

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Н. Титаренко*, П.А. Дворников*, С.Н. Ковтун*, А.В. Павлов,
Н.Г. Роцин**, Е.Л. Матвеев****

** ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

*** Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-сервисный центр диагностики оборудования АЭС НИКИЭТ», г. Москва*



Проанализированы работы последних лет по вопросам моделирования тепловой конвекции в пористом цилиндрическом слое. Рассмотрены расчетные методы определения коэффициентов проницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов. Приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для тепловой изоляции трубопроводов энергетических установок, работающей в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: трубопровод, энергетические установки, промышленная волокнистая теплоизоляция, коэффициент проницаемости.

Key words: pipeline, power plants, industrial fibrous thermal insulation, permeability.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование течений в пористой среде является актуальной задачей во многих областях физики, химии, физиологии, промышленности и др. Пористые и волокнистые материалы используются при охлаждении мощных электронных устройств и элементов энергетических установок, в тепловых трубах и системах пористого проникающего охлаждения теплонапряженных элементов перспективных технических аппаратов. Предсказание свойств пористых материалов, включая коэффициенты проницаемости является актуальным для многих исследований. Обсуждение некоторых результатов данной проблемы можно найти в монографиях [1–6] и ряде публикаций [7–16].

Тепловая изоляция является неотъемлемой частью практически всего оборудования и трубопроводов АЭС. Срок службы тепловой изоляции зависит от места ее применения на АЭС и от воздействия эксплуатационных факторов, таких как ионизирующее излучение, высокая температура, вибрация, воздействие паровоздушной среды. Проектирование и разработка теплоизоляции для АЭС, а также исследование ее теплофизических и эксплуатационных свойств являются на сегодняшний день актуальной задачей.

На российском рынке представлены теплоизоляционные материалы из стекловолокна и каменной ваты, производимые как на современном технологическом оборудовании по новейшим технологиям, так и на устаревшем оборудовании, что

© Н.Н. Титаренко, П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.В. Павлов, Н.Г. Роцин, Е.Л. Матвеев, 2012

в значительной степени определяет их физико-технические и эксплуатационные характеристики [9].

Теплофизические и физико-механические свойства теплоизоляционных материалов на основе стекловолокна и каменной ваты зависят от сложного комплекса факторов, включающих в себя вид исходного сырья, технологию получения волокна, диаметр и длину волокон, их химический и фазовый состав, структуру материала, качество связующего [1].

При наличии на мировом и отечественном строительном рынке широкого спектра волокнистых теплоизоляционных материалов различных производителей, отличающихся технологией производства, качеством волокна и, соответственно, физико-техническими и эксплуатационными свойствами, получение объективных данных о сравнительной проницаемости различных видов волокнистых теплоизоляционных материалов представляется весьма актуальным.

Информация о значениях коэффициентов водопроницаемости необходима при расчете фильтрационных процессов в пористой структуре теплоизоляционных материалов. Подобные задачи достаточно часто встречаются при анализе процессов увлажнения изоляции различных объектов, например, увлажнение тепловой изоляции теплопроводов, эксплуатируемых в условиях затопления.

В работе [3] обобщены и проанализированы условия эксплуатации конструкций теплоизоляции трубопроводов, оборудования первого контура и строительных конструкций на эксплуатируемых, строящихся и проектируемых АЭС, требования, предъявляемые к теплоизоляционным материалам и конструкциям, критерии, которые могут быть применимы при конструировании теплоизоляции. Обсуждаются основные особенности тепловой изоляции трубопроводов АЭС: физико-механические характеристики, газопроницаемость, газовыделение, химическая и радиационная стойкость, теплопроводность. Рассматриваются методы определения физико-механических характеристик, термостойкости, тепло- и температуропроводности.

Попытка формирования банка данных по рекомендациям для расчета гидравлического сопротивления пористых структур сделана в работе [10]. Рассматриваются гидравлические сопротивления капиллярной пористой среды, а также пористой среды, сформированной слоем шаров или из частиц регулярной несферической формы. Получены обобщающие зависимости для расчета гидравлического сопротивления отдельных пористых структур.

В работе [11] анализируются экспериментальные данные по определяющим параметрам пористой структуры: средний размер пор, средний размер частиц, вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления. Приведены эмпирические корреляции между вязкостным и инерционным коэффициентами сопротивления и пористостью металлокерамических материалов. Получены обобщающие зависимости определяющих параметров от пористости.

Анализ методов расчета теплопроводности гетерогенных и пористых материалов выполнен в [12]. В работе рассматриваются классификация пористых материалов и основы их моделирования (все известные пористые материалы предложено описывать набором из семи моделей), особенности теплофизических свойств пористых материалов и некоторые особенности структуры тонких пленок.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЙ КОНВЕКЦИИ В ПОРИСТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ

Изучение теплофизических, гидродинамических, термомеханических и других процессов, протекающих в системах типа «пористая теплоизоляция с высоким

градиентом температур», представляет собой несомненный научный интерес для широкого класса научно-технических задач. Актуальными задачами являются

- математическое моделирование теплопереноса, влагообмена и распространения парогазовой смеси в волокнистой среде тепловой изоляции трубопроводов энергетических установок;
- моделирование конвекции одно- и многокомпонентных жидкостей в пористой среде, разработка эффективных методов расчета конвективных движений;
- моделирование процессов фильтрации жидкости в неоднородной пористой среде;
- исследование и прогнозирование свойств новых композиционных материалов для систем теплозащиты энергетических установок.

При теоретическом описании конвективного массопереноса используют уравнения Навье-Стокса. Рассмотрим слой пористой среды, ограниченный твердыми цилиндрическими поверхностями (рис. 1). Слой заполнен вязкой жидкостью (газом). Границы цилиндрической полости поддерживаются при различных температурах ($T_i > T_0$).

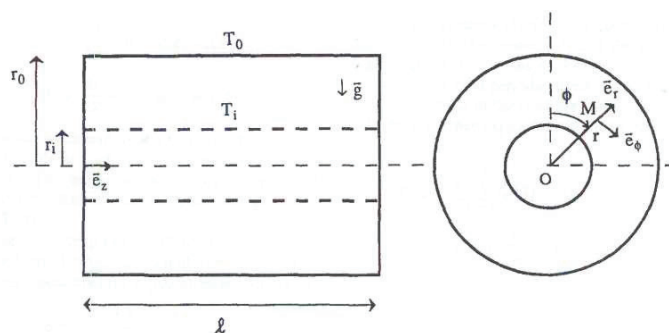


Рис. 1. Схема расчета течения в канале для трехмерной задачи о тепловой конвекции в цилиндрической кольцевой прослойке с пористой средой

Уравнения свободной конвекции в изотропной пористой цилиндрической прослойке для модели Форцгеймера и аппроксимации подъемных сил в приближении Буссинеска имеют вид

$$\begin{aligned} \Pi^{-1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_f} \nabla p - \frac{\mu}{\rho_f K} \vec{V} - C \cdot K^{-1/2} |V| \vec{V} + g\beta T \rho_f, \\ (\rho c_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda^* \Delta T - (\rho c_p)_f \vec{V} \nabla T, \quad \text{div} \vec{V} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{V} – скорость потока в канале; μ – динамическая вязкость жидкости или газа, p – давление; K – коэффициент абсолютной проницаемости; g – ускорение силы тяжести; Π – пористость среды (отношение объема пористой среды к полному объему системы), ρ_f – плотность жидкости (газа), заполняющей поры; λ^* – эффективная теплопроводность пористой среды без учета конвекции; β – коэффициент температурного расширения жидкости, $(c_p)_m$ и $(c_p)_f$ – удельные теплоемкости пористой среды и жидкости соответственно; C – безразмерный коэффициент (трения или торможения) Форцгеймера, величина которого зависит от природы пористого материала. Для модели Дарси следует положить $C = 0$.

Для приведения системы уравнений (1) к безразмерному виду обычно выбирают в качестве единиц измерения расстояния, времени, скорости, температуры и давления соответственно r_i (радиус внутреннего цилиндра), $r_i^2 \rho_f / \mu$, $\lambda^* / (c_p)_f \rho_f$,

$T_i - T_o, \lambda^* \mu / (Kc_f \rho_f)$. В итоге полученная краевая задача будет содержать несколько параметров подобия: число Грасгофа Gr , число Прандтля Pr (теплофизическая характеристика теплоносителя), параметр Дарси Da , фильтрационное число Рэлея Ra_f , отношение радиусов R цилиндров:

$$Gr = \frac{g\beta(T_i - T_o)r_i K \rho_f}{\mu}, \quad Pr = \frac{\mu c_f}{\lambda^*}, \quad Da = \frac{K}{r_i^2}, \quad R = \frac{r_o}{r_i}, \quad (2)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad Ra_f = Ra \cdot Da = \frac{g\beta(T_i - T_o)r_i K \rho_f A_f}{\mu \lambda^*}. \quad (3)$$

Наиболее полный обзор теоретических и экспериментальных работ по конвекции в пористых средах представлен в [13]. Одной из часто используемых конфигураций для изучения естественной конвекции в пористой среде является горизонтальный цилиндрический слой. В работах [14–23] исследовалась конвективная фильтрация в изотропных пористых кольцевых прослойках с внутренним подогревом при условии, что внутренняя поверхность имеет большую температуру, чем внешняя.

Следует заметить, что при достаточно большом отношении длины цилиндров к толщине зазора наблюдаются пространственные (трехмерные) эффекты в верхней части кольцевого канала возникают даже при низких числах Рэлея Ra , как это показано в работе [14]. Существование в определенных условиях вторичных структур при конвективном течении в изотропной пористой прослойке показано в [24], где выполнены исследования границ таких режимов в зависимости от числа Ra и толщины прослойки. Появление вторичных структур при некоторых условиях в однородных пористых прослойках подтверждается как в экспериментах, так и в численных расчетах [17].

Если скорость фильтрации немала, часто используют модель Форцгеймера, в которой уравнение переноса импульса имеет дополнительное слагаемое, квадратичное по скорости фильтрации жидкости. Как предельный случай она содержит и модель Дарси. В работах [18–20] проводилось исследование условий возникновения, существования и устойчивости асимметричных относительно вертикали конвективных движений для модели Форцгеймера пористой среды. Особое внимание уделялось изучению влияния нелинейного члена в уравнении переноса импульса на структуру и свойства исследуемых режимов конвекции.

В работах [25, 26] представлены результаты расчета течения и теплообмена в кольцевых пористых прослойках в зависимости от числа Рэлея, геометрии прослойки и анизотропии проницаемости. Установлено существование одновихревых и многовихревых режимов конвекции в зависимости от коэффициента анизотропии проницаемости и показана их роль в эффективности теплоизоляционных свойств цилиндрических прослоек.

КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КОНВЕКЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОСЛОЙКЕ

Интенсивность переноса тепла и массы при вынужденной конвекции зависит от физических свойств среды и геометрических факторов. В подавляющем большинстве случаев такие зависимости строгим теоретическим путем установить не удается. Обычно пользуются полуэмпирическими и эмпирическими соотношениями, базирующимися, как правило, на понятии о пограничных слоях.

Общий подход к конструированию таких соотношений можно представить следующим образом. Около межфазной поверхности возникает гидродинамический пограничный слой, толщина которого определяется значением критерия Re . Ин-

тенсивность процессов теплоотдачи определяется толщиной теплового пограничного слоя. Связь между тепловым и гидродинамическим пограничными слоями определяется значением числа Прандтля Pr . Таким образом, критериальные уравнения, отражающие интенсивность переноса тепла (Nu) могут быть представлены в форме $Nu = f(Gr, Pr)$.

Расчетно-экспериментальные исследования конвективных движений в горизонтальных цилиндрических прослойках, заполненных пористой средой, позволили определить следующую зависимость для практических расчетов параметра Nu [14]:

$$Nu = 0,44 Ra_f^{1/2} \frac{\ln(r_0 / r_i)}{1 + 0,916(r_i / r_0)^{1/2}}. \quad (4)$$

Соотношение (4) было получено в диапазоне $1,19 \leq R \leq 4$ и справедливо для $Nu \gg 1$.

Для вертикально расположенной цилиндрической прослойки с пористой средой можно использовать соотношение

$$Nu = 0,756 Ra_{r_0-r_i}^{1/2} \frac{[r_i / r_0 - (r_i / r)^2]^{1/2}}{1 + 1,422(r_i / r_0)^{3/2}}, \quad (5)$$

где фильтрационное число Рэлея определяется через толщину пористого слоя:

$$Ra_{r_0-r_i} = \frac{g\beta(T_i - T_0)(r_0 - r_i)K\rho_f c_f}{\mu\lambda^*}. \quad (6)$$

На основании анализа большого количества расчетно-экспериментальных данных в работе [23] была получена следующая корреляция, описывающая тепловое движение вдоль границы внутреннего горизонтального цилиндра, заполненного пористой средой:

$$Nu = 0,0166(27,65 - Ra^{0,38})Da^{0,036} Pr^{-0,013} R^{1,07} (\lambda_s / \lambda_f)^{0,17}. \quad (7)$$

Соотношение (7) справедливо в широком диапазоне чисел Прандтля ($Pr = 0,05 - 50$), Рэлея ($Ra = 10^3 - 10^6$), Дарси ($Da = 10^{-4} - 10^{-6}$), отношений параметров теплопроводности пористой среды и жидкости $\lambda_s / \lambda_f = 1 - 150$.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Во всех приведенных выше соотношениях базовым параметром является коэффициент проницаемости K пористой среды, который можно описать формулой Козени-Кармана [32]

$$K = \frac{\Pi^3 d^2}{\Psi_{CK} (1 - \Pi)^2}, \quad (8)$$

где Π – пористость среды (отношение объема пористой среды к полному объему системы); d – средний эквивалентный размер частиц пористого слоя; Ψ_{CK} – эмпирически определяемый коэффициент, который в работе Кармана [32] был представлен в виде произведения фактора формы Φ и фактора извилистости L_e/L (отношение длины поры к толщине пористого слоя):

$$\Psi_{CK} = \Phi \left(\frac{L_e}{L} \right)^2. \quad (9)$$

Сложность геометрии волокнистых материалов не позволяет для определения коэффициента проницаемости использовать точные численные методы. Однако во многих случаях для предварительного анализа можно использовать упрощенные модели. Волокнистую среду условно можно представить в виде одномерной, двух-

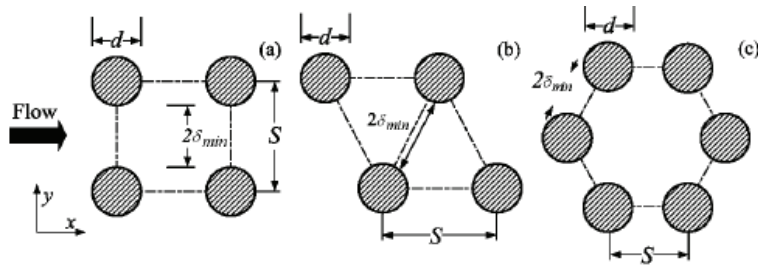


Рис. 2. Единичные ячейки одномерных волоконных систем: а) квадратного; б) ступенчатого и в) шестиугольного типа. Направление поперечного течения газа (воздуха) указано стрелкой слева

мерной или трехмерной структуры. Одномерной структурой можно описывать параллельную систему волокон. Примером одномерных структур являются пористые волокнистые ячейки, представленные на рис. 2.

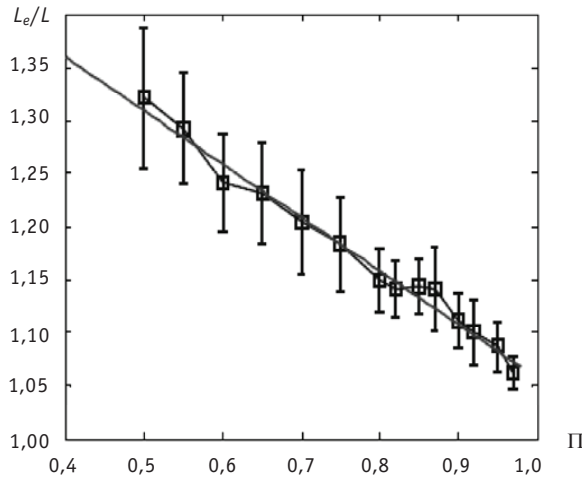


Рис. 3. Зависимость функции извилистости от параметра пористости системы. Экспериментальные данные взяты из работы [27]

В оригинальной работе [31] было сделано предположение, что фактор извилистости является постоянным ($L_e / L = \sqrt{2}$), $\Phi = 90$, что дает $\psi_{СК} = 180$, и в этом случае

$$K = \frac{\Pi^3 d^2}{180(1-\Pi)^2}. \tag{10}$$

В работе [27] на основе численного эксперимента по исследованию проницаемости при течении жидкости в перпендикулярном направлении хаотически распределенных капилляров было получено следующее выражение для коэффициента проницаемости:

$$K = \frac{\Pi^3 d^2}{140(1,552 - \Pi/2)^2(1-\Pi)^2}. \tag{11}$$

Корреляции для одномерных волоконных систем с квадратной ячейкой приведены в работе [29]

$$\frac{K}{d^2} = \frac{0,16 \left[\frac{\pi}{4\phi} - 3\sqrt{\frac{\pi}{4\phi}} + 3 - \sqrt{\frac{4\phi}{\pi}} \right]}{\sqrt{1-\phi}}, \quad \phi = \frac{\pi d^2}{4S^2}, \quad \phi = 1 - \Pi \tag{12}$$

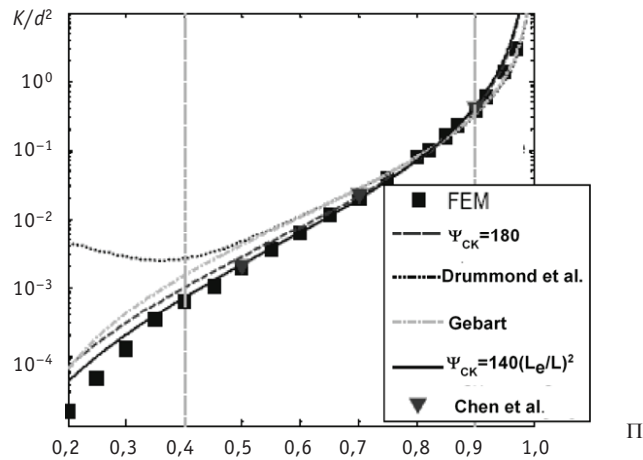


Рис. 4. Сравнение одномерных теоретических корреляций с экспериментальными данными [31]: Ψ_{CK} – параметр в формуле (1); FEM – численная оценка на основе метода конечных элементов [27]

и в работе [30]

$$\frac{K}{d^2} = \frac{4}{9\pi\sqrt{2}} \left(\frac{1-\Pi_c}{1-\Pi} - 1 \right)^{5/2}, \quad \Pi_c = 1 - \frac{\pi}{4}, \quad \varphi = \frac{\pi d^2}{4S^2}. \quad (13)$$

В этих же работах приведены корреляции для одномерных волоконных систем с шестигранной ячейкой в основании:

$$\frac{K}{d^2} = \frac{0,16 \left[\frac{\pi}{3\sqrt{3}\varphi} - 3\sqrt{\frac{\pi}{3\sqrt{3}\varphi}} + 3 - \sqrt{\frac{3\sqrt{3}\varphi}{\pi}} \right]}{\sqrt{1-\varphi}}, \quad \varphi = \frac{\pi d^2}{3\sqrt{3}S^2}. \quad (14)$$

$$\frac{K}{d^2} = \frac{4}{9\pi\sqrt{6}} \left(\frac{1-\Pi_c}{1-\Pi} \right)^{5/2}, \quad \Pi_c = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}}, \quad \varphi = \frac{\pi d^2}{3\sqrt{3}S^2}. \quad (15)$$

Сопоставление теоретических моделей, основанных на поперечном обтекании одномерной структуры волокон, с экспериментальными данными приведено на рис. 5.

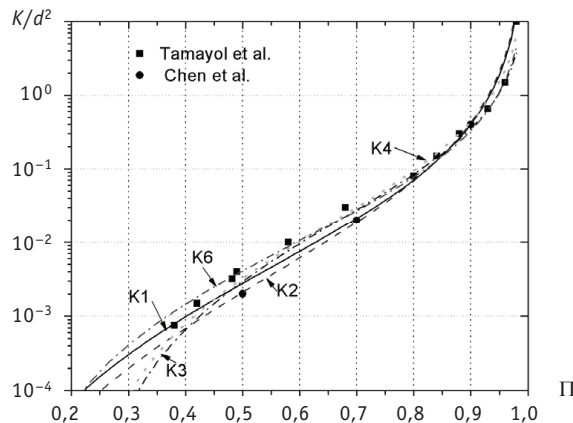


Рис. 5. Сравнение одномерных теоретических корреляций с экспериментальными данными [29, 31]: K1 – расчет по формуле (3); K2 – (4); K3 – (5); K4 – (6); K5 – (7); K6 – (8)

Рассмотренные корреляции были проверены на ряде экспериментальных и расчетных данных в широком диапазоне параметра пористости материала. Результаты исследования показывают, что микроскопические эффекты являются значительными при низкой пористости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волокнистые и выполненные на их основе композиционные системы широко применяются в качестве теплоизоляционных и конструкционных материалов, работающих в широком диапазоне температур. Для расчета интенсивности теплообмена, вызванного конвекцией в горизонтальных слоях волокнистых материалов, можно воспользоваться соотношениями (1), в которые входит коэффициент проницаемости. Из-за случайного характера волокнистой структуры теплоизоляционного материала точный расчет коэффициента проницаемости реальных волокнистых сред невозможен.

В работе проанализированы и обобщены экспериментальные, расчетно-экспериментальные и аналитические данные по моделированию проницаемости волокнистых материалов. Предложены аналитические зависимости для расчета коэффициентов проницаемости. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования предложенных соотношений при расчете коэффициентов проницаемости для широкого круга практических задач.

Статья подготовлена при выполнении Государственного контракта от 05.08.2011 №16.526.11.6006 в рамках федеральной целевой программы.

Литература

1. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – 352 с.
2. Петров В.Г., Денисов Л.А. Процессы тепло- и массообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1983г. – 192 с
3. Харламов А.Г., Корегин Ю.А. Тепловая изоляция. – М: ИздАТ, 1998. – 224 с.
4. Kaviany M. Principles of heat transfer in porous media. – Springer-Verlag, New York, 1992.
5. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 248 с.
6. Гурьев В.В., Жолудов В.С., Петров-Денисов В.Г. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет. – М., 2003.
7. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф., Сергеев В.П. Базальтоволокнистые материалы. Промышленность строительных материалов. – М., 1986. Сер. 6. – №3.
8. Tomadakis M. M., Robertson T. Viscous permeability of random fiber structures: comparison of electrical and diffusion estimates with experimental and analytical results//Journal of Composite Materials. – 2005. – V. 39. – P. 163-188.
9. Шойхет Б.М. Влияние структуры на теплопроводность и проницаемость волокнистых теплоизоляционных материалов// Энергосбережение. – 2008. – №7. – С.48-51.
10. Матюхин Н.М., Портяной А.Г., Сорокин А.П., Титов П.А. Гидравлическое сопротивление капиллярно-пористых структур (анализ и обобщение данных)/Препринт ФЭИ-2528. – Обнинск, 1996. – С. 39.
11. Матюхин Н.М., Портяной А.Г., Сорокин А.П., Титов П.А., Денисова Н.А. Определяющие параметры пористой структуры/Препринт ФЭИ-2627. – Обнинск, 1996. – С. 20.
12. Иванов А.П., Матюхин Н.М., Портяной А.Г., Сердунь Е.Н., Сорокин А.П., Сорокин Г.А. Методы измерения и расчета теплофизических характеристик пористых структур/Препринт ФЭИ-2757. – Обнинск, 1999. – С. 32.
13. Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media, third ed. – Springer, New York, 2006.
14. Caltagirone J.P. Thermoconvective instabilities in a porous medium bounded by two concentric horizontal cylinders// J. Fluid Mech. – 1976. – 65. – 337-362.

15. Rao Y.F., Fukuda K., Hasegawa S. A numerical study of three dimensional natural convection in a horizontal annulus with a Galerkin method//Int. J. Heat Mass Transfer. – 1988. – 31. – 695-707.
16. Bau H.H. Thermal convection in a horizontal, eccentric annulus containing a saturated porous medium – an extended perturbation expansion//Int. J. Heat Mass Transfer. – 1984. – 27. – 2277-2287.
17. Mojtabi M.C., Mojtabi A., Azaiez M., Labrosse G. Numerical and experimental study of multicellular free convection flows in an annular porous layer//Int. J. Heat Mass Transfer. – 1991. – 34 (12). – 3061-3074.
18. Kaviany M. Non-Darcian effects on natural convection in porous media confined between horizontal cylinders//Int. J. Heat Mass Transfer. – 1986. – 29 (10). – 1513-1519.
19. Kimura S., Pop I. Non-Darcian effects on conjugate natural convection between horizontal concentric cylinders with a porous medium, Fluid Dyn. Res. 7 (5-6) (1991) 241-253.
20. Khashan S., AlAmiri A., Pop I. Numerical simulation of natural convection heat transfer in a porous cavity heated from below using a non-Darcian and thermal non-equilibrium model, //Int. J. Heat Mass Transfer. – 2006. – 49. – 1039-1049.
21. Kumari M., Nath G. Unsteady natural convection from a horizontal annulus filled with a porous medium International//Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – 51. – 5001-5007.
22. Venkata P. Reddy a, G.S.V.L. Narasimham Natural convection in a vertical annulus driven by a central heat generating rod International//Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – 51. – 5024-5032
23. Khanafer K., Al-Amiri A., Pop I. Numerical analysis of natural convection heat transfer in a horizontal annulus partially filled with a fluid-saturated porous substrate International// Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – 51. – 1613-1627.
24. Himasekhar K. and Bau H.H. Two dimensional bifurcation phenomena in thermal convection in horizontal, concentric annuli containing saturated porous media//J. Fluid Mech. – 1988. – 187, 267.
25. Брайловская В.А., Феоктистова Л.В. Структуры течения и теплообмен в анизотропных пористых кольцевых прослойках//Механика жидкости и газа. – 1998. – №4. – С. 122-128.
26. Бессонов О.А., Брайловская В.А. Пространственная модель тепловой конвекции в зазоре между горизонтальными коаксиальными цилиндрами с анизотропным пористым заполнением//Механика жидкости и газа. – 2001. – №1. – С. 145-155.
27. Yazdchi K., Srivastava S., Luding S. Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media. International Journal of Multiphase Flow, 37(2011)956-966.
28. Tamayol A., and Bahrami M. Analytical determination of viscous permeability of fibrous porous media//International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – V. 52. – P. 3691-3701.
29. Tamayol A., and Bahrami M. Transverse Permeability of Fibrous Porous Media. Proceedings (CD) of the 3rd International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering (ICPM3) June 20-25, 2010, Montecatini, Italy.
30. Gebart B.R. Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM//Journal of Composite Materials. – 1992. – 26:1100-33.
31. Chen, X., Papathanasiou, T.D. On the variability of the Kozeny constant for saturated flow across unidirectional disordered fiber arrays, Composites: Part A (2006) 37:836-846.
32. Carman P.C. Fluid flow through granular beds, Transactions of the Institute of Chemical Engineering (1937) 15:150-66.
33. Drummond J.E. and Tahir M.I. Laminar viscous flow through regular arrays of parallel solid cylinders//Int. J. Multiphase Flow. – 1984. – 10:515-40.

Поступила в редакцию 28.06.2012

УДК 621.039.534

The protection of steel surface at use of freon in NPP such as «BREST» | E.A. Orlova, V.V. Alexeev, V.G. Gmurin, S.A. Zagrebaev, M.A. Orlov, Ya.N. Shirshov, A.N. Volov, I.Yu. Torbenkova, P.I. Tyichinskiy, M.C. Arsentev, E.Yu. Prochorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

Using fluorine-containing freon as a coolant in the second contour of fast reactors with heavy liquid-metal coolant of BREST type allows considerably decrease pressure and rise safety. There is a possibility of decreasing stability of freon which contacts with steel with raised content of silicon, using in heat-exchange equipment of such reactors and impoverishment of steel surface by silicon owing to formation of gaseous connection of silicon with fluorine of SiF_4 .

Fundamental opportunity of formation of sheeting MgF_2 on steels of ferrite-martensite and austenite classes contacting with liquid magnesium and gaseous silicon tetrafluoride shown. The bending of steel samples on 135° has not resulted to bursting of a surface film. That testifies to plasticity and dense coupling of MgF_2 covering with a surface of steel.

УДК 621.039.534.25

Calculation of Permeability Parameters for Fibrous Porous Materials | N.N. Titarenko, P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.V. Pavlov, N.G. Roshchin, E.L. Matveev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 33 titles.

We have studied the recent publications in area of simulation of heat convection in a porous cylindrical layer. The calculation methods of determining the permeability factors for fibrous thermal insulation materials are considered. Comparison of calculation and experimental data for power plants pipelines thermal insulation operating in a wide range of temperatures is given.

УДК 620.172.254

Isotropic Deformation Hardening Alloy E110 at Statistic and High Rate Magnetic-Pulsed Deformation | P.V. Fedotov, L.P. Loshmanov, A.V. Kostyuhina, E.A. Olevsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 21 titles.

The Results of alloy E110 tests in the strain rate range $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ to $1 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ at room temperature are presented. The experimental data were received by means magnetic -pulsed and standart quasistatistical methods of loading in interval of rate deformation $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ – $1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. The dependence flow stress from the true deformation (to $\sim 1,2$) ring, tubular and segmental specimens made from fuel tube $\varnothing 9,1-7,73 \text{ mm}$, as well as cylindrical samples are determined. Ring, tubular and segmental specimens have the same texture, but their deformation is carried out in different directions. Cylindrical samples have an another texture. Such tests give possibility to estimate the Influence of texture deformation and direction deformation on the deformation hardening of alloy. The Generalized equation of flow stress from the true deformation was offered with take into account the particular experimental results and the earlier elaborate Universal Model of Zr-Alloys plastic straining. On the base of the statistical analysis of experimental data and this Equation it was be shown that deformation hardening alloy is isotropically, i.e. does not depend on the texture of deformation alloy.