## Исследование нестационарного теплообмена в пористых структурах

Изжеуров Е.А., Ревякин А.В.

В современных энергетических установках широко используются регенеративные теплообменные устройства на базе пористых металлических структур, к которым предъявляются жесткие требования как по температурному режиму, так и по весо-габаритным показателям. Такие требования могут быть успешно выполнены при наличии надежных методик расчета температурных полей и оптимизации условий теплообмена пористой насадки с фильтруемым однофазным теплоносителем. В свою очередь, расчет и оптимизация требуют наличия надежных экспериментальных данных о коэффициенте внутрипорового теплообмена.

Очевидно, что качество и достоверность имеющихся экспериментальных данных существенно зависят от належности методов определения коэффициентов теплоотдачи, которыми они были получены. Сделанные в работе /1/ анализ и сравнение известных данных по теплопередаче в различных пористых насадках свидетельствуют о значительном расхождении имеющихся результатов. В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем более детальном рассмотрении данного вопроса.

Практика подобных исследований показала, что наиболее простыми и надежными методами определения коэффициентов теплоотдачи в пористых структурах являются расчетно-экспериментальные или косвенные методы, среди которых широкое распространение получил метод, разработанный майковым В.П. /2/. Данный метод, основанный на аналитическом решении Т.Е.Шумана /3/, полученном для задачи протрева неподвижного слоя пористой насадки потоком фильтруемого газа, позволяет вычислить коэффициент

теплоотдачи в результате экспериментального определения Скорости прогрева газового потока в слое пористого материала в момент равенства их теплоемкостей. Для реализации данного метода выбирается средний, наиболее прямолинейный участок опытной кривой прогрева, осуществляется как минимум два замера температуры газового потока через определенный промежуток времени. Не вдаваясь в подробности способа реализации данного метода, отметим ряд недостатков, существенно влияющих определения искомой величины. Одним из недостатков данной методики является сильная эависимости погрешности определения коэффициентов теплоопрачи от наличия надежного прямолинейного участка на опытной кривой прогрева газового потока. Во-вторых, решение Шумана, на котором основан метол. было получено в предположении постоянства температуры теплоносителя на входе пористой насадки в течение всего процесса. Многочисленные эксперименты, проведенные авторами, локазали, что реализовать последние условия на практике не удается, т.е. невозможно побиться скаукообразного изменения температуры газового потока на входе пористого образца в той степени, чтобы вписаться в допустимые рамки погрешности эксперимента. Было также установлено, что далеко не все экспериментальные кривые прогрева, соответствующие различным режимам течения газа даже в одном и том же пористом образце, имеют прямолинейный участок, по которому можно было бы с достаточной точностью определить теми прогрева газового потока.

Перечисленные выше недостатки, по-видимому, являются причиной расхождения экспериментальных результатов, получаемых различными авторами работ, указанных в /1/, использующих данным метод.

Избавиться от указанных недостатков и повысить тем самым точность определения коэффициентов теплоотдачи, позволяет метод, который будет изложен ниже.

Ранее авторами было получено точное решение системы дифференциальных уразвений, описывающей нестанионарный теплообмен в пористом образце, для случая, когда температура теплоносителя на его входе изменяется во времени по произвольному закону /4/. Для относительной температуры фильтруемого теплоносителя это решение выглядит так:

$$E = (\tau; y) = \exp(y - \frac{y}{n} - t) \int_{0}^{\tau - t} d\tau' \left[ \varphi(\tau') + \frac{\partial \varphi(\tau')}{\partial \tau} \right] \exp(\tau') \cdot I_0(\tau), \tag{1}$$

где:  $E( au; y) = rac{T_c - T_c^0}{T_c^0 - T_c^0}$  - относительная температура

теплоносытеля:

$$au=rac{lpha_*\cdot t}{\left(1-p
ight)
ho_cC_c}$$
 — относительная координата времени;  $y=rac{nlpha_{\nu}t}{p
ho_cC_cV}$  — относительная координата длины пористого образца;

 $n = \frac{p\rho_c C_c}{(1-p)\rho_c C_c}$  - отношение объемных теплоемкостей

теплоносителя и пористого материала;  $z=2\sqrt{\frac{y}{\pi}}(\tau-\tau'-y)$  —

безразмерный комплекс;  $l_{\rm o}(z)$  - модифицированная функция Бесселя;  $\varphi(\tau)=E(\tau;y=0)$  - функция включения, описывающая изменение температуры теплоносителя на входной границе пористого образца.

Значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\rm r}$  можно определить по экспериментальным данным как величину, минимизирующую функционал от рассотласования расчетных значений температуры теплоносителя на выходе из пористото образца  $E_{\rm m}(\tau)$  с измеренными значениями  $E_{\rm r}(\tau)$ . В данном случае  $\alpha_{\rm r}$  будет являться параметром согласования экспериментальных результатов и математической модели исследуемого процесса. Наиболее распространенным критерием оценки параметров моделей, который не требует априорного знания распределения ошибок, является критерий минимальной среднеквадратичной ошибъи. Метод наименьших квадратов применяется для оценки параметров как эмпирических моделей, основанных на явлениях переноса /5/.

В нашем случае критерий наименьших квадратов требует, чтобы оценка  $\alpha_{\nu}$  обеспечивала минимум функционалу:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left[E_{\pi}(\tau_i; y) - E_{\varepsilon}(\tau_i; y)\right]^2}{\sigma_i^2} , \qquad (2)$$

где:  $E_{_m}(\tau;y)$  - для конкретных параметров пористого образца и фильтруемого теплоносителя вычисляется по формуле (1);  $E_{_c}(\tau;y)$  - величина, полученная из эксперимента;  $\sigma_{_c}$ -среднеквадратичное отклонение.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_{v}} = \sum_{j=1}^{n} \frac{2 \left[ E_{m}(\tau_{i}, y) - E_{e}(\tau_{i}, y) \right]}{\sigma_{i}^{2}} \cdot \frac{\partial E_{m}(\tau_{i}, y)}{\partial \alpha_{v}} = 0.$$
 (3)

Последнее уравнение, являясь трансцендентным относительно  $\pmb{\alpha}_{v}$ , позволит определить искомую величину.

Разумеется, такой подход возможен лишь при наличии эффективного матаппарата для быстрого пересчета величин  $E_{\scriptscriptstyle m}({\sf \tau}_{\scriptscriptstyle c},{\sf y})$  в связи с необходимостью многократного вычисления минимизирующего функционала рассогласования при отыскании lpha. Исследования, проведенные с помощью IBM PC/AT-486 , подтверлили успешное использование для этой цели выражения (1). Поскольку в данном выражении присутствует произвольный SACON NEW PROPERTY OF THE SACRET RIGHT REPORT HOMES пористого образца, то следует более подробно рассмотреть методику обработки экспериментальных кривых в сечении y-0. Очевидно, что изменение температуры теплоносителя на входе пористого образца не зависит от исходных параметров его пористой структуры, поэтому функцию включения  $\phi(\tau) = E(\tau, y = 0)$ межно задать аналитической зависимостью, наиболее характерной для данного процесса, а ее окончательный вид определить, используя метод апроксимации экспериментальных результатов. Обработку экспериментальный кривых изменения температуры теплоносителя на входе пористого образца удобнее всего осуществлять ари помощи следующей функции:

$$E_m = (t, x = 0) = 1 - d e^{-k1t} - (1 - d) e^{-k2t}, \tag{4}$$

тде: t — время в секундах, а постоянные d,k1,k2, определяются в результате сравнения экспериментальных точек  $E_{\mathfrak{c}}(t_i,x=0)$  с соответствующими точками выбранной функции  $E_{\mathfrak{m}}(t_i,x=0)$ . Сама технология апроксимации выглядит следующим образом. Для определения постоянных величин d,k1,k2, опять же, по методу наименьших квадратов, составляется система уравнений, содержащая производные минимизируемого функционала по искомым параметрам:

$$\left| \frac{\partial S}{\partial d} = \sum_{i=1}^{n} \frac{2}{\sigma_{i}^{2}} \left[ E_{r}(t_{i}) - E_{r}(t_{i}) \right] \left( e^{-k\Omega_{i}} - e^{-k\Omega_{i}} \right) = 0$$
 (5)

$$\left\{ \frac{\partial S}{\partial k!} = \sum_{i=1}^{n} \frac{2}{\sigma_i^2} \left[ E_{\epsilon}(t_i) - E_{\epsilon}(t_i) \right] dt_i e^{-k!t} = 0 \right\}$$
 (6)

$$\left| \frac{\partial S}{\partial k2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{2}{\sigma_i^2} \left[ E_e(t_i) - E_e(t_i) \right] dt_i e^{-k2t} = 0.$$
 (7)

Решая систему (5)-(7), находим:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sigma_{i}^{2}} \left[ 1 - e^{-k2t_{i}} - E_{e}(t_{i}) \right] \left( e^{-k2t_{i}} - e^{-k2t_{i}} \right)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sigma_{i}^{2}} \left( e^{-k2t_{i}} - e^{-k2t_{i}} \right)^{2}}$$
(8)

$$k1 = k1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{2}{\sigma_{i}^{2}} \left[ E_{e}(t_{i}) - E_{e}(t_{i}) \right] dt_{i} e^{-k1t_{i}}$$
(9)

$$k2 = k2 - \sum_{i=1}^{n} \frac{2}{\sigma_{i}^{2}} \left[ E_{e}(t_{i}) - E_{e}(t_{i}) \right] (1 - d) t_{i} e^{-kt_{i}}$$
(10)

Параметр d находится непосредственно из уравнения (8), а параметры k1 и k2 вычисляются иттерационным методом. Тогда сама функция включения примет вид:

$$\varphi(\tau) = E \ (\tau, y = 0) = 1 - d \ e^{\omega 1\tau} - (1 - d) \ e^{\omega 2\tau}$$
 (11)

тде:  $\omega 1 = \frac{k1t}{\tau}$ ;  $\omega 2 = \frac{k2t}{\tau}$ 

При переходе от обычных пространственно-временных координат  $\kappa$  безразмерным параметр d остается неизменным. Вычисление

постоянных величин функции включения  $\phi(\tau)$ , реализуемое системой (8)-(10), и алгоритм определения искомой величины  $\alpha_r$  основанный на решении трансцендентного уравнения (3), объединены в одной программе расчета, входными данными которой являются значения экспериментальных точек кривых изменения температуры фильтруемого теплоносителя на входе и выходе исследуемого пористого образца, а также параметры его пористой структуры и теплофизические данные двух фаз, участвующих в теплообмене.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, позволяющей реализовать описанный выше метод определения коэффициентов теплоотдачи в пористых структурах с газообразным теплоносителем.

Исследуемый пористый образец 1 помещается в стакан 2, расположенный тонкостенный экспериментальной камеры 3, выполненной из текстолита. На входе и выходе пористого образца по потоку фильтруемого газа, встроены рабочие спаи термопар 4 и 5, а их холодные спаи расположены в термостате с таящим льдом 6. Каждая из подключена к своему одноканальному лвухкоординатному самописцу Н-307/1. Для обеспечения адиабатического режима теплообмена предусмотрен охранный подогреватель 7, позволяющий до минимума снизить тепловые потери с боковой поверхности пористого образца 1 и тонкостенного стакана 2. Охранный пологреватель изготовлен из тонкой нихромовой проволоки, расположенной в витках резьбы, выполненной на наружней боковой поверхности тонкостенного стакана 2. Такая конструкция позволяет практически мгновенно выводить охраняый пологреватель на требуемый режим, который можно задавать при помощи специального электронного устройства термеретулятора и вольтметра и амперметра, контролировать при ПОМОЩИ яключенных в одну электрическую цепь с нихромовой проволокой. Установка содержит также расходомер, состоящий из дроссельной шайбы 8 и водяного дифманометра 9; электронагреватель тазового потока 10 с терморегулятором

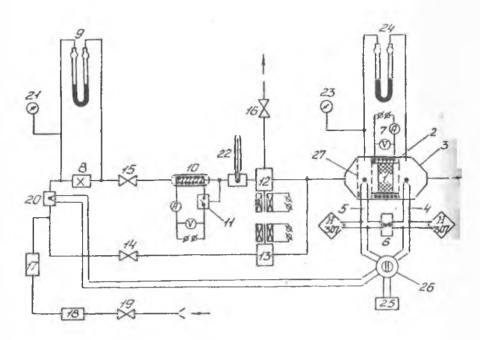


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для опредепения коэффициентов теплоотдачи в пористых структурах

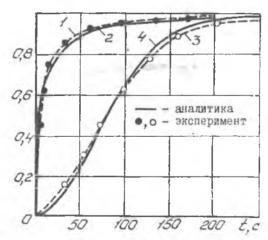


Рис. 2. Кривне изменения относительной температуры газа на входе — I, 2 и на выходе — 3, 4 пористого образца

11; двухходовой электромагнитный клапан 12; электромагнитный клапан 13; регулировочные вентили 14, 15, 16; фильтр-осушитель газового потока 17; релуктор низкого давления 18; запорный вентиль 19.

Контроль за температурой и давлением газового потока перед дроссельной шайбой 8 осуществляется при помощи термопары 20 и манометра 21. Температура газа, поступающего из нагревателя 10, контролируется по термомстру 22. Давление газа в экспериментальной камере 3 замеряется при помощи манометра 23, а перепад давления на пористом образце 1 фиксируется по водяному дифманометру 24. Потенциометр 25, подключенный к переключателю 26, позволяет определить абсолютную температуру газового потока. Для выравнивания профиля скоростей газового потока на входе пористого образца 1 установлена сетка 27 с размерами ячеек  $0.5 \times 0.5 Mm^2$ , изготовленная из проволоки диаметром 0.03 мм.

Порядок проведения эксперимента заключается следующем. Вначале определяется режим работы охранного подогревателя 7, соответствующий определенному расходу газообразного теплоносителя. Панная осуществляется в режиме прямого дутья до полного прогрева пористого образца 1. А именно, воздух, подаваемый из врадушной сети через вентиль 19, редуктор низкого давления 18, фильтр-осушитель 17 (пои закрытом вентиле 14), расходомер, регулировочный вентиль 15, включенный нагреватель 10, двухходовой клапан 12 (при закрытом вентиле 16), поступает в экспериментальную камеру 3. После окончательного прогрева исследуемого перистего образца на нихромовую нить охранного подогревателя подается такое напряжение постоянного тока, при котором показания термопар 4 и 5 становятся одинаковыми. По показаниям вольтметра и амперметра фиксируется выделяемая тепловая мощность охранного подогревателя. Далее осуществляется подготовительная стадия эксперимента, т.е. установка выводится на требуемый режим фильтрации газового потока, а экспериментальный пористый образец 1 - в исходное

состояние. Иля этого при помощи регулировочного вентиля 15 и воляного пифманометра 9 устанавливается определенный расход газа, которому соответствует требуемая скорость потока. Последний, фильтрации нагреваясь электронагревателе 10. направляется электромагнитным клапаном 12 в обводную магистраль через открытый вентиль 16 При помоши регулировочного вентиля 16 - в атмосферу. осуществляется также выравнивание гидравлического сопротивления газовой магистрали прямого дутья (т.е. через экспериментальную камеру 3 с исследуемым пористым образцом) и обводной магистрали. Холодный воздух из сети через вентиль 14 и открытый электромагнитный клапан 13 поступает в экспериментальную камеру 3, после чего достигается равенство показателей термопар 4 и 5. Данная процедура приводит пористый образец 1 в исходное состояние, а термопара 4 зафиксирует его начальную температуру  $\mathcal{T}$ . После настройки самописцев Н-307/1 по временной и вертикальной развертке на требуемую скорость протяжки и необходимую чувствительность можно приступить к основной эксперимента. Основная часть эксперимента осуществляется в режиме прямого дутья. Начало эксперимента фиксируется синхронным переключением электромагнитных клапанов 12 и 13. При этом клапан 13 отсекает холодный поток, а клапан 12 направляет нагретый газ в экспериментальную камеру 3. Одновременно с переключением электромагнитных клапанов запускается и подогреватель. Рорячая продувка ведется до момента полного прогрева пористого образца 1, который опять же зафиксируется равенством показаний термопар 4 5. Последние позволят определить температуру установившегося горячего потока  $T_i^0 = T_c(x; t=0)$  . В установившемся режиме определяется также давление газа в экспериментальной камере 3 по манометру 23, перепад давления на пористом образце по водяному дифманометру 24 и уточняется расход газового потока. На этом экспериментальная часть метода определения

коэффициента теплоотдачи заканчивается. Таким образом можно получить набор необходимых данных для расчета искомой неличины, в том числе две экспериментальные кривые изменения температуры газового потока на входе и выходе пористого образца. Значения точек этих кривых, выбранных с определенным шагом по времени будут являться входными параметрами для программы расчета коэффициента теплоотдачи а..

Качество апроксимации экспериментальных кривых изменения температуры теплоносителя на входе пористого образца теоретической зависимостью (4) продемонстрировано на рис. 2. Здесь же (рис. 2) показаны две кривые изменения температуры газового потока на выходе пористого образца, одна из которых получена из эксперимента (при помощи термопары 5 и самописца), а вторая получена расчетным путем с использованием зависимости (1) и коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\nu}$ , найденного в результате решения уравнения (3). Результаты обработки многочисленных экспериментальных данных по указанной выше методике показали, что относительная погрешность определения искомой величины  $\alpha_{\nu}$  не превышает 10-15%.

Далее, для представления и обобщения полученных экспериментальных результатов необходимо сделать выбор критериальных зависимостей, наиболее полно отражающих динамику исследуемого процесса.

Анализ предшествующей практики, представленный в работах /1/, /6/ говорит о том, что единого мнения среди исследователей по данному вопросу нет. Поскольку пористая насадка представляет собой твердое тело с внутренними каналами неправильной формы, то выбор харэктерного размера пор весьма условный. Изменение с температурой теплофизических параметров фильтруемого теплоносителя и пористого образца, а также влияние на эксперимент побочных субъективных факторов, усложняют обработку опытных данных и их приведение к простому виду. Этим, возможно, объясняется разнообразие критериальных зависимостей, описывающих

теплообмен в пористых насадках. Существенный разброс мнений наблюдается в первую очередь при выборе характерного размера для определения числа Рейнольдса. Для широкого спектра пористых структур: порошковых металлов, волокон, спиралей, сеток, вспененных металлов исследователями были использованы такие характерные параметры как  $\frac{b}{\alpha}$  (b-вязкостный,  $\alpha$  — инерционный коэффициенты); средний диаметр частиц исходного порошка d,; средний размер пор d, и т.д.

На наш ваглял, наиболее истинным среди перечисленных, характерным размером можно считать тот, который может быть с постаточной точностью определен для конкретного вида пористой насадки. Что касается критерия Нуссельта, то вдесь также нет единого мнения. Например, ряд исследователей /7, 8, 9/ использовали поверхностный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , имеющий размерность  $B \tau / m^2 K$ . B этом случае для определения объемной плотности передачи теплоты от насадки к теплоносителю:  $Q_{u} = \alpha_{v}(T_{v} - T_{v})F_{v}$  необходимо предварительно измерить величину удельной внутрипоровой поверхности F. используемого пористоро материала. Последнее существенно снижает достоверность экспериментальных данных, т.к. определение величины  $F_{\epsilon}$ , непосредственно участвующей в теплообмене, для каждого вида пористой структуры является довольно сложной задачей и осуществляется с весьма большой погрешностью. Большая часть исследователей для определения критерия Nu использует внутриобъемный коэффициент теплоотдачи a,, имеющий размерность  $\mathrm{Bt/m}^3\mathrm{K}$ , который, на наш вэгляд, является наиболее достоверной и доступной величиной.

По предложенной методике определения коэффициентов теплоотдачи и на экспериментальной установке, описанной выше, авторами был исследован ряд пористых образцов, выполненных из металлорезины МР. Данный материал получают колодным прессованием вытянутой и дозированной по весу металлической проволочной (более подробное описание см. в

/10/). Экспериментальные образцы имели форму дисков пиаметром 50 мм и толшиной 10 мм. Исследованный диапазон по пористости образцов составил от 50 до 85%, а по диаметру проволоки исходного материала от 90 до 300 мкм. В качестве газообразного теплоносителя был использован воздух из воздушной сети.

Экспериментальные данные по теплообмену в пористых образцах из МР, выполненных из нихромовой проволоки лиаметром 100 мкм и медной проволоки диаметром 250 мкм, приведены на рис. 3 и 4 в виде зависимости  $Nu=\phi(\mathrm{Re})$ . Здесь было использовано стандартное представление критерия Рейнольдса вида  $\Re e = \frac{d_s V}{v}$ , а критерия Нуссельта как  $Nu=rac{lpha_{s}}{1}$ . Обращает на себя внимание и настораживает факт характерного слоения экспериментальных зависимостей, полученных для образцов разной пористости, выполненных из проволоки одного диаметра. Аналогичный результат , йетромиривье хинальидетидя веильны ей кртеввижудьного полученных для сетчатых насадок (см., капример /1/,/6/,/7/). Возникают сомнения по поводу того, что такое представление критерия Nuадекватно отражает динамику исследуемого В связи с этим авторы попытались получить процесса. критериальную зависимость  $Nu = \varphi(\mathbf{Rc})$  , претендующую на более глубокое обобщение экспериментальных результатов. Ниже 5удет показано как аналитическим путем можно получить простую расчетную формулу вида  $Nu = A \operatorname{Re} \operatorname{Pr}$ , которая хорошо согласуется с теми, что были выработаны предшествующими исследователями эмпирическим путем.

Ранее (см. /11/), авторами было получено выражение для относительного температурного напора  $\Delta T(\tau;y) = \frac{T_c}{T_c^0} - \frac{T_c}{T_c^0}$  , соторый, собственно, и определяет местную теплоотдачу в тористом образце с фильтруемом однофазным теплоносителем. Это выражение имеет следующий вид:

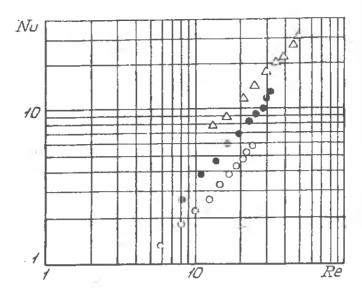


Рис. 3. Экспериментальные данные по теплообмену в пористых образцах, выполненных из нихрома

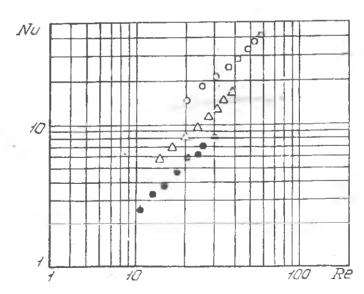


Рис. 4. Экспериментальные даяные по теплообмену в пористых образцах, выполненных из меди

$$\Delta \overline{T}(\tau; y) = \exp(y - \tau - \frac{y}{n}) I_0(z). \tag{12}$$

Для момента равенства теплоемкостей пористой насадки и теплоносителя (определение этого момента дано в /11/), т.е.

когда: 
$$\tau = \frac{y(n+1)}{n}$$
, a  $z = \frac{2y}{n}$ ,

выражение (12) примет вид:

$$\Delta \overline{T}(\tau = \frac{v(n+1)}{n}, y) = \exp\left(-\frac{2y}{n}\right) I_0\left(-\frac{2y}{n}\right). \tag{13}$$

Характер поведения функции, описанной последним выражением, был также исследован в работе /11/. Таким образом, мы имеем зависимость (14), где исключен временный параметр $\tau$  и присутствуют все параметры, характеризующие теплоотдачу в пористой структуре. Дальнейшие математические выкладки будут связаны с преобразованием аргумента  $\frac{2y}{x}$  к виду ,

будут связаны с преобразованием артумента — к виду п

содержащемустандартные критерии  $\mathit{Nu}$  и  $\mathsf{Re}$ :

$$\frac{2y}{n} = \frac{2\alpha_{\nu}x}{p\rho_{\nu}C_{\nu}V} = \frac{2\alpha_{\nu}d_{\nu}^{2}}{\lambda}\frac{x}{d_{s}}\frac{v}{pVd_{s}}\frac{\lambda}{\rho_{\nu}C_{u}}\frac{1}{\lambda} = \frac{2x}{d_{s}}\frac{Nu}{\text{RePr}}.$$
(14)

Тогда выражение (14) примет вид:

$$\Delta \overline{T} = \exp\left(-\frac{2x}{d_2} \frac{Nu}{\text{Re Pr}}\right) I_0 \left(\frac{2x}{d_2} \frac{Nu}{\text{Re Pr}}\right), \tag{15}$$

В последнем выражении, собственно, уже присутствует трансцендентная связь между критериями Nu и Re. Очевидно, что использование формулы (15) для инженерных расчетов весьма затруднительно. Выражение (15) можно существенно упростить, если воспользоваться свойствами бесселевых функций /12/. При значениях аргумента z>>1 , функцию бесселя  $I_k(z)$  можно представить в виде ряда, взяв, например, для анализа первые два члена этого ряда. Для функции бесселя нулевого порядка это будет выглядеть так:

$$I_0(z) = \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \left(1 + \frac{1}{8z}\right). \tag{16}$$

В нашем случае аргумент z имеет вид:

$$z = \frac{2x}{d_1} \frac{Nu}{\text{RePt}}$$
 (17)

Как будет показано ниже (см. таблицы 1-3), действительные значения аргумента z, реализуемые в эксперимента, близки к z=20. Возвращаясь к  $\{16\}$ , заметим, что вклад уже второго члена ряда в общую сумму очень мал, его величина составляет около 0.5 % от величины первого члена этого ряда. Поэтому, для дальнейшего анализа вполне достаточно взять первый член ряда, то есть  $\{16\}$  перепишется так:

$$I_0(z) = \frac{e^z}{\sqrt{2\pi zz}} {18}$$

А выражение (16) примет вид:

$$\Delta \overline{T} = \frac{1}{2\sqrt{x} \frac{x}{d} \frac{Nu}{\text{RePr}}}$$
 (19)

или: 
$$Nu = \frac{1}{4\pi \left(\Delta \overline{T}\right)^2} \frac{d_x}{x} \operatorname{Re} \operatorname{Pr}.$$
 (20)

Таким образом, аналитическим путем мы получили частный случай стандартной эмпирической зависимости:

$$Nu = A \operatorname{Re}^{n}_{+} \tag{21}$$

где:  $A = \frac{\Pr}{4\pi \left(\Delta T\right)^2} \frac{d_*}{x}$  - для конкретного пористого образца и фильтруемого теплоносителя величина постоянная. А показатель степени n=1 говорит о том, что, начиная с некоторого z, который определяется выражением (17), существует, так называемая, область линеаризации

$$Nu'' = \frac{\alpha_{p} d_{p}^{-} x}{\lambda}. \tag{22}$$

Таблица I Экспериментальные результаты продувки воздухом пористых образцов из нихрома

$G_M \cdot 10^{-3}$	Re	d	Nυ	Z	ΔΤ	Num	St
кг/с		Вт/м <sup>Э</sup> К					
0,85	10,42	0,57	3,37	23.15	0,083	84,2	0,462
I,08	12,69	0,70	4, 12	23,19	0,083	102,6	0,463
1.36	T5,00	0,8I	4,69	22,33	0,084	118.4	0,446
I,66	17,14	0,91	5,33	22,20	0,084	I35,3	0,444
2,04	I9,40	1,10	6,47	23,82	0,082	I60,7	0,476

Табляца 2 Экспериментальные результаты продувки воздухом пористых образцов из меди

Gm 103	Re	d	Nu	Z	ΔΤ	Nu <sup>m</sup>	St
кг/с		BT/M3K					
0,83	12,57	0,62	3,18	I9,25	0,091	84,7	0,36I
I.04	15,00	0,73	3,74	I9,04	0.092	99,9	0.356
1,31	I7,83	0,92	4,67	19,96	0,089	124,6	0,374
1,63	20,82	I,I0	5,8I	20,50	0,088	I49.5	0,398
I,99	23,33	1,19	6,06	19,8	0,090	I6I.7	0,371

Таблица З Экспериментальные результаты продунки воздухом пористых образцов из алюминия

$G_{M} \cdot 10^{-3}$	Re	d	Nu	Z	ΔΤ	Num	St
кг/с		BT/M <sup>3</sup> K					
0,83	I2,II	0,61	I,99	I5,70	0,100	66,33	0,234
I,06	14,48	0,75	2,45	I6,II	0,099	81,66	0,24I
I,32	17,27	0,94	3,07	16,93	0,097	102,33	0,253
I,65	20,23	1,12	3,65	I6,97	0,097	I2I,60	0,257
I,99	22,37	I,20	3,90	<b>16,</b> 65	0,098	130,00	0,240

Тогда с учетом (23) критериальная зависимость (21) выглядит Tak:

$$Nu'' = A \operatorname{Re} \operatorname{Pr}_{1} \tag{23}$$

$$rightarrow A = \frac{1}{4\pi \left(\Delta \overline{T}\right)^2} \,. \tag{24}$$

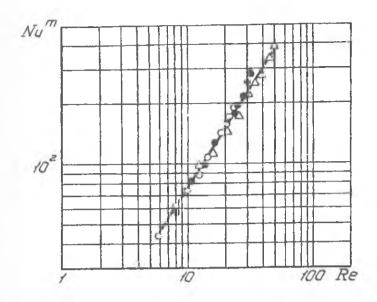
В результате, те же экспериментальные точки (см. рис. 3 и 4) ложатся на одну прямую, представленную выражением (23), как показано на рис. 5 и 6. Это объясняется тем, что величина  $\Delta \vec{T}$  , фиксирующая отношение разности локальных температур пористого образца и фильтруемого теплоносителя к их начальному температурному вапору в момент равенства их теплоемкостей, не зависит от числа Рейнольдса, а определяется (как было показано в предыдущей работе автора /11/) лишь величиной отношения объемных теплоемкостей двух фаз, участвующих в теплообмене. Разумеется, последнее утверждение справедливо только в рамках исходной системы уравнений теплообмена, предполагающей идеальную пористую структуру. Насколько согласуются результаты теоретического анализа с результатами проведенных экспериментов достаточно информативно продемонстрировано в таблицах 1-3. В этих таблицах собраны некоторые экспериментальные данные по теплообмену в пористых образцах из материала МР, выполненных их нихрома (Х20Н8О), электролитической меди и алюминия. Из таблицы 1-3 видно, что величина  $\Delta \bar{T}$  , как и параметр z. остаются неизменными (в пределаж погрешности эксперимента), т.е. не зависят от режима фильтрации теплоносителя, а определяются в данном случае величиной объемной теплоемкости материала, формирующего пористую

структуру (т.е. твердой фазы), имеющей размерность  $\frac{\mathcal{A}_{\mathcal{N}}}{\mathcal{N}^{3}}$ .

Величина объемной теплоемкости составляет:  $C_{\nu}=3.85\,\frac{\cancel{L} \infty}{\cancel{M}^3\,\,K}$  , для меди  $C_{\nu}=3.45\,\frac{\cancel{L} \infty}{\cancel{M}^3\,\,K}$  , для алюминия

 $C_{\rm v}=2.43\,rac{{\cal A} sc}{{
m M}^3~k}\,$  (табличные данные взяты для температурного

диалазона, реализуемого в эксперименте). При этом средняя величина параметра z у данных металлов следующая: у нихрома



Рыс. 5. Экспериментальные данные по теплообмену в пористых образцах, выполненных из нихрома

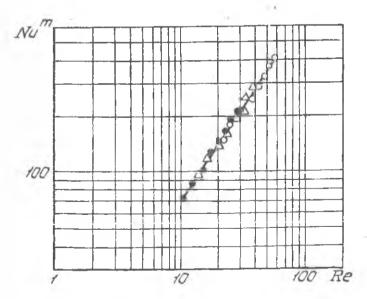


Рис. 6. Экспериментальные данные по теплообмену в пористых образцах, выполненных из меди

z=23,2; у меди z=19,7; у алюминия z=16,5. Сравнительный анализ показывает, что отношение величин объемных теплоемкостей этих материалов равно отношеник соответствующих величин параметров z, т.е. здесь обнаруживается линейная зависимость параметров z и  $\Delta T$  от величины объемной теплоемкости твердой фазы, участвующей в теплообмене. Для более полного осмысления аналитических результатов следует рассмотреть теплофизический смысл безразмерного параметра z. В выражении (17) параметр z определен в виде комплекса, содержащего критерии Nu, Re, Pr. Очевидно, что данное выражение можно переписать следующим образом:

$$z = 2 \frac{x}{d_{\star}} St_1 \tag{25}$$

где:  $St = \frac{Nu}{\text{Re Pr}}$  - критерий Стантона.

Из анализа (25) следует, что параметр z есть не что иное, как критерий Стантона, приведенный к конкретным параметрам пористой насадки и характеризует отношение плотности теплового потока, передаваемого через границу раздела двух фаз, участвующих в теплообмене, т.е. твердое тело фильтруемый теплоноситель к плотности теплового потока, переносимого последним.

В заключение представим результаты обработки экспериментальных данных, полученных для пористых образцов, выполненных из указанных металлов. В качестве формы представления выбрана зависимость (23):  $Nu'' = A \operatorname{Re} \operatorname{Pr}$ , где величина постоянной A, определяемой по формуле (24), также как и величина  $\Delta T$  зависит от объемной теплоемкости твердой фазы. Установлено, что линейная зависимость A от  $C_v$  имеет

простой вид:  $\varLambda=2,04~C_{\rm v}$ , где  $C_{\rm v}$  имеет размерность  $\left[\frac{\mathcal{A} \varkappa}{M^3~K}\right]$ .

Тогда значения постоянной A для исследованных пористых металлов будут следующим: для пористых образцов из нихрома A=7,7 ; из меди A=6,9 ; для алюминия A=4,8 .

- $T_{\varepsilon}^{0}=T_{\varepsilon}(x;t=0)$  начальная температура пористого материала;
- $T_z^0 = T_c \, (x=0; t=\infty)$  температура теплоносителя на входе пористого материала в установившемся режиме;  $T_c$  и  $T_c$  их текущие значения;
- I и x время и линейная координата толщины пористого образца;
- V линейная скорость потока теплоносителя :
- $ho_{
  m r}$ ,  $C_{
  m c}$  и  $ho_{
  m c}$ ,  $C_{
  m c}$  удельная плотность и удельная теплоемкость теплоносителя и твердой фазы пористого материала.

## Список использованных источников

- 1. Криогенные газовые машины /А.Д.Суслов, Г.А.Гороховский, В.Е.Полтораус, А.М.Горшков.-М.:Машиностроение,1982,-213с.,ил.
- 2. Караваев Н.М., Майков В.П. Метод определения коэффициентов теплоотдачи в слое зернистого материала //Изв.АН СССР. Отделение технических наук.-N 6.
- T.E.Shumann.-W.Heat Transfer a Liquid Flowing per porous prism.-T.of Franklin Institute, 208, 405, 1929.
- 4. Нестационарный теплообмен в пористых структурах /Изжеуфов Е.А., Ратис Ю.Л, Ревякин А.В.; Куйбыш.авиац.ин-т.-Самара,1991.-14с.Деп.в ВИНИТИ 13.06.91 № 2483-891.
- Уиммельблац Д. Анализ процессов статическими методами //М.: Мир, 1973.-975с.
- 6. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов /В.М.Поляев, В.А.Майоров, Л.Л.Васильев.-М., Машиностроение, 1988.-168c.:ил.
- 7. Микулин Е.И., <u>Шевич</u> Ю.А. Экспериментальное исследование теплообмена в сетчатых матрицах.-ИФЖ.т.ХХІІ,1972, № 6, с.1116-1117.
- Kar K.K., Dybbs A. Internal Heat Transfer Cofficients of Porous Metal.//Heat Transfer Symposium Series.HTD.1982.V.22.P.81-91.
- Koh I.C.Y., Dutton I.L., Benson B.A. Fundamental Study of Transpiration Cooling.//NASA CR-134523.1973.163p.
- 10 Пористые проницаемые материалы.: Слрав. изд. /Вод ред. Белова С.В. М.: Металлургия,1987,с.266.
- 11. Аналитическое исследование нестационарното теплообмена в пористых структурах / Изжеуров Е.А., Ратис Ю.Л., Ревякин А.В., Шорин В.П.; Куйбыш.авиац.ин-т.-Куйбышев,1988.-18с.Деп.в ВИНИТИ 24.01.89 № 549-В89.
- 12. Справочник по специальным функциям. Под редакцией М.Абрамовица и И.Стиган.- М.: Наука, Главная родакция физико-математической литературы, 1979.-832с.