

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ШАРОВЫХ ТВЭЛОВ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В.А. Климова, В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин

ГОУВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ им.Первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург



Рассмотрены особенности гидродинамики и теплообмена при радиальном течении газа в засыпке из шаровых твэлов. Исследования показали, что интенсивность теплоотдачи шаровых элементов определяется как вихреобразованием на их поверхности, так и ламинаризацией газового потока, связанной с его ускоренным течением. Получено достаточно простое выражение изменения числа Nu в зависимости от числа Re в диапазоне $5 \cdot 10^2 - 10^4$ для шаровых элементов диаметром 7, 15 и 22 мм, учитывающее влияние геометрического фактора на теплоотдачу.

В технологических и энергетических установках довольно часто требуется подводить (или отводить) теплоту к теплоносителю (газу или жидкости), движущемуся в порах зернистого слоя, который состоит из отдельных элементов различной формы. Примером могут служить контактные аппараты для проведения каталитических реакций, аппараты термической обработки топлива, ядерные энергетические реакторы и т.д. В частности, сферические элементы с внутренним тепловыделением встречаются не только в различных типах ВТГР, но и в системах с высокочастотным нагревом при джоулевом нагреве контактирующих электропроводящих зерен. Для таких сферических элементов используется широко распространенный термин «твэл», относящийся как к топливным элементам ядерных установок, так и к другим технологическим устройствам с внутренним тепловыделением [1].

Настоящая работа является продолжением экспериментальных исследований взаимодействия газового потока с шаровыми твэлами при радиальном течении теплоносителя, гидродинамические и теплообменные свойства которого существенно отличаются от таковых при осевой схеме движения теплоносителя. Вопросу определения коэффициента теплоотдачи газового потока с шаровым элементом, а также влиянию гидродинамических условий внутреннего течения теплоносителя посвящено значительное количество работ, приведенных, например, в обзорах [1, 2], где тем не менее не учитываются обстоятельства, играющие роль скрытых параметров. В частности, при радиальном течении теплоносителя характеристики газового потока непрерывно меняются в соответствии с возрастанием скорости течения и уменьшением градиента давления в направлении от входного канала с большим наружным радиусом r_n к выходному каналу с меньшим радиу-

сом r_b . При этом число Рейнольдса потока непрерывно возрастает обратно пропорционально в направлении радиуса установки при постоянном массовом расходе газа и может меняться от ламинарного режима на входе до турбулентного уже в средней зоне течения.

Расчеты коэффициента теплоотдачи по известным формулам с осевым течением теплоносителя даже с учетом изменения числа Рейнольдса в направлении течения могут привести к заметной погрешности в связи с появлением эффекта «ламинаризации» потока, связанного с ускорением его движения в направлении течения (конфузорный эффект). Как показывают исследования [3], подобные условия течения приводят к существенным изменениям структуры потока в пограничном слое на поверхности обтекания и заметному снижению коэффициента теплоотдачи. При этом турбулентный пограничный слой вблизи стенки становится по своим свойствам ближе к ламинарному вследствие подавления механизма турбулентного переноса. Параметром ламинаризации в схеме с радиальным течением

потока является величина $K = \left(\frac{\nu}{U^2} \right) \cdot \left(\frac{dU}{dr} \right) = 2\pi \left(\frac{G}{H} \right)^{-1} > 2 \cdot 10^{-6}$, где U – скорость потока в межшаровом пространстве; G/H – расход газа по отношению к высоте шарового слоя; ν – кинематическая вязкость. В наших опытах параметр K менялся в пределах $12 \cdot 10^{-6} - 35 \cdot 10^{-6}$ в зависимости от расхода газа.

Настоящие исследования проводились на установке с двумя коаксиально расположенными коллекторами с перфорацией для прохода газа через слой пластмассовых шаров диаметром 7, 15 и 22 мм, которые заполняли пространство между ними [4]. Гидродинамическая структура потока анализировалась в диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^2 - 10^4$ путем измерений пульсаций статического давления и их соответствующих частот с помощью шаровых приемников давления, размещаемых внутри слоя. Значения коэффициента теплоотдачи определялись по нестационарной методике с предварительным нагревом медных шаров-калориметров, которые затем помещались между шарами слоя и продувались воздухом. Для сравнения аналогичные исследования проводились на установке прямоугольного сечения 95×120 мм при осевом течении газа с шарами $d_{ш} = 15$ мм в условиях отсутствия ускоренного потока.

Значения пульсаций статического давления $\sqrt{\bar{p}^2}$ по отношению к динамическому напору $q = 0,5 \rho U^2$, замеренные вдоль радиального направления потока в установке, характеризуют эффективность превращения кинетической энергии газового потока в энергию пульсационного давления, т.е. в энергию турбулентного потока. При радиальном течении, как это видно из рис. 1, параметр $\eta = \sqrt{\bar{p}^2} / q$ достигает максимальных значений при низких скоростях потока вблизи входного коллектора и падает до 0,10–0,20 с увеличением числа $Re \geq 10^3$. В то же время при осевом течении воздуха значение параметра η менялось незначительно в зависимости от скорости течения в разных точках в направлении движения потока и практически совпадало с предыдущим случаем при $Re \geq 2 \cdot 10^3$.

Следует отметить, что пульсации статического давления потока непосредственно связаны с процессом вихреобразования, развивающегося на поверхности шаров и создающего импульсы давления каждый раз при срыве вихрей с поверхности в поток [5]. Между числом Струхала, характеризующим процесс генерации крупномасштабных вихрей, и интенсивностью пульсаций давления существует непосредственная связь:

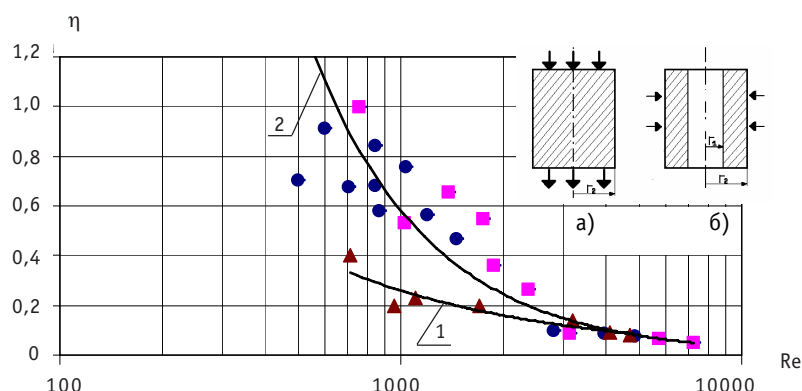


Рис. 1. Изменение относительной интенсивности пульсаций статического давления от числа Рейнольдса: 1, а и 2, б – осевая и радиальная схемы движения газа

$$S = \frac{f \cdot d_{\text{ш}}}{U} \sim \beta \cdot \eta^{0.5}, \quad (1)$$

где f – частота пульсаций давления; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шара; β – численный коэффициент.

Диапазон пульсаций давления содержит как широкий частотный спектр собственно турбулентного течения потока, так и характерные значения частот срыва вихрей, отвечающих числу Струхала, энергетический уровень которых на порядок выше, чем уровни турбулентных пульсаций. Из рис. 2 видно, что характер вихреобразования, определяемый числом Струхала, линейно падает в направлении радиального течения газа при соответствующем возрастании числа $Re_r \sim 1/r$, в то время как в случае осевого течения потока меняется незначительно. Диапазон характерных частот как в первом, так и во втором случаях составлял 60–90 Гц при $Re_r \leq 5 \cdot 10^2$ и возрастал до 140–220 Гц с увеличением числа Рейнольдса.

Возрастание интенсивности вихреобразования, как и увеличение турбулентности потока способствуют интенсификации теплообмена, в то время как его ламинаризация связана с уменьшением теплопереноса в пограничном слое. Взаимодействие этих факторов отчетливо проявляется при анализе зависимости опытных данных коэффициента теплоотдачи от положения шара-калориметра в установке (рис. 3). Если при возрастании числа Nu с увеличением числа Re наклон прямых примерно одинаков, то их положение на графике определяется координатой – радиусом r в направлении потока газа. Влияние геометрического факто-

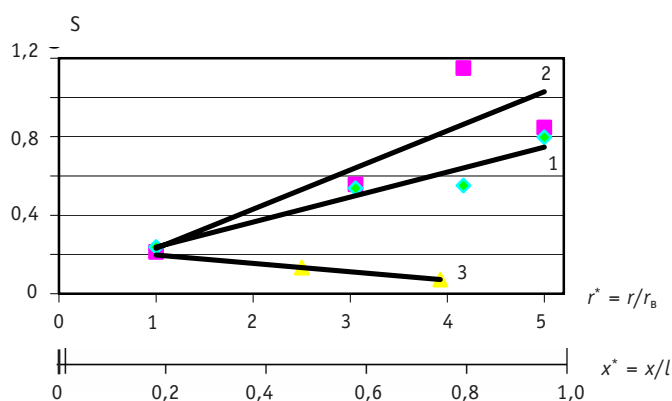


Рис. 2. Изменение числа Струхала в направлении потока газа: r^* и x^* – безразмерные координаты для радиального и осевого течений газа; 1 – радиальное течение, $G/H=0,36 \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $G/H=0,66 \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – осевое течение, $Re=10^3$

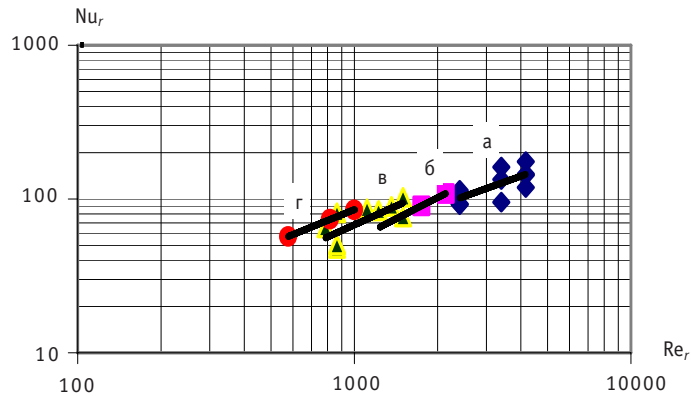


Рис. 3. Зависимость теплоотдачи шара-калориметра от числа Re_r при различном его положении внутри установки относительно внутреннего радиуса r_b , r/r_b : а – 1,3; б – 3; в – 4,2; г – 4,8

ра на теплоотдачу в дальнейшем учитывалось параметром χ_r , который использовался в работе [4] в качестве характеристики радиального течения потока.

При обобщении полученных результатов по теплообмену шаров различного диаметра в качестве масштабной величины использовалось выражение, отвечающее осевому течению теплоносителя [2]:

$$Nu_0 = c \frac{(1-\varepsilon)^{0,33}}{\varepsilon} \cdot Re^n, \quad (2)$$

где ε – пористость слоя шаров; c и n – численные коэффициенты.

В результате получено соотношение, учитывающее все перечисленные факторы, связанные с особенностью радиального течения газа, в виде

$$Nu_r = 0,36 \frac{(1-\varepsilon)^{0,33}}{\varepsilon} \chi_r^{-1,6} \cdot Re_r^{0,62}; \quad Re_r = \left(\frac{G}{2\pi H} \right) \cdot \frac{1}{r};$$

$$Nu_r = \frac{\alpha_r d_{ш}}{\lambda_r}; \quad \chi_r = 4 \left(\frac{r}{r_b} + \frac{r_b}{r} + 2 \right)^{-1}, \quad (3)$$

где α_r – местное значение коэффициента теплоотдачи в области $r_H < r < r_B$; r , r_B и r_H – текущее, внутреннее и наружное значения радиусов установки; λ_r – коэффициент теплопроводности газа; индекс r относится к радиальной схеме течения газового потока.

Полученное уравнение переходит в формулу теплоотдачи для осевого течения теплоносителя при $r/r_b \leq 1,15$. Из рис. 4 видно, что выражение (3) удовлетвори-

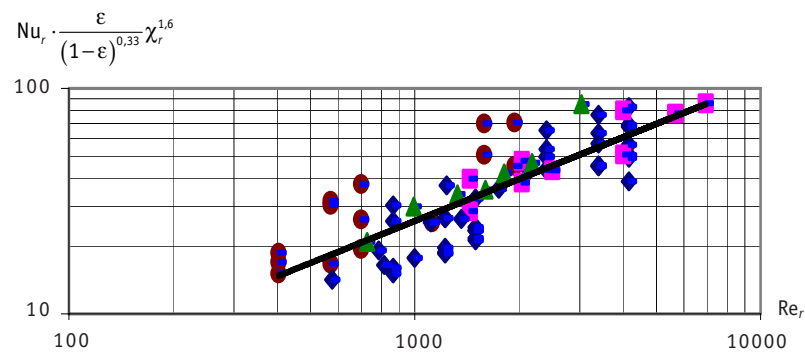


Рис. 4. Сопоставление опытных данных по теплоотдаче шаровых элементов различного диаметра ($d_{ш} = 7, 15$ и 22 мм) с аппроксимирующей формулой (3)

тельно отражает зависимость теплообмена шаров различного диаметра в диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$ с погрешностью, не превышающей 18%.

Достаточно простая структура формулы (3) позволяет оценить распределение коэффициента теплоотдачи и температуру отдельных твэлов в различных внутренних зонах энергетических реакторов и промышленных установок в зависимости от схемы течения газового теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск: С.О. АН СССР, 1984. – С. 162.
2. Аэров М.Э., Тодес О. М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем//Химия. – 1979. – С. 175.
3. Леонтьев А.И., Шитов Е.В., Афанасьев В.Н. и др. Исследование пульсационной структуры теплового пограничного слоя в условиях ламинаризации потока. Тепломассообмен – IV, Т. 1, Ч. II. – Минск, 1980. – С. 136.
4. Климова В.А., Пахалуев В.М., Щеклеин С.Е. Геометрические и гидродинамические характеристики ВТГР с радиальной раздачей теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 1. – С. 130-134
5. Довгаль А.В., Сорокин А.М. Неустойчивость течения в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя к сходу периодических вихрей//Теплофизика и аэродинамика. – 2001. – Т. 8. – № 2. – С. 189-197.

Поступила в редакцию 1.12.2008

measurement data accordance was less then 10% under the short cooling times (< 100 days).

УДК 621.534.23

Modeling of Three-Dimensional Thermo-Hydraulic Processes in VVER-1000 Reactor's Core with Program Complex TRETON \N.N. Davidenko, A.S. Korsun, Y.A. Maslov, I.G. Merinov, V.S. Kharitonov, B.E. Shumsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 13 pages, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The improvement of porous body model for the description of heat-hydraulic processes in VVER-1000 reactors core with non-cover fuel assemblies has been done. Program complex TRETON for 3D-modelling non-stationary thermal and hydrodynamic processes has been created. Heat-hydraulic module TRETON has been tested by comparison of calculation results to the analytical decision of model heat transfer problem. Comparison of calculation results coolant temperature and speed for a nominal operating mode VVER-1000 reactors core with independent calculations under certified program NOSTRA has been spent.

УДК 621.039.517.5

Superposition Method in Modeling of Temperature Field in Heat Exchange Devices by Means of Tracer Concentration Field \V.N. Delnov, Y.D. Levchenko, S.F. Shepelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

The tracer is locally injected in turn into each characteristic area at the inlet of the flow part of the test section, while at the outlet the responses – tracer concentrations – are measured in the flow of working fluid. The local flow rate of tracer is proportional to the flux of thermal energy through the characteristic area. The sum of measured concentrations from each local tracer injection is proportional to local temperature at the outlet from the flow part of the test section. The application of response superposition method enables one to increase the accuracy in modeling the temperature field and simplify the design of test section for studying mixing processes in a heat exchange device.

УДК 621.039.564

Correlation Flowmeter for Measuring Low Coolant Velocities \B.V. Kebabze, A.N. Opanasenko, V.A. Shurupov, M.S. Timchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

When modeling the heat emergency removing system of fast reactor on water test rig, the natural circulation velocity is evaluated by the thermocorrelation method. The calibration of the measuring channel for internal and external gap of model subassembly is carried out on a small test facility with forced circulation. The frequency range of signal processing is defined and correction factors for true flowrate calculation are obtained. The design improvement of model subassembly is proposed, in order to eliminate the swirl effect.

УДК 621.039.52.034.3: 532.546

Hydrodynamics and Heat Exchange Features of the Pebble Bed in Radial Coolant Flow \V.A. Klimova, V.M. Pahaluyev, S.Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

Regarded are the peculiarities of the radial flow in the pebble bed. The investigation shows that the spherical elements heat emission intensity is defined by the surface vortex generation as well as by gas flux laminarization connected with its accelerated flow. A rather simple formula for Nu number as a function of Re number in a range of $5 \cdot 10^2 - 10^4$ for the spherical elements diameter 7, 15 and 22 mm considering the geometrical parameter influence on the heat exchange is received.

УДК 681.51:621.039.534.6

Automatic Control System of Oxygen Thermodynamic Activity for Lead Bismuth Eutectic Coolant \P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyllin, A.A. Simakov, V.S. Lanskix, M.E. Chernov, R.P. Sadovnichiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 6 titles.

This article is devoted to develop of the oxygen thermodynamic activity automatic control system for circulating facilities with lead and lead-bismuth coolant. The basic preconditions for creation of the automatic control system and problem state of studying the oxygen rules with reference to the «SVBR-75/100» Reactor Installation are analyzed. For the first time, with reference to conditions of the «SVBR-75/100» Reactor Installation the opportunity of use of the oxygen thermodynamic activity automatic control system by a solid-