

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ С МИКРОТВЭЛАМИ

А.Т. Комов, Е.В. Бочарова, Ю.Н. Токарев  
Московский Энергетический институт  
(технический университет) кафедра ОФ и ЯС

Исследование гидродинамических и тепловых процессов при движении однофазных и двухфазных потоков в пористых средах, в частности через шаровые засыпки, является актуальной задачей современной теплофизики. В настоящее время существует новая разработка РНЦ «КИ» и ВНИИАМ, в которой предлагается использовать в ядерном реакторе ВВЭР – 1000 тепловыделяющие сборки (ТВС) с шаровыми микровтвэлами [1].

ТВС, изображенная на рис.1, состоит из наружного перфорированного чехла в виде шестигранной усеченной пирамиды, внутри которой коаксиально размещен внутренний перфорированный чехол в виде конуса, который является раздаточным коллектором. Пространство между чехлами заполнено микровтвэлами в виде свободной засыпки. Теплоноситель поступает в раздаточный коллектор, нагревается в засыпке микровтвэлов, двигаясь в поперечном направлении, и выходит через перфорацию наружного чехла в зазор между соседними сборками, который является сборным коллектором. Такие ТВС можно использовать в работающих реакторах типа ВВЭР без изменения конструкции реактора [1].

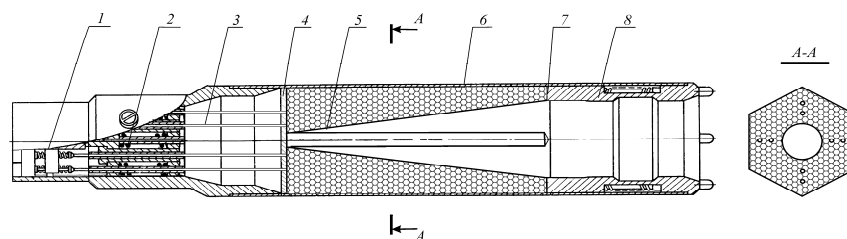


Рис.1 ТВС с микровтвэлами: 1 – кластер; 2 – пружины; 3 – СУЗ; 4 – нажимное днище; 5 – раздаточный коллектор; 6 – перфорированный чехол; 7 – опорное днище; 8 – хвостовик

Для ТВС такой конструкции важной задачей является обеспечение приемлемого распределения расхода теплоносителя по высоте с учетом осевого профиля плотности энерговыделения, а также приемлемой величины гидравлического сопротивления ТВС. Форма коллекторов с сужающимся и расширяющимся по ходу теплоносителя поперечным сечением обеспечивает наименьшую неравномерность раздачи теплоносителя по высоте слоя микровтвэлов и минимальные потери давления за счет сохранения примерно постоянной вертикальной составляющей скорости теплоносителя в нем [2]. Применение поперечного течения теплоносителя обусловлено тем, что засыпка микровтвэлов в продольном направлении имеет большое гидравлическое сопротивление.

В работе представлены результаты численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена при течении однофазного теплоносителя в ТВС с микровтвэлами для реактора ВВЭР-1000. Численное моделирование проведено при помощи лицензионного программного комплекса FLUENT. Применяемая расчетная сетка выполнена из элементов четырехугольной формы, задача двумерная осесимметричная. Рассматриваемый метод прошел тестирование на основе сопоставления с экспериментальными данными работы [3]. Расчетная схема представлена на рис.2.

В данной ТВС микровтвэлы располагаются в виде монодисперсионного шарового слоя, поэтому в качестве расчетной модели выбрана модель пористой среды с внутренними источниками тепла.

Переход с традиционной конструкции ТВС ВВЭР – 1000 на ТВС с засыпкой микровтвэлов предполагает неизменность всех параметров ТВС: мощности, геометрии, ее теплотехнических и нейтронно-физических характеристик. Параметры ТВС задавались исходя из данных таблицы 1.

1

## Тепло – гидравлические характеристики ТВС с микровтвэлами

Температура на входе в ТВС, °С	290
Давление на входе в ТВС, МПа	16
Удельное энерговыделение, Вт/м <sup>3</sup>	$1.4 \times 10^8$
Расход теплоносителя, кг/с	100
Диаметр микровтвэлов, мм	2
Пористость шаровой засыпки	0.39
Количество микровтвэлов, $n_{шт}$ , шт	$26 \times 10^6$

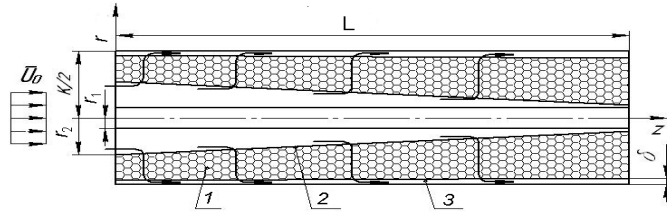


Рис.2 Расчетная схема ТВС: 1 – засыпка микротвэлов; 2 – раздаточный коллектор; 3 –сборный коллектор; (стрелками указано направление течения теплоносителя)

Система уравнений движения и неразрывности в цилиндрических координатах для двумерного осесимметричного движения теплоносителя выглядит следующим образом :

$$\begin{cases} U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} - \frac{U_r}{r^2} \right) - (\alpha \mu U_r + \beta \frac{\rho U_r^2}{2}), \\ U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) - (\alpha \mu U_z + \beta \frac{\rho U_z^2}{2}), \\ \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с;  $\nu$  – кинематическая вязкость теплоносителя, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha \mu U_z + \beta \frac{\rho U_z^2}{2}$  – сумма вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления пористой среды;  $U_r$ ,  $U_z$  – компоненты скорости фильтрации, м/с;

На внутренней поверхности области течения выполнены условия прилипания. В частях рабочего участка, представляющих собой свободную зону (не пористая среда), полагается  $\alpha = \beta = 0$ , и тем самым решается обычная система уравнений движения. В остальной, пористой части рабочего участка, сопротивление пористой среды значительно превышает конвективные и диффузионные члены системы (1) и в результате в этой области практически решается система

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \alpha \mu U_r + \beta \frac{\rho U_r^2}{2}, \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \alpha \mu U_z + \beta \frac{\rho U_z^2}{2}, \\ \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом система (1) описывает движение как в свободных так и пористых зонах рабочей области.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  для шаровой засыпки определялись из соотношения Эргуна [4] :

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \rho \frac{\nu U}{d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho U^2}{d}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{150 \cdot (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2}; \beta = \frac{3,5 \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – пористость шаровой засыпки;  $d$  – диаметр микротвэла.

На входе в рабочий участок задано значение массового расхода  $G$ , кг/с:

$$G = 2\pi \int_0^R \rho U r dr \cdot \quad (5)$$

Уравнение энергии в пористой среде в цилиндрических координатах для двумерного осесимметричного движения теплоносителя имеет следующий вид:

$$\rho c_p \left( U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_{эф} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (6)$$

где  $\lambda_{эф} = \varepsilon \lambda_T + (1 - \varepsilon) \lambda_{ш.з}$  - эффективный коэффициент теплопроводности;  $T$  - температура;  $\lambda_T$  - коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $\lambda_{ш.з}$  - коэффициент теплопроводности шаровой засыпки;  $c_p$  - удельная изобарная теплоемкость;  $q_v$  - удельное энерговыделение, Вт/м<sup>3</sup>.

$$q_v = \frac{Q_{менл}}{V}, \quad (7)$$

где  $Q_{менл}$  - тепловая мощность ТВС, Вт;  $V$  - объем, занимаемый микротвэлами.

Температура теплоносителя  $T_{ex}$  на входе в рабочий участок ( $z = 0$ ):

$$T(r) \Big|_{z=0} = T_{ex}. \quad (8)$$

В ходе численного моделирования регулирование гидродинамического сопротивления обеспечивалось методом подбора оптимальных для данной конструкции диаметров отверстий перфорированных стенок раздаточного и сборного коллекторов, а также степени их перфорации.

Из всех расчетных вариантов равномерного распределения температуры на выходе из шаровой засыпки удалось достичь при следующих параметрах:

- диаметр отверстий на стенке раздаточного коллектора  $d_{р.к.} = 1.2$  мм;
- диаметр отверстий на стенке сборного коллектора  $d_{с.к.} = 1$  мм;
- степень перфорации стенок коллекторов  $\varepsilon_k = 0.05$ .

Коэффициенты сопротивления вязкостного  $\alpha$ , инерционного  $\beta$  сопротивления перфорированных стенок сборного и раздаточного коллекторов, а также шаровой засыпки определялись из соотношения (4). Теплоносителем являлась вода.

В результате удалось достичь равномерного распределения температуры на выходе из шаровой засыпки. На рис.3 представлены изолинии температуры. Для создания равномерного распределения температуры были созданы определенные гидродинамические условия. В раздаточном коллекторе по ходу движения теплоносителя был создан относительно большой перепад давления; градиент давления несколько увеличивается по ходу течения (рис.4 (а), рис.4 (б)). При этом перепад давлений на перфорированной стенке раздаточного коллектора был задан больше чем продольный перепад давлений в раздаточном коллекторе и намного большим чем перепад давления поперек засыпки. Сопротивление на перфорированной стенке сборного коллектора было задано значительно меньшим, чем сопротивление раздаточного. Такие соотношения необходимы для обеспечения устойчивости течения.

Градиент давления в сборном коллекторе (рис. 4 (в)) такой же как и в засыпке и направлен практически вдоль оси  $Z$ .

Линии тока (рис.5) теплоносителя искривляются по направлению градиента давления в пористой среде. Это искривление незначительно, поскольку продольный градиент в шаровой засыпке, разворачивающий поток в осевом направлении не успевает проявиться в значительной степени за время прохождения жидкости поперек засыпки.

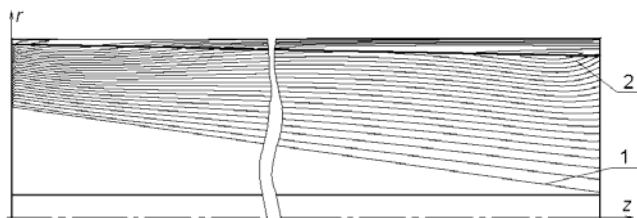
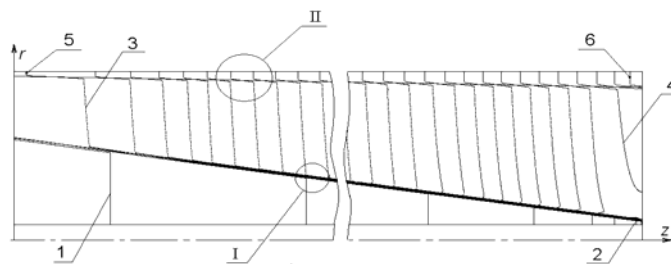
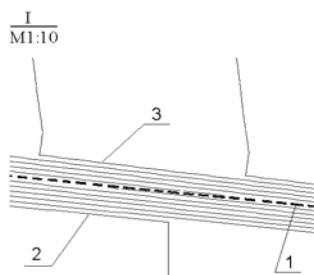


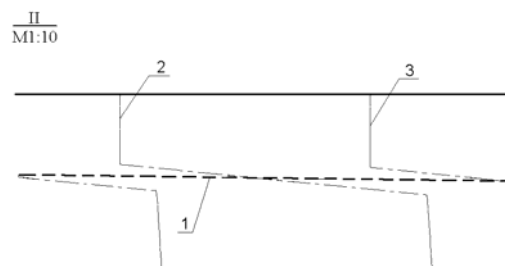
Рис. 3. Изотермы по высоте ТВС: 1 –  $T = 564 \text{ K}$ ; 2 –  $T = 599 \text{ K}$  (интервал между изолиниями составляет  $2 \text{ K}$ )



а)



б)



в)

Рис. 4. Распределение давления в ТВС: а) Изобары по высоте ТВС: 1 –  $0.538 \text{ МПа}$ ; 2 –  $0.538 \text{ МПа}$ ; 3 –  $0.473 \text{ МПа}$ ; 4 –  $0.0861 \text{ МПа}$ ; 5 –  $0.452 \text{ МПа}$ ; 6 –  $0.043 \text{ МПа}$ ; (интервал между изолиниями составляет  $0.016 \text{ МПа}$ ); б) Изобары на перфорированной стенке раздаточного коллектора (участок I рис. 4): 1 – перфорированная стенка раздаточного коллектора; 2 –  $0.516 \text{ МПа}$ ; 3 –  $0.452 \text{ МПа}$ ; (интервал между изобарами составляет  $0.006 \text{ МПа}$ ); в) Изобары на перфорированной стенке сборного коллектора (участок II рис.4): 1 – перфорированная стенка сборного коллектора; 2 –  $0.358 \text{ МПа}$ ; 3 –  $0.323 \text{ МПа}$

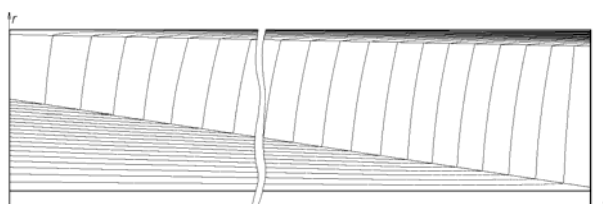


Рис. 5 – Линии тока теплоносителя в ТВС

## Список литературы

1. Н.Н. Пономарев – Степной, Н.Е. Кухаркин, А.А. Хрулев, Ю.Г. Дегальцев. Перспективы развития микровзлов в ВВЭР // Атомная энергия, 1999, том 86, вып. 6 с. 443-449
2. Е.И. Гришанин, Е.Е. Денисов. Разработка математической модели для расчета параметров теплоносителя в тепловыделяющей сборке легководного реактора с микровзлами // Тяжелое машиностроение, 1995, № 9, с. 11- 20
3. Авдеев А.А., Балунов Б.Ф., Рыбин Р.А., Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке //Теплофизика высоких температур, 2003, том 41, № 3, с. 432 – 438
4. Аэров М.Э., Тодес О.М., Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Изд-во «Химия», 1968 г., 512 с