

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТГР С РАДИАЛЬНОЙ РАЗДАЧЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

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

*ГОУВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»*



Изложены результаты анализа геометрических характеристик активной зоны реактора с шаровыми твэлами при радиальном течении газа в зависимости от требующихся энергетических и конструкционных параметров, проведено сравнение с реактором при осевом течении теплоносителя. Полученные экспериментальные соотношения коэффициентов гидравлического сопротивления (помимо числа Рейнольдса, диаметра шаров и пористого слоя) содержат зависимость от внешнего и внутреннего радиусов активной зоны, что позволяет рассчитывать потери давления при значительной радиальной толщине слоя шаровых твэлов. Существенным отличием подобных течений от случаев плоского движения газа в шаровом слое, как показали исследования, является уменьшение относительной интенсивности пульсации давления потока от периферии к центру.

**Ключевые слова:** высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, ВТГР, шаровые твэлы, радиальное течение теплоносителя.

**Key words:** high temperature gas-cooled reactor, HTGR, pebble bed, radial flow distribution.

Энергетические ядерные реакторы с шаровыми твэлами и с радиальным течением газового теплоносителя обеспечивают реализацию более компактной активной зоны по сравнению с аналогичной структурой зоны с осевым движением теплоносителя, что позволяет достичь высокой плотности энерговыделения в активной зоне. При такой компоновке активная зона представляет собой систему шаровых твэлов, нерегулярно уложенных в полости, образованной двумя коаксиальными решетками – соосными цилиндрами с перфорированными стенками для прохода газового теплоносителя. Движение газа от периферии к центру способствует увеличению теплонапряженности ТВС и возможности применения шаровых твэлов сравнительно малого диаметра (10–30 мм) [1].

Геометрические размеры активной зоны определяются массовым расходом и степенью нагрева теплоносителя, его теплофизическими и гидродинамическими параметрами. Для высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) толщина топливной засыпки твэлов  $\Delta r$  может быть соизмерима с внутренним радиу-

сом активной зоны  $r_1$ , что требует рассмотрения задачи изменения основных параметров течения газа (гидродинамических и теплообменных) от соотношения внешнего  $r_2$  и внутреннего  $r_1$  радиусов.

Значения теплонапряженности активной зоны для вариантов осевого  $q_v^{oc}$  и радиального  $q_v^{рад}$  течений теплоносителя при одинаковой тепловой мощности реактора определяются отношением

$$q_v^{oc} / q_v^{рад} = \left[ 1 - \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{-2} \right], \quad (1)$$

причем при  $r_1=0$  значения теплонапряженности равны.

Для определения геометрического параметра  $r_2/r_1$  удобно воспользоваться одномерной методикой теплогидравлического расчета, полагая, что теплопроводность шарового твэла определяется исключительно свойствами топливного слоя при постоянной температуре в центре, равной 1250°C. При таких допущениях поперечные размеры активной зоны определяются теплофизическими свойствами газа (гелия) и его температурой на входе и выходе из реактора, т.е. решением системы уравнений

$$\begin{aligned} r_1/r_2 &= \text{Re}(r_2)/\text{Re}(r_1) \cdot \mu_r(r_2)/\mu_r(r_1); \text{Re} = \left( \frac{G_m}{2\pi r H} \right) \cdot \frac{d_{ш}}{\mu_r}; \\ \text{Nu} &= 0,485 \cdot \text{Re}^{0,7}; \\ \text{Nu} &= 4 \frac{\lambda_{ш}}{\lambda_r} \left[ \frac{24(1-\varepsilon)\lambda_{ш}}{q_v \cdot d_{ш}^2} \Delta T_{ц-г} - 1 \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (2)$$

а также зависимостью теплопроводности и вязкости газа от температуры [2]

$$\lambda_r = 4,205 \cdot 10^{-3} \cdot T_r^{0,637}; \mu_r = 3,674 \cdot 10^{-7} \cdot T_r^{0,7}, \quad (3)$$

где  $G_m$  – массовый расход газа, кг/с;  $\mu_r$  – динамическая вязкость газа, Па·с;  $\lambda_r$  и  $\lambda_{ш}$  – коэффициенты теплопроводности газа и шаров, Вт/(м К);  $d_{ш}$  – диаметр шарового твэла, м;  $\varepsilon$  – пористость свободной засыпки;  $\Delta T_{ц-г}$  – разность температур в центре твэла и омывающего его газа, °C;  $H$  – высота засыпки, м.

Результаты расчетов по формулам (1)–(3) приведены на рис. 1 в виде зависимости геометрических размеров активной зоны  $r_2/r_1$  от степени нагрева теплоносителя  $\Delta T_r = T_{вых} - T_{вх}$  температуры газа на входе  $T_{вх}$  и диаметра шаровых твэлов. В левой части рисунка нанесены сравнительные значения теплонапряженности

$q_v^{oc}/q_v^{рад}$ , связанные с различными условиями раздачи газа, что позволяет определять не только геометрические размеры реактора, но и энергетические характеристики компоновки.

Анализ расчетных данных показывает, что для реализации тепловых мощностей ВТГР свыше 300 МВт и конечной температуры нагрева газа 900–1000°C отношение  $r_2/r_1$  должно быть не менее 3,0–5,0, а толщина шарового слоя твэлов  $\Delta r$ , определяемая заданным значением внутреннего радиуса  $r_1$  активной зоны, должна составлять 0,40–0,75 м. В этих условиях значение  $q_v^{oc}/q_v^{рад}$  не превышает 0,75–0,8, что говорит о значительной компактности конструктивного оформления конструкции ВТГР с радиальной раздачей газа.

При расчетах гидравлических характеристик реакторов подобной конструкции необходимо учитывать особенности радиального течения газа, связанные с изменением скорости потока от входа раздаточного коллектора к выходу приемного коллектора. С этой целью необходимо воспользоваться уравнением Дарси-Вейс-

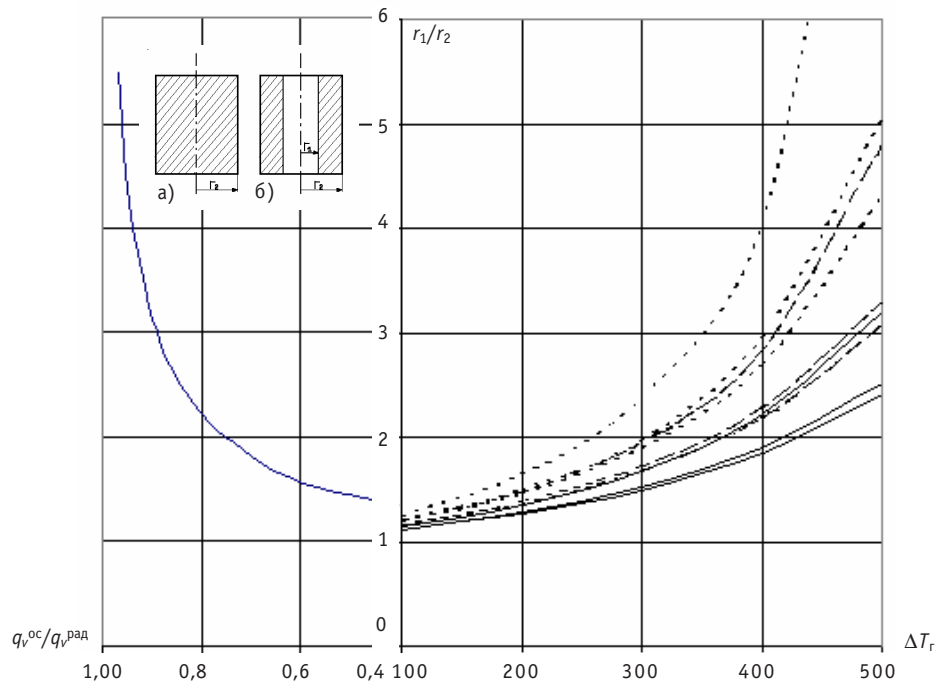


Рис. 1. Номограмма зависимости геометрических размеров и теплонапряженности активной зоны от степени нагрева теплоносителя: • • • –  $T_{\text{вх}} = 500^\circ\text{C}$ ; – – – –  $T_{\text{вх}} = 400^\circ\text{C}$ ; — — — —  $T_{\text{вх}} = 300^\circ\text{C}$ ; а) и б) – схемы реакторов с осевым и радиальным течением газа соответственно

баха, записанным для радиального потока газа:

$$dp = \xi_r \cdot 0,5d_{\text{ш}} \left( \frac{G_m}{2\pi H \rho_r} \right)^2 \cdot \frac{dr}{r^2}. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), потери давления  $\Delta p$  в шаровом слое можно рассчитать с учетом коэффициента гидравлического сопротивления (КГС)  $\xi_r$ , отнесенного к среднему значению радиуса активной зоны:

$$\Delta p = \xi_r \cdot (8\pi^2 d_{\text{ш}})^{-1} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \cdot \left( \frac{G_m}{H \rho_r} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\bar{r} = 0,5(r_1 + r_2)$ .

Уравнение (5) позволяет находить значения КГС для шарового слоя с учетом особенностей радиального течения газа. Для малых значений  $\Delta r$  можно воспользоваться обычной плоской моделью течения газа, поскольку соотношения КГС между ними определяются как

$$\frac{\xi_{\bar{r}}}{\xi_{\text{пл}}} = 4 \left( \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2} + 2 \right)^{-1} \quad (6)$$

и практически совпадают при  $r_2/r_1 \leq 1,15$ .

Для нахождения КГС в условиях радиального течения газа проводились измерения соответствующих перепадов давления на экспериментальной установке, состоящей из двух перфорированных коллекторов (внешнего и внутреннего) с отверстиями 2,0 мм. Внутренний коллектор имел диаметр 28 мм, внешние коллекторы – 36, 80 и 200 мм. Значения  $\xi_{\bar{r}}$  находились для трех диаметров шаров – 7,0;

15 и 22 мм. Разрежение, создаваемое газодувками на выходе внутреннего коллектора установки, обеспечивало равномерное распределение потока воздуха на входе внешнего коллектора.

Статистическая обработка результатов измерений показала, что  $\xi_{\bar{r}}$  в значительной степени зависит от пористости слоя шаровой засыпки, которая находилась путем определения плотности материала шаров и их насыпной плотности и в опытах менялась в зависимости от  $d_{\text{ш}}$  и радиальных размеров засыпки  $\Delta r = r_2 - r_1$ . Поэтому зависимость КГС представлена для двух диапазонов изменения пористости  $\varepsilon$  шарового слоя в виде

$$\begin{aligned}\xi_{\bar{r}} &= \frac{108}{\varepsilon^4} \cdot \text{Re}_{\bar{r}}^{-0,079} \cdot \chi; \quad d_{\text{ш}} = 15 \text{ и } 22 \text{ мм;} \\ \xi_{\bar{r}} &= \frac{43,6}{\varepsilon^4} \cdot \text{Re}_{\bar{r}}^{-0,35} \cdot \chi; \quad d_{\text{ш}} = 7 \text{ мм;} \\ \chi &= 4 \left( \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2} + 2 \right)^{-1}; \quad 0,4 \leq \varepsilon \leq 0,44,\end{aligned}\tag{7}$$

где  $\text{Re}_{\bar{r}}$  – число Рейнольдса для скорости потока в среднем сечении  $\bar{r} = 0,5(r_1 + r_2)$ .

Все полученные опытные данные по гидравлическому сопротивлению засыпки из шаровых элементов приведены на рис. 2 в виде зависимости  $(\xi_{\bar{r}} \cdot \varepsilon^4 \cdot \chi^{-1})$  от числа  $\text{Re}_{\bar{r}}$ . Полученные соотношения (7) целесообразно использовать для расчетов потери давления по формуле (5) в активной зоне из шаровых твэлов ВТГР при радиальной раздаче газа в случае, когда необходимо учитывать значительные изменения скорости потока в радиальном направлении, т.е. при отношении внешнего и внутреннего коллекторов  $r_2/r_1 > 1,15$ .

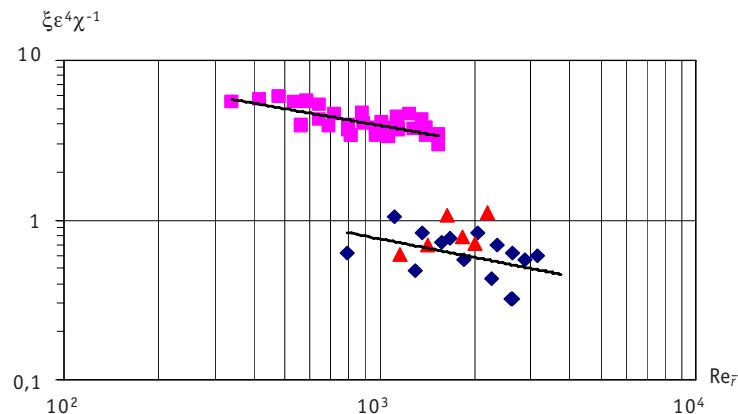


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса:  
■ –  $d_{\text{ш}} = 0,007$  м; ◆ –  $d_{\text{ш}} = 0,015$  м; ▲ –  $d_{\text{ш}} = 0,022$  м

Характер течения потока газа и, следовательно, гидравлическое сопротивление определяются уравнением турбулентности газа внутри шаровой засыпки. Исследования [1] показали, что при обтекании шаровых элементов возникают вихри, которые при  $\text{Re} > 100$  отрываются и уносятся потоком. Одной из основных характеристик таких потоков является относительная энергия пульсационного давления, определяемая в виде отношения среднеквадратичного уровня пульсации статического давления  $(\overline{p^2})^{0,5}$  и соответствующего динамического напора  $q = 0,5\rho U_{\Gamma}^2$ ,

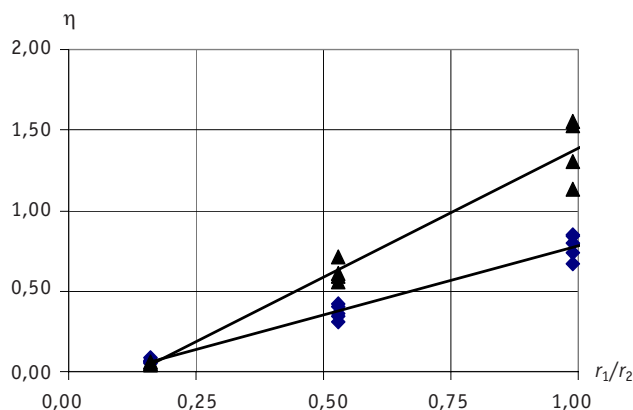


Рис. 3. Изменение относительной интенсивности пульсации давления потока в зависимости от радиальной координаты шарового слоя: ▲ –  $d_{\text{ш}} = 0,015 \text{ м}$ ; ◆ –  $d_{\text{ш}} = 0,007 \text{ м}$

где  $U_r$  – местная скорость потока при отсутствии шарового слоя. Существует связь между  $\eta = (\overline{p^2})^{0,5} / q$ , числом Рейнольдса, напряжением трения  $\tau_w$  на поверхности обтекаемых элементов и коэффициентом сопротивления  $c_f$ . Значение  $\eta$  указывает на эффективность превращения кинетической энергии скоростного напора в энергию пульсационного давления [3].

В нашем случае значения  $\eta$  определялись с помощью микроприемников статического давления, выполненных в виде шаров соответствующего диаметра с внутренним сквозным отверстием, поперечный канал которых соединялся тонкой виниловой трубкой с датчиком давления. Микроприемники давления помещались внутри шаровой засыпки вблизи внутреннего и внешнего распределительных коллекторов, а также в центральной области установки.

Результаты измерений, представленные на рис. 3, в зависимости от координаты  $r/r_2$  расположения приемников давления вдоль радиуса установки характеризуют уменьшение относительной интенсивности пульсаций статического давления потока по мере его ускоренного течения через шаровой слой, что непосредственно связано с возрастанием радиальной скорости потока. Изменение гидравлического сопротивления  $\xi$  имеет аналогичный характер, что говорит об отрывном механизме течения вблизи поверхности шаров при общей турбулентности потока в межшаровой области.

### Литература

1. Лелеков В.И. Особенности теплообмена и гидродинамики в ТВС со сферическими твэлами и радиальной раздачей газа // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып. 2. – С. 105-117.
2. Попов С.В. Стационарная теплофизика ВТГР с засыпной активной зоной. // Атомно-водородная энергетика и техника. – М.: Энергоиздат, 1982. – Вып. 4. – С. 126-129.
3. Петровский В.С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума. – Л.: Судостроение, 1966. – С. 250.

Поступила в редакцию 17.10.2008

Are developed methodical, algorithmic and the software of calculation of speed propagation of waves of pressure (SPWP) in the coolant of reactor core of boiling reactors. Results of calculation of SPWP in technological channels of reactor RBMK-1000 in various modes of operation are resulted.

#### УДК 621.039.58

*The results of the Development of the Experts Questioning Methods and based on them the Estimation of the NPP Staff Reliability Indices \Yu. V. Volkov, D. S. Samokhin, A. V. Sobolev, M. Y. Kanishev, S. L. Lichakov, S. N. Slinev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.*

The paper deals with the methods for estimation the NPP staff reliability indices based on the experts questioning data. Four types of staff errors have been chosen and possibility of the estimation of the given errors frequency has been considered. The results of the opinions two different experts groups are presented and the analysis on the coincidence of these results has been made. The results of the data comparison of the experts questioning and the results of the data processing for the NPP incidents have been made. The recommendations how to use the drawn conclusions to estimate the efficiency of NPP engineers safety activities are given.

#### УДК 621.039.58

*The problem of Level Optimization for Disorder Detection in Observed Random Process \A. V. Igitov, O. M. Gulina, N. L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.*

The equipment state diagnostics connects with detection of irregular situations in its operation. There is formulated optimization problem for level intersection number, suggested the calculation method for optimization problem solving. There is performed also the algorithm of model parameters asymptotical estimation and developed the applied soft. Calculations are performed and nomographs are pictured by means of Delphi and Mathcad technologies.

#### УДК 621.039.52.034.3: 532.546

*Geometrical and Hydrodynamic Features of the Radial Coolant Distribution HTGR \V. A. Klimova, V. M. Pahaluev, S. Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.*

The pebble bed reactor core with radial gas flow geometric parameters depending on the demanded energy and construction characteristics analysis results are given. The comparison with the reactor with axial gas flow is carried out. The experimental hydraulic resistance coefficients ratio received contains the dependency on the reactor core inner and outer radius, besides Reynolds number and pebble bed diameter, and can be recommended for the reactor pressure loss calculations for considerable pebble bed thickness. A significant difference of such flows from the cases of flat gas flows in pebble bed is the decrease of the flow pressure pulsations rate from the periphery to the centre.

#### УДК 621.039.547.5

*Features of Resonant Absorption of Neutrons in Thorium Containing Multiply Systems, Caused by Change in Ratio of Moderator Volume and Fuel Volume \I. V. Shamanin, A. V. Godovich, P. A. Seleznev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.*

The results of numerical experiments defining borders of area of values of ratio  $V_{mod}/V_f$  (volume of moderator/volume of fuel) in which anomaly during dependence of resonant absorption is observed are resulted. Its existence proves physical advantages  $Th^{232}$  in comparison with  $U^{238}$  in case of use as a reproducing material in structure of nuclear fuel at the certain values of ratio  $V_{mod}/V_f$ .