

МОДЕЛЬ ВЛАЖНОГО ПЕНОПЛАСТА И СХЕМА РАСЧЕТА ЕГО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**Никитин В.И., Кофанов В.А., Бацкель-Бжозовска Б.**

Введение. Жесткие полимерные пены (пенопласты) широко применяется в строительстве и других отраслях промышленности в качестве эффективной тепловой изоляции зданий и сооружений. Обобщенной характеристикой сложного процесса проводимости теплоты в пенопластах является эффективный коэффициент теплопроводности λ , используемый для определения теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций.

Очевидно, что коэффициент теплопроводности пенопластов зависит от теплопроводности плотного полимерного скелета и внутрипорового вещества, которое во влагосодержащих материалах состоит из парогазовой смеси и воды. При определении теплопроводности такого внутрипорового вещества необходимо учитывать влияние диффузионного потока парообразной влаги, движущийся в направлении потока тепла и сопровождающийся фазовыми превращениями влаги в порах (испарение в теплой зоне и конденсация в холодной) [1, 2, 3, 4]. При этом за счет конденсации диффундирующего пара может значительно увеличиться теплопроводность влажных материалов и прежде всего высокопористых пенопластов.

Оценка влияния диффузии пара на перенос тепла в настоящее время выполняется по аддитивной и неаддитивной схемам. Так, в работе [4] эффективная теплопроводность влажного пенопласта складывается из теплопроводности за счет конденсации диффундирующего пара, определяемой с помощью зависимости аналогичной закону Фурье для теплового потока, рекомендуемой к использованию в температурном диапазоне от 20 до 90 °С и содержащей эмпирические коэффициенты, и кондуктивной теплопроводности влажного материала, определяемой по формуле Кришера, также содержащей эмпирический коэффициент. Наличие эмпирических коэффициентов накладывает определенные ограничения на использование этих зависимостей при проведении расчетов.

Авторы работы [3] влияние диффузии пара на перенос тепла оценивают по неаддитивной схеме расчета, моделируя увлажненный материал структурой с взаимопроникающими компонентами. Анализ трехкомпонентной системы, содержащей твердый скелет, жидкую влагу и парогазовую смесь, проводился с помощью метода последовательного сведения многокомпонентной системы к бинарной. Вначале определялась эффективная теплопроводность порового пространства, содержащего жидкость и парогазовую смесь (бинарная система с взаимопроникающими компонентами), а затем определялась эффективная теплопроводность влажного материала, состоящего из твердого скелета и внутрипорового вещества. Теплопроводность парогазовой смеси представлялась в виде суммы теплопроводности сухого газа и теплопроводности пара, вызванной диффузионным переносом пара в поровом пространстве.

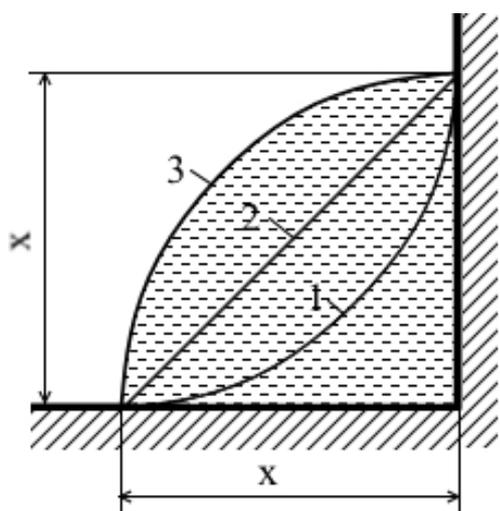
В высокопористых пенопластах жидкая влага смачивает поверхность пор частично (чаще) или полностью (реже). В первом случае модель порового пространства целесообразно представить в виде бинарной системы с изолированными включениями, а во втором случае в виде бинарной системы с взаимопроникающими компонентами. При изменении влагосодержания пор или угла смачивания возможен переход одной бинарной системы в другую. Для этого нужно знать значение граничного (критического) влагосодержания или угла смачивания. Однако в рассмотренных выше схемах расчета не учитывается эта важная особенность.

В данной работе предлагается метод расчета эффективной теплопроводности влагосодержащих высокопористых пенопластов, в котором используется неаддитивная схема учета влияния диффузии пара на перенос тепла, последовательные бинарные системы (внутрипоровое вещество из жидкости и парогазовой смеси, а также твердый полимерный скелет и внутрипоровое вещество) описываются моделями структур с взаимопроникающими компонентами и изолированными включениями, определены условия перехода от одной модели структуры к другой и нет необходимости определения эмпирических коэффициентов.

Модель структуры влажного пенопласта и расчетные зависимости

При разработке модели влажного пенопласта реальная ячеистая структура полимерного скелета была заменена адекватной ей моделью с упорядоченной стержневой структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек кубической формы. Такая форма элементарной ячейки является достаточно обоснованной и наиболее простой. Чтобы оценить характер распределения жидкой влаги в этой ячейке необходимо учитывать влагосодержание материала ψ и краевой угол смачивания Θ , образованный на границе твердого тела, жидкости и газа. Из анализа результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных и натуральных условиях и частично представленных, например, в работах [4, 5, 6], следует, что при постоянном контакте со средой с изменяющейся влажностью и температурой объемное влагосодержание полиуретановых и фенольных пенопластов может достигать $\psi=0.06-0.07 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Для определения краевого угла смачивания Θ нами был использован метод крупной капли жидкости ($3-4 \text{ см}^3$), смачивающей плоскую горизонтальную поверхность полимера [7]. После пяти независимых измерений угла смачивания водой твердой полиуретановой поверхности при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ оказалось, что измеряемая случайная величина характеризуется средним арифметическим значением $\bar{\theta}=56^\circ$ и выборочным стандартным отклонением $s=3.2^\circ$.

На рисунке 1 показан характер распределения очень малого количества жидкости в виде полосы постоянного поперечного сечения в двухгранном угле, образованном двумя взаимноперпендикулярными полуплоскостями, при различных углах смачивания. Если исходить из приведенных в [8] средних размеров ячеек пенополиуретанов, то можно принять, что размер x на рисунке 1 не превышает 200 мкм . В этом случае в нормальных условиях силы тяжести не смогут исказить поверхности жидкости (воды), показанной на рисунке 1, так как значения сил тяжести составляет не более 0.5% от значений сил поверхностного натяжения. Тогда не сложно представить характер распределения жидкости в элементарной ячейке. В качестве примера на рисунке 2 приведена восьмая часть элементарной ячейки, содержащей изолированное включение жидкости при угле смачивания $\Theta=45^\circ$.



Тогда не сложно представить характер распределения жидкости в элементарной ячейке. В качестве примера на рисунке 2 приведена восьмая часть элементарной ячейки, содержащей изолированное включение жидкости при угле смачивания $\Theta=45^\circ$.

1 – $\Theta=0^\circ$; 2 – $\Theta=45^\circ$; 3 – $\Theta=90^\circ$

Рисунок 1 – Вид поверхности жидкости в двухгранном угле при различных углах смачивания

увеличением влагосодержание размер x (рисунок 2) будет возрастать и при $x = L - \Delta$ изолированные включения жидкости сольются и поровое пространство следует рассматривать как бинарную систему с взаимопроникающими компонентами. Таким образом, при расчетах теплопроводности порового пространства необходимо знать его граничное влагосодержание, при котором происходит переход бинарной системы с изолированными включениями к системе с взаимопроникающими компонентами и наоборот.

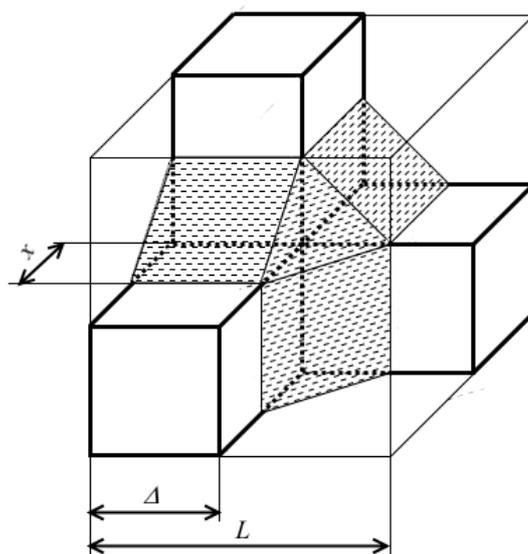


Рисунок 2 – Характер распределения изолированного включения жидкости в элементарной ячейке при угле смачивания $\Theta=45^\circ$

Объемное влагосодержание пор ψ_p связано с объемом жидкости V_w и пор V_p отношением $\psi_p = V_w / V_p$ или с объемным влагосодержанием материала ψ и его пористостью m отношением $\psi_p = \psi / m$. Из рисунка 2 следует, что $V_w = 3 \cdot x^2 \cdot \Delta / 2 + x^6 / 6$. Объем пор $V_p = (L - \Delta)^3 + 3 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta)^2$. Приняв $x = L - \Delta$, после простых преобразований получим объемное граничное влагосодержание пор при угле смачивания $\Theta = 45^\circ$

$$\psi_p' = \frac{1 + 8 \cdot c}{6 \cdot (1 + 2 \cdot c)}; \quad c = \Delta / L. \quad (1)$$

Аналогичным образом при угле смачивания $\Theta = 90^\circ$ приходим к зависимости

$$\psi_p' = \frac{\pi \cdot (1 + 3.5 \cdot c)}{6 \cdot (1 + 2 \cdot c)}. \quad (2)$$

При угле смачивания $\Theta = 0^\circ$ значение искомого влагосодержания определяется по формуле

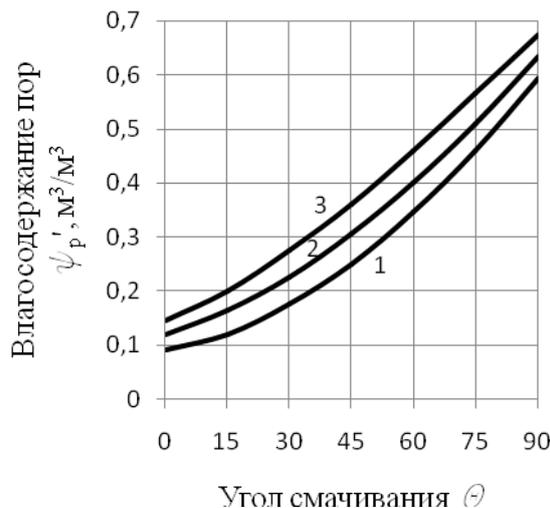
$$\psi_p' = \frac{(4 - \pi) \cdot (1 + 14 \cdot c)}{20 \cdot (1 + 2 \cdot c)}. \quad (3)$$

С помощью формул (1), (2) и (3) можно установить зависимость влагосодержания пор ψ_p' от угла смачивания Θ при различных значениях относительного размера стержней $c = \Delta / L$ элементарной ячейки. Иллюстрация указанной зависимости представлена на рисунке 3.

Относительный размер стержней вычисляется с использованием соотношения [9]:

$$c = 0.5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2 \cdot m_i - 1)}{3} \right], \quad (4)$$

где m_i – концентрация i -той компоненты ($i=1..2$), для которой определяется величина c .



Для определения эффективной теплопроводности бинарной структуры с известными концентрациями m_1, m_2 компонентов и их теплопроводностями λ_1, λ_2 воспользуемся зависимостями, установленными с помощью обоснованных методов теории обобщенной проводимости [3].

$$1 - c = 0.1; \quad 2 - c = 0.2; \quad 3 - c = 0.3$$

Рисунок 3 – Расчетная зависимость граничного влагосодержания пор ψ_p' от угла смачивания Θ при различных относительных размерах стержней элементарной ячейки c

Для структуры с взаимопроникающими компонентами использована зависимость, полученная Г.Н. Дульневим в 1965 году

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \left[c^2 + \nu \cdot (1 - c)^2 + 2 \cdot \nu \cdot c \cdot (1 - c) \cdot (\nu \cdot c + 1 - c)^{-1} \right] \quad (5)$$

где $\nu = \lambda_2 / \lambda_1$. Компоненты этой структуры являются геометрически равноправными и при расчетах не важно, какая из двух компонент будет принята в качестве первой.

Для структуры с замкнутыми включениями была выбрана следующая зависимость:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \frac{1 + (\nu - 1) \cdot (1 - m_2^{2/3}) \cdot m_2^{1/3}}{\nu - (\nu - 1) \cdot m_2^{1/3}}, \quad (6)$$

где m_2 – объемная концентрация включений, $\nu = \lambda_2 / \lambda_1$.

В данном случае компоненты структуры геометрически неравноправны и непрерывная компонента всегда является первой с концентрацией m_1 .

При расчетах теплопроводности влажных пенопластов в качестве одной из непрерывных компонент будем рассматривать паровоздушную смесь, так как в процессе эксплуатации

теплоизоляционных конструкций происходит диффузионное замещение газа, образовавшегося в порах пенопластов при их изготовлении, воздухом и водяным паром. Согласно работ [1, 2, 3] теплопроводность паровоздушной смеси λ_{va} равна сумме теплопроводности воздуха λ_a и пара λ_v . Теплопроводность пара λ_v , вызванная диффузионным переносом пара в поровом пространстве, может быть определена по формуле [3]

$$\lambda_v = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{va}}{P_{va} - P_v} \cdot \frac{dP_v}{dT} \cdot q_t, \quad (7)$$

где D – коэффициент диффузии водяного пара в неподвижном воздухе, м²/с;
 μ – коэффициент сопротивления диффузии пара через поровое пространство;
 M – молекулярная масса пара, кг/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T – температура пара, К;
 P_{va} – суммарное давление пара и воздуха, Па;
 P_v – парциальное давление пара, Па;
 q_t – удельная теплота парообразования при температуре T , Дж/кг.

При определении коэффициента D широко используется зависимость, которую в 1938 году обосновал Схирмер (R. Schirmer) [10]

$$D = \frac{2.305 \cdot 10^{-5} \cdot P_o}{P_{va}} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}, \quad P_o = 101323 \text{ Па.} \quad (8)$$

Экспериментальное значение коэффициента μ определяется из отношения

$$\mu = D / \delta_v, \quad (9)$$

где δ_v – коэффициент паропроницаемости пористой среды, м²/с.

Экспериментирование можно избежать, если из большого количества предлагаемых формул выбрать наиболее подходящую для рассматриваемого материала. Предварительный анализ показал, что для влажных пенопластов с открытопористой структурой при концентрации паровоздушной смеси $m - \psi \geq 0.93$ можно предложить простую формулу [4]

$$\mu = \frac{1}{0.57 \cdot (m - \psi)}, \quad \psi \leq \psi_p \cdot m. \quad (10)$$

При значениях $m - \psi < 0.93$ можно использовать зависимость [11]

$$\mu = \tau^2 / (m - \psi), \quad (11)$$

где τ – коэффициент извилистости, который согласно [9] предлагается находить из соотношения:

$$\tau = (m - \psi) / c^2. \quad (12)$$

Здесь параметр c определяется по формуле (4) при $m_1 = m - \psi$. После подстановки соотношения (12) в (11) окончательно получим

$$\mu = (m - \psi) / c^4 \quad (13)$$

Представляется целесообразным расчет диффузионной составляющей теплопроводности λ_v для пенопластов начинать при влагосодержании не менее максимального гигроскопического ψ_h и постоянном при заданной температуре давлении насыщенного пара p_{vh} .

Схема расчета

Рекомендуемую схему расчета проиллюстрируем на примере вычисления эффективной теплопроводности образца пенопласта, имеющего пористость $m=0.93$, плотность $\rho=80$ кг/м³, влагосодержание $\psi=0.06$ м³/м³ близкое наибольшему эксплуатационному значению, среднюю температуру $t=20$ °С и краевой угол смачивания $\Theta=60$ °.

Вначале по формуле (7) вычисляем диффузионную составляющую теплопроводности при λ_v при $T=293$ К, $P_{va}=10^5$ Па. По справочным данным находим $M=0.018$ кг/моль, $R=8.3144$ Дж/(моль·К), $P_v=P_{vh}=0.02338 \cdot 10^5$ Па, $\frac{dP_{vh}}{dT}=148$ Па/К (при $dT=1$ К),

$q_r=2.38 \cdot 10^6$ Дж/кг. По формуле (8) определяем коэффициент диффузии пара в воздухе $D=2.65 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Для вычисления коэффициента μ используем формулу (13) при объемной концентрации паровоздушной смеси $m = 0.93 - 0.06 = 0.87$ и параметре $c=0.7743$, найденном по формуле (4) при $m_1 = m = 0.87$. Тогда имеем $\mu=2.42$.

В результате получаем $\lambda_v=0.03$ Вт/(м·К) и с учетом теплопроводности сухого воздуха $\lambda_v=0.0257$ Вт/(м·К) теплопроводность паровоздушной смеси равна $\lambda_{va} = \lambda_v + \lambda_a = 0.0557$ Вт/(м·К).

Объемное влагосодержание порового пространства равно $\psi_p = \psi / m = 0.06/0.93 = 0.0645$ м³/м³. При угле смачивания $\Theta=60^\circ$ и параметре $c=0.1614$, вычисленном по формуле (4) при объемной концентрации твердого полимера $m_1=0.07$, с помощью рисунка 3 найдено граничное влагосодержание пор $\psi'_p=0.38$ м³/м³, которое превышает фактическое $\psi_p=0.0645$ м³/м³ почти в 6 раз. В таком случае поровое пространство, содержащие паровоздушную смесь и воду рассматриваем как бинарную систему (структуру) с изолированными включениями. Первой компонентой этой системы является паровоздушная смесь с объемной концентрацией $m_1=0.9355$ и теплопроводностью $\lambda_1 = \lambda_{va} = 0.0557$ Вт/(м·К), а второй – вода с объемной концентрацией $m_2=0.0645$ ($m_1 + m_2 = 1$) и теплопроводностью $\lambda_2 = \lambda_w = 0.596$ Вт/(м·К). Сейчас, с помощью формулы (6) при соотношении $\nu = \lambda_2 / \lambda_1 = 0.596/0.0557=10.7$ вычисляем эффективную теплопроводность внутрипорового вещества $\lambda_{12}=0.0608$ Вт/(м·К).

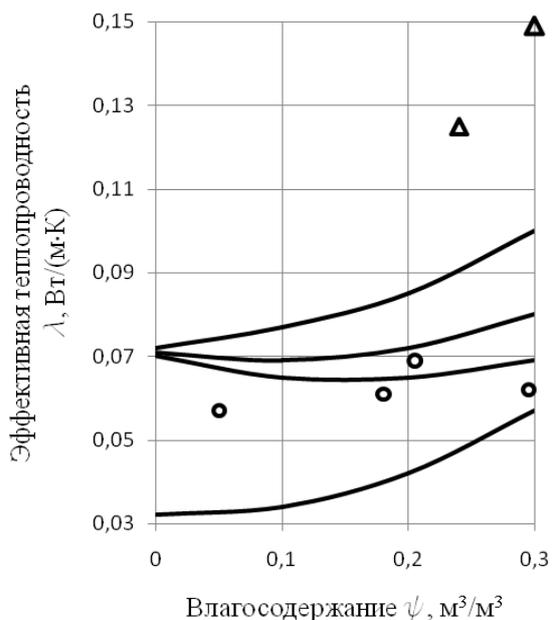
На заключительном этапе расчета, используя формулу (5) для структуры с равноправными взаимопроникающими компонентами, определяем эффективную теплопроводность λ влажного пенопласта. В качестве первой компоненты будем рассматривать внутрипоровое вещество, для которого имеем $m_1 = m = 0.93$, $\lambda_1 = \lambda_{12} = 0.0608$ Вт/(м·К) и параметр $c=0.8386$, найденный по формуле (4). Вторая компонента – полимерный скелет, характеризующийся значениями $m_2=0.07$ и $\lambda_2=0.25$ Вт/(м·К). Тогда имеем соотношение $\nu = \lambda_2 / \lambda_1 = 0.25 / 0.0608 = 4.1118$. При найденных значениях параметров c и ν по формуле (5) вычисляем эффективную теплопроводность влажного пенопласта $\lambda=0.068$ Вт/(м·К).

Для сравнения по рассмотренной схеме был выполнен расчет, в котором при определении теплопроводности внутрипорового вещества λ_{12} не учитывался перенос тепла за счет конденсации диффундирующего пара λ_v . В этом случае значение эффективной теплопроводности влажного пенопласта составило $\lambda' = 0.0354$ Вт/(м·К), что почти в два раза меньше результата предыдущего расчета. Если воспользоваться аддитивной схемой расчета и определить эффективную теплопроводность влажного пенопласта как сумму $\lambda = \lambda' + \lambda_v$, то получим результат $\lambda = 0.0354 + 0.03 = 0.0654$ Вт/(м·К), который лишь на 3.8% оказался меньше результата, вычисленного по неаддитивной схеме. Отметим, что при реализации другой аддитивной схемы расчета по формулам, рекомендованным в работе [4] и содержащим эмпирические коэффициенты, получено значение эффективной теплопроводности равное $\lambda=0.0745$ Вт/(м·К), которое на 9.6% больше значения, вычисленного по предлагаемой неаддитивной схеме расчета. Точно такой же результат дает предлагаемая схема расчета при использовании значения коэффициента сопротивления диффузии пара $\mu=2.016$, найденного по формуле (10).

Вычислительный эксперимент и его результаты

Вычислительный эксперимент был выполнен с целью оценки влияния влагосодержания ψ и средней температуры t рассмотренного пенопласта на его теплопроводность λ . Для этого представленный пример расчета λ , учитывающий различные подходы к оценке λ , был повторен при других значениях влагосодержания ψ из диапазона от 0.01 до 0.3. По результатам повторных вычислений были построены графики, отражающие различные зависимости λ от ψ и приведенные на рисунке 4 совместно с опытными данными, взятыми из работы [4]. Из сравнения зависимости 1 на рисунке 4 с остальными зависимостями следует, что диффузи-

онная составляющая теплопроводности λ_v при различных способах ее учета вносит существенный вклад в эффективную теплопроводность λ влажного пенопласта. Использование формулы (10) для определения коэффициента сопротивления диффузии пара μ вместо формулы (13) привело к заметным различиям (качественным и количественным) при вычислении эффективной теплопроводности λ (зависимости 3 и 4). Сопоставление зависимостей 2 и 3 показывает, что аддитивная и неаддитивная схемы учета диффузионной составляющей λ_v при определении эффективной теплопроводности пенопласта дают близкие результаты в пределах максимального эксплуатационного влагосодержания $\psi \leq 0.07$. В таком случае результаты неаддитивного расчета превышают результаты аддитивного расчета не более чем на 4%. С повышением влагосодержания материала до $\psi=0.3$ указанная разница возрастает до 15%.



○, Δ – опытные данные различных авторов
Рисунок 4 – Зависимость эффективной теплопроводности λ от влагосодержания ψ для пенопласта с пористостью $m=0.93$ при температуре 20°C и угле смачивания $\Theta=60^\circ$ и различных способах учета теплопроводности водяного пара λ_v за счет его диффузии:

1 – без учета; 2 – аддитивный; 3, 4 – неаддитивный при различных формулах расчета коэффициента сопротивления диффузии пара

Из рисунка 4 видно, что для одного и того же материала при влагосодержании $\psi > 0.2$ опытные данные одних авторов (треугольники)

превышают опытные данные других авторов (кружки) примерно в два раза, а расчетная кривая 3, полученная с помощью рекомендованной схемы расчета, неплохо предсказывает опытные данные, обозначенные кружками. Также экспериментально установлено [3], что теплопроводность одного и того же материала с одним и тем же влагосодержанием может отличаться в несколько раз. В первую очередь это можно объяснить тем, что при одинаковом влагосодержании, но разных углах смачивания влага может смачивать поверхность пор полностью или частично.

Для рассматриваемого пенопласта ($m=0.93$ и $\psi=0.3$) имеем влагосодержание пор $\psi_p = \psi / m = 0.323$, которому соответствует граничный угол смачивания $\theta' = 52^\circ$ (рисунок 3). При углах смачивания $\Theta < 52^\circ$ и влагосодержании $\psi=0.3$ поверхность пор смачивается водой полностью и поровое пространство можно представить в виде бинарной системы с взаимопроницаемыми компонентами, теплопроводность которой определяется по формуле (5). В этом случае значение эффективной теплопроводности влажного пенопласта составит $\lambda = 0.136$ Вт/(м·К), что в 1.71 раза больше значения теплопроводности, вычисленной для того же пенопласта при частичном смачивании водой поверхности пор ($\Theta > 52^\circ$), и достаточно точно предсказывает опытное значение $\lambda = 0.15$ Вт/(м·К), представленное на рисунке 4. При другом влагосодержании $\psi=0.25$ ($\psi_p=0.269$) и угле смачивания $\Theta < 45^\circ$ расчетное значение $\lambda = 0.121$ Вт/(м·К) близко еще одному опытному значению $\lambda = 0.13$ Вт/(м·К) (рисунок 4). Таким образом, при правильной количественной оценке характера смачивания поверхности пор жидкостью (частично или полно), определяемой с помощью параметров ψ и Θ , предлагаемые метод расчета теплопроводности пенопластов λ может удовлетворительно прогнозировать опытные данные.

Расчетами подтвержден общеизвестный эффект повышения теплопроводности влажного пенопласта с повышением его средней температуры. При этом в пределах эксплуатационно-

го влагосодержания материала $\psi \leq 0.07$ разница между значениями теплопроводности, вычисленными по аддитивной и неаддитивной схемам расчета, не превышает 4%. С ростом влагосодержания материала до $\psi=0.3$ эта разница увеличивается, что и показывают зависимости 2 и 3 на рисунке 5.

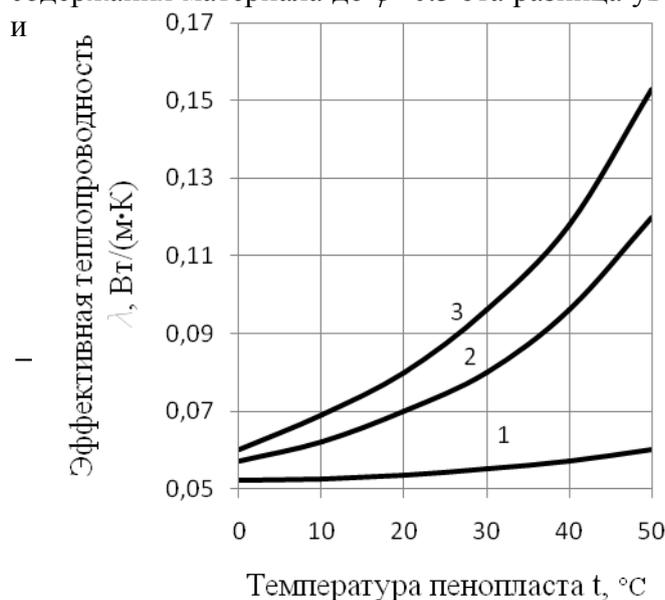


Рисунок 5 – Зависимость эффективной теплопроводности λ от средней температуры пенопласта с пористостью $m=0.93$ при влагосодержании $\psi=0.3$ и угле смачивания $\Theta=60^\circ$ и различных способах учета теплопроводности водяного пара λ_v за счет его диффузии: 1 – без учета; 2 – аддитивный; 3 – неаддитивный

Заключение. Разработана геометрическая модель влажного пенопласта, позволяющая найти способ определения значения граничного влагосодержания пор или краевого угла смачивания, при которых происходит переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию и наоборот.

Расчетами показано, что такой переход сопровождается скачкообразным изменением теплопроводности пенопластов. Выполнено математическое описание процесса переноса тепла в модельной структуре влажного пенопласта с учетом диффузии водяного пара в поровом пространстве. Расчетным путем установлено заметное влияние влагосодержания и средней температуры пенопласта на его эффективную теплопроводность при аддитивной и неаддитивной схемам учета диффузионной составляющей теплопроводности. Сравнение результатов расчета с опытными данными выявило их достаточно точное совпадение.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
2. Missenard, A. Conductivité thermique des solides, liquides, gaz et de leurs mélanges / A. Missenard. – Paris : Éditions Eyrolles, 1985. – 340 p.
3. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1991. – 248 с.
4. Гурьев, В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В.В. Гурьев, В.С. Жолудов, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
5. Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR) : Report № 1 (October) / BING: Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations. – Brussels, 2006. – 33 p.
6. Петров-Денисов, В.Г. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции / В.Г. Петров-Денисов, Л.А. Масленников. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 193 с.
7. Способ определения краевого угла смачивания полимерных композиций : пат. RU 2025710 / В.В. Гурьев, В.И. Никитин, Г.А. Голубова. – Опубл. 30.12.1994.
8. Collishaw, P.G. An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellular materials / P.G. Collishaw, J.R.G. Evans // Journal of Materials Science. – 1994. – V. 29. – P. 486–498.
9. Nikitsin, V.I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V.I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – V. 56. – P. 30–34.
10. Scheffler, G.A. A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media / G.A. Scheffler, R. Plagge // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – P. 286–296.
11. Epstein, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chemical Engineering Science. – 1989. – V. 44, № 3. – P. 777–779.