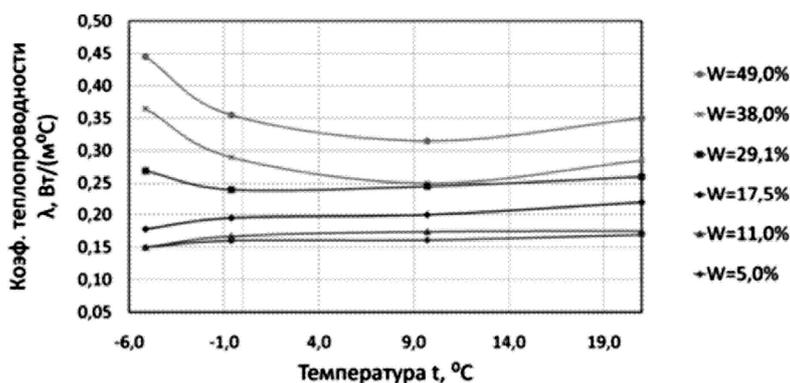


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$) от температуры и влажности по массе (W_M)

В работе [9] авторы проводят исследования ячеистого бетона плотностью 400 кг/м^3 и 500 кг/м^3 на 6 образцах имеющих различные влажности по массе. На рис. 4 приведены графики этих зависимостей λ от влажности и температуры (от $t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t = +20 \text{ }^\circ\text{C}$). Исследование направлено на определение граничных влажностей, при которых при отрицательных температурах в порах материалов лед не образуется или его количество незначительно. Известно, что сначала замерзает свободная влага в крупных порах и капиллярах, что и отражено на графиках в виде повышения теплопроводности в материалах с массовой влажностью свыше 20 %. По мере понижения температуры количество твердой фазы влаги увеличивается за счет постепенного замерзания пленочной влаги (связанной со скелетом материала). Интенсивность прироста теплопроводности тем выше, чем выше влажность материала и ниже температура. Так же из графика видно, что при отрицательных температурах не всегда λ увеличивается. Это возможно связано с тем, что влага, содержащаяся в малых количествах в крупных порах материала, образует рыхлый лёд (иней), в результате чего теплопроводность не увеличивается, а уменьшается.

Перемещением незамерзшей жидкой влаги при отрицательных температурах занимался Р.Е. Брилинг, Ю.Д. Ясин, В.Г. Гагарин, Н.Н. Елин. Изучением характеристик незамерзшей воды занимались П. Хаккер, Этвос, Рамсей, Дж. Халлентом, Л. Жирифалко. Установлено, что температура замерзания влаги в капиллярах зависит от их диаметра: чем

меньше будет диаметр капилляра, тем ниже будет температура замерзания в нем воды. Так, например, в капиллярах диаметром 1,57 мм вода замерзает при температуре $-6,4$ °С; в капиллярах диаметром около 0,24 мм – при $-14,2$ °С, а в капиллярах диаметром 0,1 мм – при $-18,6$ °С. Для определения количества незамерзшей воды в материале в зависимости от температуры и влажности материала Ю.Д. Ясин вывел эмпирическую формулу:

$$W' = a + bW_m + \frac{cW_m + d}{t}, \quad (1)$$

где W_m – влажность материала, % по массе; W' – влажность материала, отнесенная к незамерзшей в нем влаге, % по массе; t – температура материала; a , b , c , d – эмпирические коэффициенты.

Если эту формулу решать относительно определения значения температуры, а вместо определения количества незамерзшей влаги подставить величину влажности материала, то определим температуру начала замерзания влаги в порах материала.

Таким образом, определение значения коэффициента теплопроводности при различных механизмах увлажнения материалов: сорбционное и сверхсорбционное, с капиллярной конденсацией и без неё, изучены недостаточно и требуют дополнительных исследований.

Профессор В.Г. Гагарин предложил методику, позволяющую вычислять равновесную сорбционную влажность, представляющую собой сумму двух компонентов: количества адсорбированной влаги W_a и влаги капиллярной конденсации W_k .

Он установил, что максимальная гигроскопическая влажность материалов при отрицательных температурах уменьшается с понижением температуры. Методика позволяет так же пересчитывать изотермы сорбции на различные температуры, а также рассчитывать изотермы сорбции строительных материалов по известным характеристикам микроструктуры. В качестве характеристик материала используются: интегральная кривая распределения микрокапилляров по размерам, площадь удельной поверхности материала, константа, определенная по изотерме сорбции при определенной температуре.

Профессор И.Я. Киселев [10] разработал математический метод расчета равновесной сорбционной влажности строительных материалов, представляющий собой сумму двух компонентов состояний влаги: полимолекулярно-адсорбированной и капиллярно-конденсированной. Метод позволяет определять значения относительных влажностей воздуха, при которых в данном материале начинается и заканчивается капиллярная конденсация, как при положительных, так и при отрицательных температурах. Он определил, что при понижении температуры капиллярная конденсация в порах исследованных материалов начинается при меньших значениях относительной влажности.

Подводя итоги проведенному обзору состояния вопроса, следует отметить, что подавляющее число авторов Б.П. Кауфман, Е. Шильд, В.М. Ильинский, Т.И. Рубашкина, И.Я. Гнип, С.А. Веялис, Р. Drochutka [6], Н.В. Давыденко [7], Z. Suchorab [8], А.Б. Крутилин [9], И.Я. Киселев [10] исследовали теплопроводность материалов в зависимости от физических характеристик (плотность, пористость и др.) и условий эксплуатации (температура и влажность). Однако зависимости теплопроводности от вида связи влаги с материалом (парообразная, сорбционная, пленочная, капиллярная, объемная и т.д.) изучены недостаточно.

Заключение

1. Установлено, что с ростом влажности материалов растет коэффициент их теплопроводности, однако степень изменения теплопроводности материалов различна на различных диапазонах влажности.

2. Установлено, что коэффициент теплопроводности строительных материалов исследуется без учета состояния влаги в пористой структуре материала, а именно сорбционной, пленочной, капиллярной и т.д.

3. Исследование зависимости коэффициента теплопроводности от вида связи влаги с материалом является актуальной задачей, что позволит определять теплотехнические характеристики ограждающих конструкций в зависимости от вида эксплуатационной влаги в широком интервале её изменения в ограждающих конструкциях.

Список библиографических ссылок

1. Гагарин В. Г., Пастушков П. П., Реутова Н. А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 152–155.
2. Иванцов А. И., Куприянов В.Н. Режим эксплуатации многослойных стеновых ограждающих конструкций, как основа прогнозирования их срока службы // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 32–40.
3. Петров А. С., Куприянов В. Н. Переменное значение паропроницаемости материалов в условиях эксплуатации и его влияние на прогнозирование влажностного состояния ограждающих конструкций // Строительные науки. 2016. № 6 (738). С. 97–105.
4. Куприянов В. Н. Климатология и физика архитектурной среды. М. : АСВ, 2016. 194 с.
5. Перехоженцев А. Г. Моделирование температурно-влажностных процессов в пористых строительных материалах. Часть 3. Расчет коэффициентов диффузии водяного пара в пористых материалах по характеристикам их пористой структуры // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 89–91.
6. Drochytka R., Zach J., Hroudova J. Non-destructive Testing of Influence of Moisture on Properties of Autoclaved Aerated Concrete // E-Journal of Nondestructive Testing. 2011. URL: http://www.ndt.net/article/ndtnet/2011/36_Zach.pdf (дата обращения: 21.01.2017).
7. Давыденко Н. В., Бакатовчи А. А. Влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности соломенных и костросломенных теплоизоляционных материалов // Вестник Полоцкого государственного университета. 2013. № 8. С. 73–78.
8. Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H. Influence of moisture on heat conductivity coefficient of aerated concrete // Ecological Chemistry and Engineering. S. 2011. V. 18. № 1. P. 111–120.
9. Крутилин А. Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В. В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2. С. 46–55.
10. Киселев И. Я. Метод расчета равновесной сорбционной влажности строительных материалов // Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 92–98.

Kupriyanov V.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: Kupriyan@kgasu.ru

Yuzmuhametov A.M. – post-graduate student

E-mail: Aynur.Yuzmuhametov@mail.ru

Safin I.Sh. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: zavlab17@rambler.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Influence of moisture on heat conductivity of walling materials. the state of the issue**Abstract**

Problem statement. Thermal characteristics of building materials of walling are significantly altered because of changes in humidity of the materials throughout the year. Changing the value of the thermal conductivity is mostly dependent on the moisture content.

Results. The researches of influence of various factors on the coefficient of thermal conductivity efficiency were conducted by many scientists. The famous research works deal with the impact of the material structure, porosity, pore size, temperature, moisture, ice content and other factors. However, many aspects of the problem remain unknown. For example, while studying the influence of moisture of the materials on their thermal properties, the influence of high moisture of the material (volume or mass) on the thermal conductivity coefficient is studied. Whereas the information about the influence of low humidity values associated with the

sorption of moisture from humid air and water vapor diffusion through the building walling is very limited.

Conclusions. The research indicated that the increase of moisture of the material enhances the coefficient of thermal conductivity, but the degree of change in the thermal conductivity of different materials is different in various ranges of humidity. The thermal conductivity coefficient of construction materials is investigated without paying attention to the moisture in the porous structure of the material, namely, adsorbed, pellicular, capillary moisture etc.

The majority of researches on thermal conductivity coefficient does not take into account the type of bond between moisture and building material, Whereas our study allows to determine the thermal performance of building walling, depending on the type of operating moisture within a wide range of its alteration.

Keywords: heat conductivity, temperature, sorption, desorption, moisture, capillaries, porosity.

References

1. Gagarin V. G., Pastushkov P. P., Reutova N. A. Usage of calculated definition of the operating humidity of thermal insulation materials // *Stroitelstvo i rekonstrukciya*. 2015. № 4 (60). P. 152–155.
2. Ivantsov A. I., Kupriyanov V. N. Operative conditions of the sandwich wall protecting constructions as the basis of forecasting of their life cycle // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 3 (29). P. 32–40.
3. Petrov A. S., Kupriyanov V. N. Variability of vapor permeability of materials in operating conditions and its impact on walling moisture conditions // *Stroitelnye nauki*. 2016. № 6 (738). P. 97–105.
4. Kupriyanov V. N. *Climatology and physics of architectural space*. M. : ASV, 2016. 194 p.
5. Perekhozhencev A. G. Modeling of temperature-humidity processes in porous building materials. Part 3. Calculation of diffusion coefficients of water vapour in porous materials according to the characteristics of their porous structure // *Stroitelnye materialy*. 2013. № 2. P. 89–91.
6. Drochytka R., Zach J., Hroudova J. Non-destructive Testing of Influence of Moisture on Properties of Autoclaved Aerated Concrete // *E-Journal of Nondestructive Testing*. 2011. URL: http://www.ndt.net/article/ndtnet/2011/36_Zach.pdf (дата обращения: 21.01.2017).
7. Davydenko N. V., Bakatovich A. A. The influence of the indicator of humidity on coefficient of heat conductivity of straw and boon-straw heat-insulating materials // *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. № 8. P. 73–78.
8. Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H. Influence of moisture on heat conductivity coefficient of aerated concrete // *Ecological Chemistry and Engineering*. S. 2011. V. 18. № 1. P. 111–120.
9. Krutilin A. B., Rykhliionak Y. A., Liashkevich V. V. Thermophysical characteristics of low density autoclaved aerated concrete and their influence on the durability of exterior walls of buildings // *Magazine of Civil Engineering*. 2015. № 2. P. 46–55.
10. Kiselev I. Ya. Method of calculation of the equilibrium sorption moisture content of construction materials // *Vestnik MGSU*. 2011. № 3. P. 92–98.