

$$a_n = \frac{2}{3\ell} \cdot \int_0^{3\ell} f(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{\ell} \cdot x\right) dx,$$

$$b_n = \frac{2}{3\ell} \cdot \int_0^{3\ell} f(x) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{\ell} \cdot x\right) dx,$$

где a_0, a_n, b_n – коэффициенты ряда Фурье;

ℓ – интервалы периода;

n – целое число от 1 до ∞ .

Находим разложение в ряд Фурье периодической функции с периодом 3ℓ .

$$V(\tau) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \tau \leq \ell; \\ V_{np}, & \ell < \tau \leq 2\ell; \\ V_{cm}, & 2\ell < \tau \leq 3\ell. \end{cases}$$

$$\frac{2}{3\ell} \cdot \left(\int_0^{\ell} 0 \cdot d\tau + \int_{\ell}^{2\ell} V_{np} \cdot d\tau + \int_{2\ell}^{3\ell} V_{cm} \cdot d\tau \right) = \frac{2}{3} \cdot (V_{np} + V_{cm}).$$

Находим коэффициенты ряда

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{3} \cdot (V_{np} + V_{cm});$$

$$a_n = \frac{2V_{np} \cdot \sin(\pi n)}{3\pi n} \times$$

$$\times \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \cdot \left(\frac{\sin(2\pi n)}{\sin(\pi n)} - 1 \right) + \frac{\sin(2\pi n)}{\sin(\pi n)} \cdot \left(\frac{\sin(3\pi n)}{\sin(2\pi n)} - 1 \right) \right]$$

$$b_n = \frac{2V_{np} \cdot \cos(\pi n)}{3\pi n} \times$$

$$\times \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \cdot \left(1 - \frac{\cos(2\pi n)}{\cos(\pi n)} \right) + \frac{\cos(2\pi n)}{\cos(\pi n)} \cdot \left(1 - \frac{\cos(3\pi n)}{\cos(2\pi n)} \right) \right]$$

Подставив полученные коэффициенты в ряд (8) получим (9).

Подставим значения $n=1, 2, 3, \dots$ и получим искомым ряд Фурье (10).

Выражение (10) позволяет определить количество воздуха при его прерывистой подаче в топку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Severyanin V.S. Peculiarities of furnace process with broken air supply// Materials of the III International school-seminar. Modern problems of combustion and its applications. Belarussian section of the combustion institut National Academy of sciences of republic of Belarus A.V. Luikov heat and mass transfer institute// Minsk. – 1999. – 128 page.-The bibliography: page 57-60.
2. Т.Н. Андрианова и другие. Сборник задач по технической термодинамике. М.: "Энергия". – 1971. – С. 262. Библиогр.: С. 128.

УДК 691:699.86

Никитин В.И., Ракецкий В.М., Ланко А., Прусел И.А.

ИМИТАЦИЯ ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В комплексе мероприятий по энергосбережению важную роль играют работы, направленные на снижение потерь тепловой энергии через теплоизолированные поверхности зданий, сооружений, теплопроводов и оборудования. Снижения этих потерь можно добиваться путем перехода на более жесточенные нормативы теплопотерь и использования высокоэффективных теплоизоляционных материалов. При этом для принятия обоснованных решений целесообразно опираться на количественные оценки, получаемые с использованием методов расчета, которые в состоянии более полно учитывать особенности процесса переноса тепла и влаги в теплоизоляционных материалах при случайных воздействиях окружающей среды.

Сейчас на базе существующего математического описания процесса тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых материалах и современной вычислительной техники имеется возможность разрабатывать диалоговые системы имитации. С

помощью таких систем, являющихся средством выполнения вычислительного эксперимента, можно получать сведения о состоянии изучаемого процесса в определенные моменты времени, углублять свои знания, совершенствовать саму систему имитации, накапливать данные для принятия технического решения или разработки более точного инженерного метода расчета.

Одну из возможных инженерных реализаций этого подхода продемонстрируем на примере имитации процесса переноса тепла и влаги через многослойные цилиндрические стенки из высокопористых материалов, изолирующих поверхности круговых цилиндров. Заметим, что результаты, полученные для цилиндрических стенок большого радиуса кривизны, можно распространить и на плоские стенки.

Нестационарные процессы переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых материалах взаимно связаны между собой и при решении практических задач могут быть описаны

Никитин Вадим Иванович. Д.т.н., профессор каф. строительной механики БГТУ.

Ракецкий Валерий Михайлович. К. ф.-м. наук, доцент, зав. каф. вычислительной техники и прикладной математики. Брестский государственный технический университет (БГТУ). Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Ланко Андрей. Профессор, д.т.н., проректор по сотрудничеству и промоции, зав. каф. железобетонных и стеновых конструкций Белостокской Политехники (РП).

Прусел Иоланта Анна. К.т.н., адъюнкт каф. железобетонных и стеновых конструкций Белостокской Политехники (РП).

одним и тем же дифференциальным уравнением Фурье, которое в обобщенном смысле является уравнением нестационарного поля любого потенциала переноса.

Поскольку потенциалом переноса тепла является температура, то линейное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах при отсутствии перепада температуры вдоль оси симметрии можно записать так [1]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где t - температура в любой точке поля, °С;

r - расстояние точки от оси симметрии, м;

τ - временная координата, ч;

$a = \lambda / (c\rho)$ - коэффициент температуропроводности материала, характеризующий скорость перераспределения температуры, м²/ч;

λ - коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°С)

c - удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°С);

ρ - плотность материала, кг/м³.

Численные значения теплофизических свойств λ, c, ρ зависят от состава, структуры и тепловлажностного состояния материалов и их правильный выбор в значительной мере определяет точность инженерного расчета. Коэффициент теплопроводности λ учитывает всю совокупность сложных явлений, связанных с передачей тепла, и правильный выбор его значения наиболее важен для высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Поэтому в особо ответственных случаях значение λ следует определять путем исследования применяемого материала.

В общем случае перемещение влаги в капиллярно-пористых материалах может совершаться в парообразной и жидкой фазах.

Если материал имеет влажность, значение которой не выходит за рамки сорбционной (воздушно-сухое состояние материала), то перемещение влаги в порах и капиллярах происходит в основном в парообразной фазе и виде поверхностных пленок. При таком диффузионном перемещении влаги за потенциал диффузии стоит принять парциальное давление (упругость) водяного пара. Тогда по аналогии с (1) для диффузии водяного пара через цилиндрическую стенку получим следующее дифференциальное уравнение [1]:

$$\frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\mu E_t}{\xi_0 \rho} \left(\frac{\partial^2 e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial e}{\partial r} \right), \quad (2)$$

где e - упругость водяного пара, Па;

μ - коэффициент паропроницаемости, г/(м·ч·Па);

E_t - максимальная упругость водяного пара при соответствующей температуре, Па;

ξ_0 - удельная относительная пароемкость, г/кг.

Относительная пароемкость зависит от относительной влажности воздуха в порах материала и определяется дифференцированием изотермы сорбции (десорбции)

$$\xi_0 = \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot 1000, \quad (3)$$

где ω - весовая сорбционная влажность материала, %;

$\varphi = 100 e / E_t$ - относительная влажность воздуха в порах материала, %.

В процессе расчета по (2) к некоторому моменту времени в отдельных слоях цилиндрической стенки упругость водяно-

го пара может достигать максимальных значений E_t . Это определяет начало выпадения конденсата и перемещение влаги в жидкой фазе.

С некоторыми ограничениями перемещение жидкой влаги при сверхгигроскопической влажности в соответствии с [1,2] может быть описано уравнением влажопроводности в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\beta}{10\rho} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right), \quad (4)$$

где ω - влагосодержание материала, % по массе;

β - коэффициент влажопроводности материала, г/(м·ч·%);

10 - количество влаги, необходимое для повышения влагосодержания 1 кг материала на 1%, г/кг.

Величина β зависит от вида материала, его влагосодержания и температуры. Экспериментальные данные значений коэффициентов влажопроводности для многих современных теплоизоляционных материалов отсутствуют.

Решение уравнений (1), (2), и (4) аналитическими методами весьма затруднительно. Поэтому для получения численных решений обычно используют приближенные методы, основанные на применении конечных разностей. При решении задач нестационарной тепло- и влажопроводности практически приемлемым является метод элементарных балансов [3].

Если в рассматриваемом случае ограничиться осесимметричной задачей, то температура и влагосодержание в цилиндрической изоляции будут изменяться только в радиальном направлении, а температурные и влажностные поля представлены поверхностями круговых цилиндров, имеющих общую ось. Тогда в качестве элементарного объема целесообразно рассматривать цилиндрическую стенку малой толщины и единичной длины. В пределах такой элементарной стенки температура и влажность принимались постоянными и равными температуре и влажности срединной поверхности стенки.

Рассмотрим метод элементарных балансов при расчете нестационарной теплопроводности. Уравнение элементарного теплового баланса для произвольной j -й цилиндрической стенки с наружным радиусом r_j и внутренним r_{j+1} ($r_j > r_{j+1}$) имеет вид:

$$Q_{j-1} + Q_{j+1} = \Delta U_j, \quad (5)$$

где Q_{j-1} и Q_{j+1} - количество тепла, поступившее в j -й элемент из $(j-1)$ -го и $(j+1)$ -го элементов за малый конечный промежуток времени $\Delta \tau$;

ΔU_j - увеличение (уменьшение) теплосодержания j -го элемента за время $\Delta \tau$.

Малость величины Δr позволяет использовать допущение о том, что увеличение энтальпии j -го элемента ΔU_j пропорционально температурному приращению в срединной поверхности его объема, а величина среднего за время $\Delta \tau$ теплового потока Q через какую-либо поверхность пропорциональна начальному значению температурного градиента. Принимается, что на отрезке времени $\Delta \tau$ изменения значений используемых теплофизических характеристик не происходит.

Слагаемые уравнения теплового баланса (5) определяются на основании законов Фурье и Ньютона с учетом граничных условий характеризующих особенности процесса переноса тепла. В рассматриваемой задаче следует выделить три случая: перенос тепла в атмосферу через наружную поверхность

изоляции, теплообмен между элементарными объемами однородного материала и перенос тепла через поверхность соприкосновения разнородных материалов.

Распишем слагаемые уравнения теплового баланса для наружной цилиндрической стенки, размеры которой заданы наружным r_1 и внутренним r_2 радиусами, а также единичной длиной $l=1$. Причем имеем $r_1 - r_2 = \Delta r / 2$.

Согласно закону Ньютона количество тепла Q_0 , поступившее в наружную цилиндрическую стенку с потоком воздуха за время $\Delta \tau$, определяется по формуле

$$Q_0 = \alpha 2\pi \cdot r_1 (t_e - t_1) \Delta \tau, \quad (6)$$

где t_e и t_1 - температура воздуха и наружной цилиндрической стенки в начальный момент времени, °С;

α - коэффициент теплоотдачи, характеризующий сложный теплообмен между воздухом и поверхностью стенки, Вт/(м² °С).

Количество тепла, поступившее в наружную цилиндрическую стенку из примыкающей (второй) элементарной цилиндрической стенки с наружным радиусом r_2 и внутренним r_3 ($r_2 - r_3 = \Delta r$) за время $\Delta \tau$, на основании закона Фурье равно

$$Q_2 = \lambda 2\pi r_2 \Delta \tau (t_2 - t_1) / \Delta r, \quad (7)$$

где t_1 и t_2 - температуры 1-й и 2-й стенок в начальный момент времени, °С.

Изменение энтальпии наружной цилиндрической стенки за время $\Delta \tau$ составит

$$\Delta U_1 = c \rho \pi (r_1^2 - r_2^2) (t_1' - t_1), \quad (8)$$

где t_1' - температура наружной стенки в конце отрезка времени $\Delta \tau$, °С.

После рассмотрения уравнения (5) с учетом его составляющих (6), (7) и (8) находим

$$t_1' = t_1 (1 - H) + H (\alpha r_1 t_e + \lambda \frac{r_2}{\Delta r} t_2) / (\alpha r_1 + \lambda \frac{r_2}{\Delta r}), \quad (9)$$

где $H = 7,2 \Delta \tau (\alpha r_1 + \lambda \frac{r_2}{\Delta r}) / [c \rho (r_1^2 - r_2^2)]$;

7,2 - коэффициент, связанный с переходом от Вт к кДж/ч.

Пользуясь формулой (9), можно при известной начальной температуре слоя найти его температуру в моменты времени $\tau + \Delta \tau$, $\tau + 2\Delta \tau$, $\tau + 3\Delta \tau$ и т.д. вплоть до интересующего нас момента.

Если произвольная j -ая цилиндрическая стенка с наружным радиусом r_j и внутренним r_{j+1} ($r_j - r_{j+1} = \Delta r$) имеет начальную температуру t_j и находится внутри однородного материала с плотностью ρ , то найденное с помощью уравнения теплового баланса (5) соотношение для определения температуры этой стенки через отрезок времени $\Delta \tau$ имеет вид:

$$t_j' = t_j (1 - M) + M (r_j t_{j-1} + r_{j+1} t_{j+1}) / (r_j + r_{j+1}), \quad (10)$$

где $M = 7,2 \Delta \tau \lambda / (c \rho \Delta r^2)$;

t_{j-1} и t_{j+1} - температуры примыкающих ($j-1$) и ($j+1$) стенок в начальный момент времени τ ;

λ и c - теплопроводность и удельная теплоемкость материала j -той стенки в начальный момент времени.

И, наконец, рассмотрим перенос тепла на стыке i -го и ($i+1$)-го разнородных материалов. Расчетная схема этого

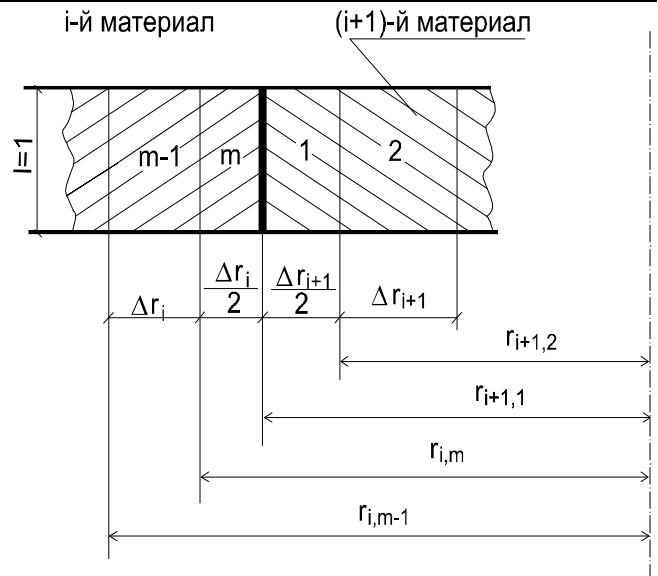


Рисунок 1 - К расчету переноса тепла и влаги на стыке разнородных материалов.

случая приведена на рис.1. Для повышения точности расчета толщина последнего элементарного m -го слоя i -го материала принимается равной $\Delta r_i / 2$. С этой же целью толщина первого элементарного слоя ($i+1$)-го материала принимается равной $\Delta r_{i+1} / 2$. Эти два слоя объединяются в одну элементарную цилиндрическую стенку с наружным радиусом $r_{i,m}$ и внутренним $r_{i+1,2}$ ($r_{i,m} - r_{i+1,2} = (\Delta r_i + \Delta r_{i+1}) / 2$). Полагаем, что температуры контактирующих полуслоев одинаковые: $t_{i,m} = t_{i+1,1}$.

В соответствии с (5), алгебраическая сумма количества тепла, вошедшего (вышедшего) в объединенный элемент через внешнюю и внутреннюю цилиндрические поверхности, равна увеличению (уменьшению) его энтальпии. Тогда имеем:

$$Q_{i,m-1} + Q_{i+1,2} = \Delta U_{i,m} + \Delta U_{i+1,1}, \quad (11)$$

где

$$Q_{i,m-1} = \lambda_i 2\pi r_{i,m} \Delta \tau (t_{i,m-1} - t_{i,m}) / \Delta r_i; \quad (12)$$

$$Q_{i+1,2} = \lambda_{i+1} 2\pi r_{i+1,2} \Delta \tau (t_{i+1,2} - t_{i,m}) / \Delta r_{i+1} \quad (13)$$

$$\Delta U_{i,m} = c_i \rho_i \pi (r_{i,m}^2 - r_{i+1,1}^2) (t_{i,m}' - t_{i,m}) \quad (14)$$

$$\Delta U_{i+1,1} = c_{i+1} \rho_{i+1} \pi (r_{i+1,1}^2 - r_{i+1,2}^2) (t_{i,m}' - t_{i,m}). \quad (15)$$

После подстановки (12), (13), (14) и (15) в (11) и решения полученного выражения относительно температуры $t_{i,m}'$ для объединенного элемента в момент времени $\tau + \Delta \tau$ получили

$$t_{i,m}' = t_{i,m} + 7,2 \Delta \tau \left[\lambda_i \frac{r_{i,m}}{\Delta r_i} (t_{i,m-1} - t_{i,m}) + \lambda_{i+1} \frac{r_{i+1,2}}{\Delta r_{i+1}} (t_{i+1,2} - t_{i,m}) \right] / [c_i \rho_i (r_{i,m}^2 - r_{i+1,1}^2) + c_{i+1} \rho_{i+1} (r_{i+1,1}^2 - r_{i+1,2}^2)]. \quad (16)$$

Температура на внутренней цилиндрической поверхности теплоизоляции принималась равной температуре изолируемой поверхности.

Сейчас можно задаться начальными условиями и с помощью формул (9), (10), и (16) организовать процесс вычисления температурных полей в теплоизоляции, который целесо-

образно сопровождать вычислением влажностных полей, используя алгоритм того же метода элементарных балансов.

Если рассматривать перенос влаги в тепловой изоляции при нестационарных условиях диффузии водяного пара, то по аналогии с (5) уравнение элементарного материального баланса для произвольной j -й цилиндрической стенки запишется так:

$$P_{j-1} + P_{j+1} = \Delta P_j, \quad (17)$$

где P_{j-1} и P_{j+1} - количество водяного пара, поступившее в j -й элемент из $(j-1)$ -го и $(j+1)$ элементов за конечный промежуток времени $\Delta\tau$;

ΔP_j - увеличение (уменьшение) парообразного влагосодержания j -го элемента за время $\Delta\tau$.

Составляющие уравнения (17) и формулы для определения упругости водяного пара в произвольном элементе через отрезок времени $\Delta\tau$ легко получить из предыдущих выкладок после замены:

- температуры t на упругость водяных паров e ;
- коэффициента теплопроводности λ на коэффициент паропроницаемости материала μ ;
- удельной теплоемкости материала c на отношение удельной относительной пароемкости ξ_0 к максимальной упругости водяного пара при соответствующей температуре E_t (ξ_0 / E_t);
- коэффициента теплоотдачи α на величину обратную сопротивлению паропроницания наружной поверхности изоляции $R_{nn}(1/R_{nn})$.

По аналогии с передачей тепла потребуется рассмотреть три случая передачи пара: перенос пара между воздушной средой и наружной поверхностью изоляции; влагоперенос между элементарными цилиндрическими стенками однородного материала; влагообмен через поверхность соприкосновения разнородных материалов.

На стыке двух разнородных материалов (см. рис.1) принимается непрерывность упругости водяных паров порых материалов и непрерывность потока парообразной влаги ($e_{im} = e_{i+1,1}$).

В результате после соответствующих выкладок получили формулы для определения упругости водяного пара через отрезок времени $\Delta\tau$, являющиеся аналогами формул (9),(10),(16).

В наружной цилиндрической стенке толщиной $\Delta r/2$

$$e'_1 = e_1(1 - H_e) + H_e \left(\frac{r_1 e_e + \mu r_2 e_2}{R_{nn} + \frac{\mu r_2}{\Delta r}} \right) / \left(\frac{r_1}{R_{nn}} + \frac{\mu r_2}{\Delta r} \right), \quad (18)$$

где $H_e = 2 \Delta\tau \left(\frac{r_1}{R_{nn}} + \frac{\mu r_2}{\Delta r} \right) / \left[\xi_0 \rho (r_1^2 - r_2^2) / E_t \right]$.

В произвольной j -й цилиндрической стенке толщиной Δr , находящейся внутри однородного материала,

$$e'_j = e_j(1 - M_e) + M_e (r_j e_{j-1} + r_{j+1} e_{j+1}) / (r_j + r_{j+1}), \quad (19)$$

где $M_e = 2 \Delta\tau \cdot \mu \cdot E_t / (\xi_0 \cdot \rho \cdot \Delta r^2)$.

В зоне плотного стыка i -го и $(i+1)$ -го разнородных материалов (см. рис. 1).

$$e'_{i,m} = e'_{i+1,1} = e_{i,m} +$$

$$+ 2 \Delta\tau \frac{\mu_i \frac{r_{i,m}}{\Delta r_i} (e_{i,m-1} - e_{i,m}) + \mu_{i+1} \frac{r_{i+1,2}}{\Delta r_{i+1}} (e_{i-1,2} - e_{i,m})}{\frac{\xi_{0i}}{E_t} \rho_i (r_{i,m}^2 - r_{i+1,1}^2) + \frac{\xi_{0i+1}}{E_t} (r_{i+1,1}^2 - r_{i+1,2}^2)}. \quad (20)$$

С помощью формул (18), (19) и (20) в любой момент времени и для любой цилиндрической поверхности изоляции можно вычислить упругость водяных паров e . Затем по величине e определить относительную упругость водяного пара

$$\varphi = \frac{e}{E_t} 100$$

и при этом φ по изотерме сорбции найти весовую влажность материала ω %.

В процессе эксплуатации материала в отдельных его сечениях влажность может превышать предел сорбционного увлажнения и образуется конденсационная влага. Становится возможным перемещение влаги в жидкой фазе наряду с перемещением водяного пара.

Расчет перемещения сверхсорбционной влаги выполнялся по аналогии с расчетом перемещения парообразной влаги. При этом образующаяся на стыке разнородных материалов конденсационная влага распределялась между прилегающими полуслоями (см. рис. 1) пропорционально скорости капиллярного всасывания воды этими материалами.

После завершения алгоритмизации процесса вычислений температурных и влажностных полей в многослойной теплоизоляции была разработана программа для IBM-подобных компьютеров, которая позволяет выполнять сложные вычислительные эксперименты, связанные со сбором информации для выработки обоснованных технико-экономических решений.

Для примера рассмотрим результаты вычислительного эксперимента, оценивающего процесс влагонакопления в двухслойной изоляции теплопровода, который не эксплуатируется в летний период. Наружный диаметр стальной трубы равен 920 мм. Поверхность трубы изолирована слоем стекловолокна толщиной 20 мм и наружным слоем пенополиуретана толщиной 60 мм.

Пенополиуретан определялся следующими свойствами: плотность $\rho_1 = 60 \text{ кг/м}^3$; коэффициент паропроницаемости $\mu_1 = 0,75 \cdot 10^{-4}$; удельная теплоемкость $c_1 = 1,4 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$; коэффициент теплопроводности λ_1 определялся с помощью математической модели, приведенной в работе [4]; изотерма сорбции соответствовала данным работы [5].

Для стекловолокна приняли такие характеристики: $\rho_2 = 80 \text{ кг/м}^3$; $\mu_2 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ г/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $c_2 = 0,75 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$; $\lambda_2 = 0,05 + 0,0003 \omega \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$. Изотерма сорбции, являющаяся обобщением данных различных авторов для различных волокнистых материалов, приведена на рис. 2.

Начальные условия определялись среднемесячными значениями относительной влажности воздуха $\varphi_0 = 77\%$ и его температура $t_0 = 15 \text{ °C}$, все слои теплоизоляции и труба имели одинаковую начальную температуру $t = 15 \text{ °C}$. Влагосодержание материалов при $\varphi = 77\%$ по изотерме сорбции $\omega_1 = 2,6\%$, $\omega_2 = 0,9\%$. Требовалось определить температурное и влажностное состояние изоляции через 30 дней, в течение которых

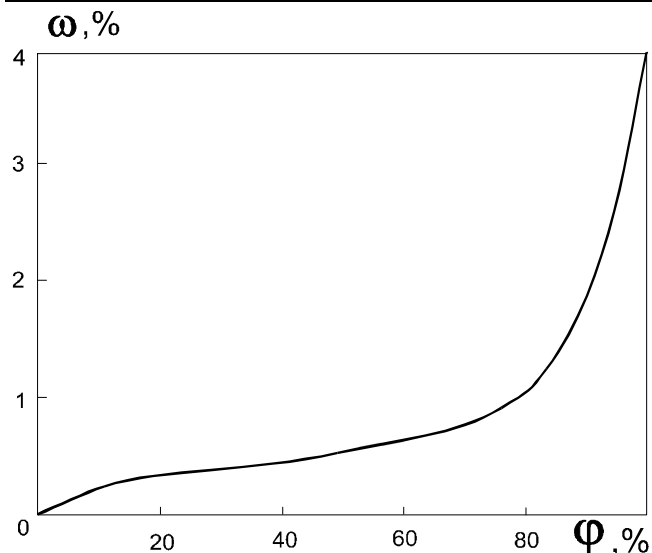


Рисунок 2 - Изотерма сорбции водяного пара стекловолокном

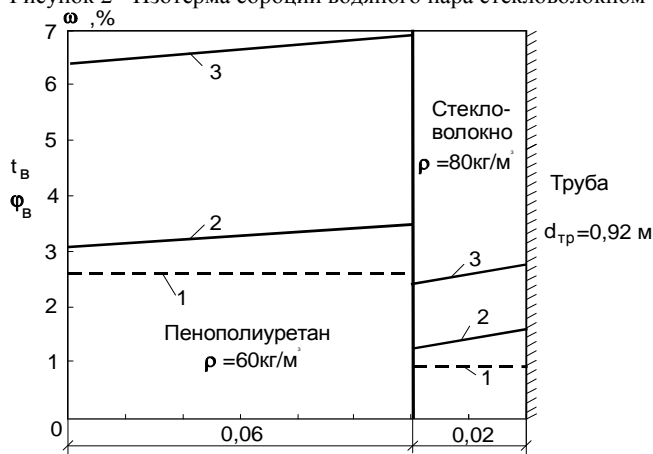


Рисунок - 3 Распределение весовой влажности по толщине изоляции.

1 – исходное влагосодержание; 2 – через 30 дней при сорбционной влажности новых материалов; 3 – через 30 дней при сорбционной влажности изношенных материалов

относительная влажность и температура воздуха были неизменными и равными $\phi_0=82\%$ и $t_0=11\text{ }^\circ\text{C}$.

Вычислительный эксперимент показал, что через 30 дней во всех слоях изоляции температура была одинаковой и рав-

ной $11\text{ }^\circ\text{C}$, а влажность, как следует из рис. 3 (кривая 2) заметно возросла по направлению к трубе.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации теплоизоляционные материалы во всем объеме насыщаются микро- и макротрещинами, которые повышают сорбционные свойства материалов, уменьшают долю закрытой пористости и способствуют удалению пенообразователей (фреон, CO_2), имеющих по сравнению с воздухом более низкую теплопроводность. В результате теплопроводность изоляции может существенно увеличиться. Так, по данным работы [6] коэффициент теплопроводности пенополиуретана через 20 лет эксплуатации ограждения повысился на 15 %. В рассматриваемой теплоизоляции это может привести к повышению теплопотерь примерно на 12 %.

Поэтому был выполнен еще один вычислительный эксперимент, в котором в отличие от предыдущего сорбционные характеристики материалов возросли в два раза (на практике сорбционная влажность пенополиуретана может увеличиваться еще больше). Его результаты отражены кривой 3 на рис.3, из которого следует, что влагосодержание материалов увеличилось пропорционально увеличению их сорбционной способности.

В заключение отметим, что опыт использования разработанной системы имитации показал ее способность адекватно описывать процессы переноса тепла и влажности в капиллярно-пористых материалах при наличии достоверных данных о теплофизических характеристиках этих материалов и условиях окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий.–М.: Стройиздат. – 1973. – С. 287.
2. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа. – 1974. – С. 320.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия. – 1973. – С. 320.
4. Никитин В.И., Езерский В.А. Прогнозирование теплопроводности и пенопластов/ Вестник БПИ – Строительство и архитектура, № 1. – 2000. – С. 48-51.
5. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий/ НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 168.
6. Nikitin W., Lapko A. Prognozowanie spadku wlasciwosci termo-izolacyjnych ocieplenia warstwowych scian oslonowych / Reteraty XIX Konf. Nauk.Techn."Awarie Budowlane ".- Szczecin – Miedzyszdroje “,1999.- S.415-422.

УДК 631.6

Валуев В.Е.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ЗЕМЛЯХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ

В деле повышения безопасности и эффективности сельскохозяйственного производства на землях, загрязненных радионуклидами, у Беларуси имеются позитивные результаты и определенные перспективы для их наращивания в будущем.

Из сельскохозяйственного оборота исключено 2,65 тыс.кв.км угодий, имеющих плотность загрязнения цезием – 137 выше 1480 кБк/м², стронцием – 90 - более 111 кБк/м², плутонием – выше 3,7 кБк/м². Вообще, радиоактивному загрязнению с плотностью выше 37 кБк/м² по цезию – 137 подверглось более 18 тыс. км² сельскохозяйственных земель. В настоящее время в сельскохозяйственном обороте использу-

ется 13,6 тыс.км² земель, загрязненных цезием – 137 с плотностью 37...1480 кБк/м², из которых 4,78 тыс.км² одновременно загрязнено и стронцием – 90 (11...111 кБк/м²). В сложнейших условиях ведется сельскохозяйственное производство на землях, загрязненных цезием – 137 плотностью 185...1480 кБк/м² (4,20 тыс.км²), часть площадей из которых (1,13 тыс.км²) загрязнена также стронцием – 90 с плотностью 37...111 кБк/м². Из общей (100%) площади загрязненных пахотных земель и луговых угодий на отдельные области Беларуси приходится: Гомельскую – 66, Могилевскую – 24, Брестскую – 4,5, Гродненскую – 3,0, Минскую – 2,5 процента. На