УДК 532.546.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ШАРОВЫХ ЗАСЫПКАХ

Сморчкова Ю.В., Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Грант РФФИ 12-08-33073

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты численного моделирования гидродинамики и теплообмена при течении однофазного теплоносителя в шаровых засыпках, как для цилиндрической геометрии, так и для конструкции тепловыделяющей сборки с микротвэлами (ТВС МТ). Моделирование проводилось в пакете прикладных программ Anes. Выполнено тестирование моделей пакета на основе сопоставления данных моделирования с экспериментальными данными полученными в МЭИ и с данными других авторов. В результате тестирования получена достаточная точность моделирования. В результате моделирования тепловыделяющей сборки с микротвэлами выявлены недостатки рассмотренной конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Пористые среды нашли широкое применение в промышленности. Исследование гидродинамических и тепловых процессов при движении однофазных и двухфазных потоков в пористых средах является актуальной задачей современной теплофизики. В атомной энергетике такие задачи требуется решать при разработке конструкций водоохлаждаемых реакторов с использованием шаровых микротвэлов. Реактор с топливом на основе микротвэлов позволяет существенно повысить безопасность АЭС [1]. Одна из основных трудностей, возникающая при внедрении микротвэлов в водоохлаждаемые реакторы, состоит в недостаточной изученности физики таких активных зон. Особенно это касается гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках.

На этапе поиска наилучших конструктивных решений численное моделирование является, по-видимому, единственным способом анализа таких сложных систем.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Расчетная схема тепловыделяющей сборки с микротвэлами представлена на рис.1[2] (масштаб по вертикальной оси уменьшен в 10 раз). В численных расчетах рассматривается только та часть ТВС, которая находится в пределах активной зоны. Рассматривается двумерное осесимметричное течение теплоносителя (в продольном и радиальном направлениях) через ТВС, состоящую из вытеснителя 1, коллекторов 2 и 6 и шаровой засыпки микротвэлов 4. Раздаточный коллектор 2 образован поверхностями вытеснителя и раздаточного чехла 3. Сборный коллектор 6 образован поверхностью сборного чехла 5 и условной наружной поверхностью симметрии, что является допущением, поскольку в реальной активной зоне сборный коллектор является пространством между соседними тепловыделяющими сборками.

Для описания гидродинамики и теплообмена в ТВС МТ используется подход, основанный на модели пористой среды с внутренними источниками тепла. Далее рассматриваются осредненные по некоторому объему дисперсной среды уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Предполагается, что засыпка микротвэлов неподвижна.

Система уравнений движения и неразрывности для двумерного осесимметричного движения теплоносителя, записанная относительно средней скорости жидкости в порах, выглядит следующим образом:

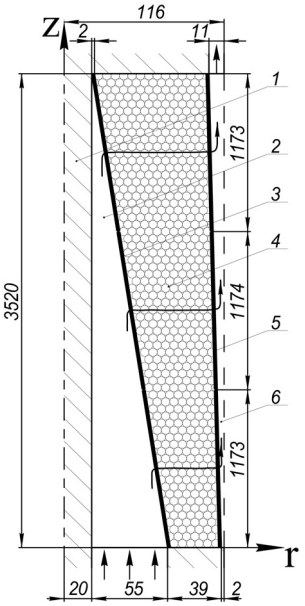

Рис.1 Расчетная схема ТВС МТ [2].

$$div\left(\varepsilon\rho U_g U_{gr} - \varepsilon\mu_{эфф}\nabla U_{gr}\right) = -\varepsilon\frac{\partial p}{\partial r} - \varepsilon\mu_{эфф}\frac{U_{gr}}{r^2} + S_{Ur} + S_{ri}$$

$$div\left(\varepsilon\rho U_g U_{gz} - \varepsilon\mu_{эфф}\nabla U_{gz}\right) = -\varepsilon\frac{\partial p}{\partial z} + S_{Uz} + S_{zi}, \qquad (1)$$

$$div\left(\varepsilon\rho U_g\right) = 0,$$

где ε – пористость, ρ – плотность жидкости, $\mu_{эфф}$ коэффициент эффективной вязкости.

Уравнение энергии имеет вид:

$$div\left(\varepsilon\rho U_g H_g - \varepsilon\lambda_g\nabla T_g\right) = S_{Tg}, \qquad (2)$$

где λ_g - эффективный коэффициент теплопроводности жидкости.

Уравнение теплопроводности:

$$div\left((1\text{-}\varepsilon)\lambda_s\nabla T_s\right) + (1\text{-}\varepsilon)q_V = -S_{Ts}, \qquad (3)$$

где λ_s - эффективный коэффициент теплопроводности шариков. q_V - объемное энерговыделение, Вт/м^3.

Эффективная теплопроводность засыпки определяется по соотношению:

$$\lambda_{эфф} = \varepsilon\lambda_g + (1\text{-}\varepsilon)\lambda_s$$

Источники в уравнении движения S_{ri}, S_{zi} - источники, связанные с отличием тензора напряжений от стандартной градиентной модели диффузионного переноса (в коде Anes эти источники рассчитываются автоматически).

В системе уравнений (1) гидравлическое сопротивление пористой среды учитывается путем введения дополнительных источниковых членов S_{Ur}, S_{Uz}. В Anes эти источники записываются через коэффициент проницаемости, их вид зависит от модели пористой среды. В ТВС МТ можно выделить две пористые зоны - шаровая засыпка и перфорированные чехлы.

Для шаровой засыпки коэффициент проницаемости определяется из уравнения Эргуна:

$$\frac{\Delta p}{H} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu U_ф}{d_ш^{\,2}} + 1,75\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\frac{\rho U_ф^2}{d_ш},$$

где $U_ф$ – скорость фильтрации, $d_ш$ – диаметр шариков.

Для перфорированных чехлов коэффициент проницаемости определяется на основе соотношений, представленных в [4].

Источники в уравнении энергии (2) и теплопроводности (3) S_{Tg}, S_{Ts} определяются по соотношению:

$$S_{Tg} = -S_{Ts} = \alpha_{gs}a_{gs}(T_s - T_g)$$

Способ вычисления коэффициента теплоотдачи α_{gs} и удельной межфазной поверхности a_{gs} зависит от модели пористой среды.

Коэффициент теплоотдачи вычисляется по формуле:

$$\alpha_{gs} = \frac{\mathrm{Nu}\lambda_g}{d},$$

где d – диаметр шариков $d_ш$ или диаметр отверстий в перфорированных чехлах $d_{отв}$.

Для областей, занятых шаровой засыпкой число Nu вычисляется по критериальному соотношению:

$$\mathrm{Nu} = 2 + 1,1\,\mathrm{Pr}^{0,33}\left(\mathrm{Re}\,\varepsilon\right)^{0,6}$$

Для перфорированных чехлов число Нуссельта вычисляется по формулам для круглых труб.

Граничные условия задаются исходя из данных для теплогидравлического расчета ТВС МТ [2], которые приведены в таблице 1 и определяются следующим образом: на входной границе задается плотность массового потока, осевая скорость и температура теплоносителя; на выходной границе задается постоянное противодавление равное нулю; на оси - условия прилипания (т.к. в центре находится вытеснитель).

Таблица 1. Данные для расчета ТВС МТ [2]

Температура на входе в ТВС , ^{0}С	290
Давление на входе в ТВС, МПа	16
Объемное энерговыделение, Вт/м^3	$1,4\times10^8$
Расход теплоносителя, кг/с	100
Диаметр микротвэлов, мм	2,0
Пористость шаровой засыпки	0,39

Для решения системы уравнений (1)-(3) в Anes используется численный метод контрольного объема. Моделирование проводилось в цилиндрической системе координат. Использовались структурные сетки контрольных объемов. Общее число контрольных объемов составляло $1{,}8\cdot10^5$.

Термодинамические свойства теплоносителя считались постоянными и были определены при температуре T = 593 К и давлении p = 16 МПа. В качестве материала для шаровых элементов использовался материал внешней оболочки микротвэлов – карбид кремния (SiC).

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Для определения точности результатов моделирования было проведено тестирование выбранной модели. Результаты сравнивались как с экспериментальными данными, полученными на кафедре ОФиЯС НИУ «МЭИ», так и с данными из работы [3]. Рабочий участок установки, созданной на кафедре ОФиЯС, состоял из цилиндрической трубы внутренним диаметром D = 31,2 мм, в центральную часть которой помещалась ячейка с засыпкой из шариков диаметром $d_ш$=2,00 мм, верхняя и нижняя часть которой состояла из удерживающих сеток. Эксперименты были проведены для засыпок высотой H=25; 50; 75; 100 мм. Режимные параметры были следующие: температура в контуре 18,5-20,5 ^{0}C, давление в контуре $(6\text{-}10)\cdot10^5$ Па, расход теплоносителя (0,15-0,50) кг/с.

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис.2 (линии – результаты моделирования, точки – экспериментальные данные). Как можно видеть по данным рисунка, соответствие расчетных значений с экспериментальными не удовлетворительное, максимальное отклонение достигает 50% в сторону завышения расчетных значений.

Для сокращения расхождения данных расчета и экспериментальных данных была принята двухзонная модель пористости, которая заключается в том, что засыпка делится на ядро, характеризуемое пористостью ε_0, и на пристеночную зону с пористостью ε_c. Тогда средняя по сечению пористость, согласно [5], определяется соотношением:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0\left(\frac{n-n'}{n}\right)^2 + \varepsilon_c\left[\frac{n^2-(n-n')^2}{n^2}\right], \qquad (4)$$

где n' – удвоенное число рядов с измененной структурой у стенки. Примем, что n' = 4, в этом случае уравнение (4) принимает вид:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 + (\varepsilon_c - \varepsilon_0)\left[1-\frac{(n-4)^2}{n^2}\right]$$

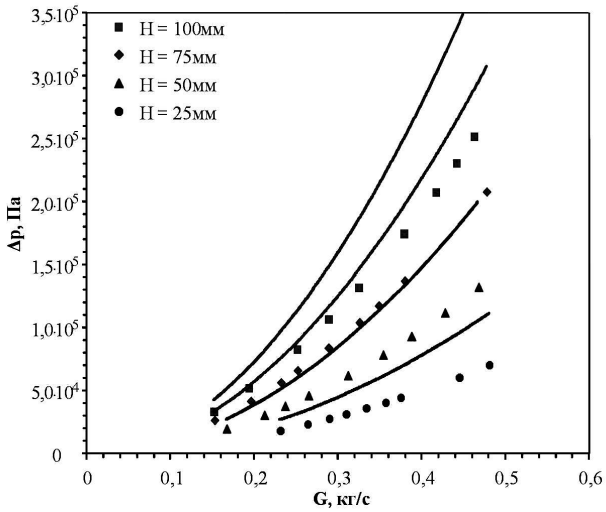

Рис.2 Зависимость потерь давления от массового расхода теплоносителя.

При средней пористости $\bar{\varepsilon}$ = 0,38, пористость в пристеночной зоне составила ε_c = 0,44, а в ядре засыпки ε_0 = 0,33. При таких значениях пористости отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных снижается более чем в два раза по сравнению с однозонной моделью пористости и не превышает 25%. Зависимость потерь давления, полученная по двухзонной модели пористости, от массового расхода представлена на рис.3.

Рабочий участок в работе [3] представлял собой цилиндрическую трубу внутренним диаметром D = 34,0 мм и длиной L = 1080 мм в центральную часть которой помещалась ячейка с засыпкой из частиц с формой близкой к сферической диаметром $d_ш$=2,033 мм. Сверху и снизу засыпка удерживалась решетками с отверстиями диаметром 1,5 мм. Высота засыпки составляла H = 1013 мм, пористость засыпки была равной ε = 0,37. Для этой серии экспериментов также было проведено моделирование по однозонной и двухзонной модели пористости.

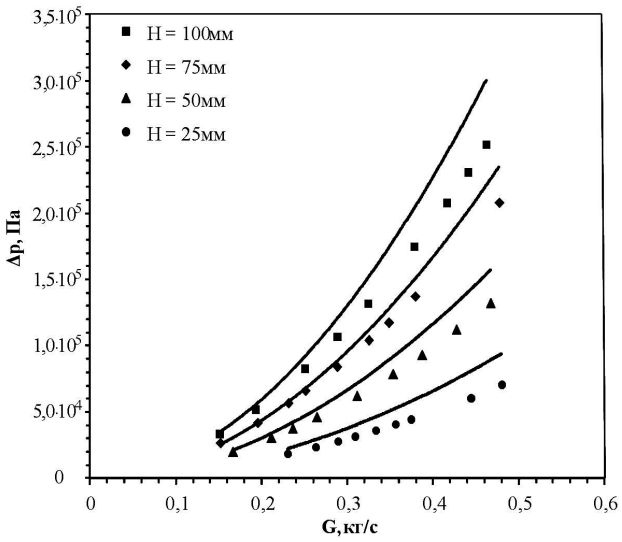

Рис.3 Зависимость потерь давления от массового расхода теплоносителя.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными для потерь давления представлены на рис.4 (1- расчет по однозонной модели пористости, 2 – по двухзонной модели).

Для этого случая отклонение результатов расчетов от экспериментальных данных не превышало 10% даже для случая однозонной пористости, а при использовании двухзонной модели пористости удалось получить максимальное расхождения результатов в 3%.

В целом по результатам тестирования математической модели была получена достаточная точность результатов моделирования, что позволило перейти к моделированию тепловыделяющей сборки с микротвэлами.

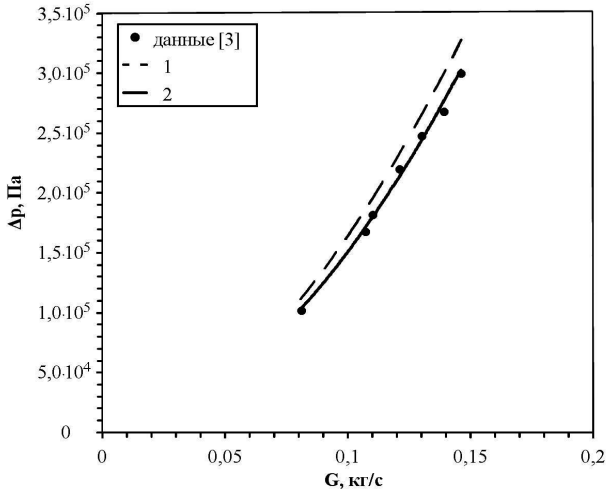

Рис.4 Зависимость потерь давления от массового расхода теплоносителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основные результаты моделирования гидродинамики и теплообмена в ТВС МТ представлены на рис.5,6 и в таблице 2.

Для ТВС МТ является важным обеспечение равномерного распределения температуры теплоносителя по высоте. Для этой цели перфорированные чехлы были разбиты на три примерно равных по высоте участка. В ходе проведения расчетов, были определены параметры перфорации чехлов, приведенные в таблице 2 (толщина чехлов была принята равной 2 мм, f – степень перфорации), при которых достигается радиальное течение теплоносителя (см. рис. 5а) и наиболее равномерное распределение температуры теплоносителя. Однако на рис. 5б) можно видеть зоны сильного подогрева теплоносителя вблизи стенок, особенно в верхней части ТВС, которые можно объяснить возникновением областей возвратного течения. Средняя температура теплоносителя на выходе из сборочного коллектора составила T = 323 °C, таким образом, проходя ТВС, вода подогревается на 33°C.

Таблица 2. Параметры перфорации чехлов

	Внутренний чехол		Наружный чехол	
	$d_{отв}$, мм	f	$d_{отв}$, мм	f
Нижняя часть	1	0,019	1	0,011
Средняя часть	1	0,017	1	0,010
Верхняя часть	1	0,019	1	0,011

Распределение потерь давления представлено на рис. 6. На этом рисунке можно видеть, что при выбранных значениях перфорации основные потери давления сосредоточены в области раздаточного и сборного чехлов, где гидравлическое сопротивление велико и происходит разворот теплоносителя.

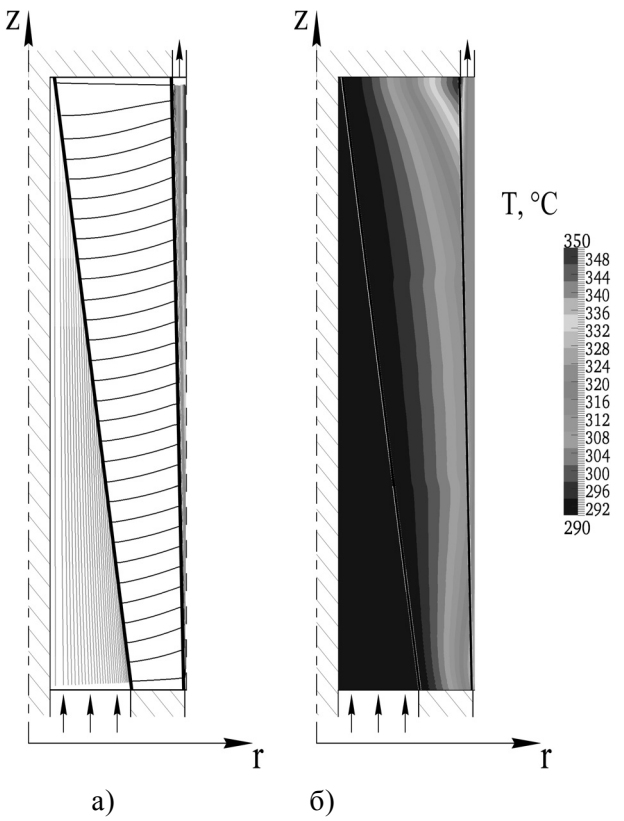

Рис.5 Линии тока (а), поле температуры теплоносителя (б).

В области ТВС, занятой микротвэлами, практически отсутствует продольное движение теплоносителя. Максимальная скорость движения теплоносителя достигается на выходе из сборного коллектора и составляет 18,5 м/с.

Исследованная в работе конструкция тепловыделяющей сборки с микротвэлами не является единственно возможной. Полученные в работе результаты, в частности, выявленные области сильного подогрева теплоносителя и большие потери давления на перфорированных чехлах являются существенными недостатками такой конструкции и говорят о необходимости поиска наиболее удачных вариантов расположения микротвэлов в тепловыделяющей сборке.

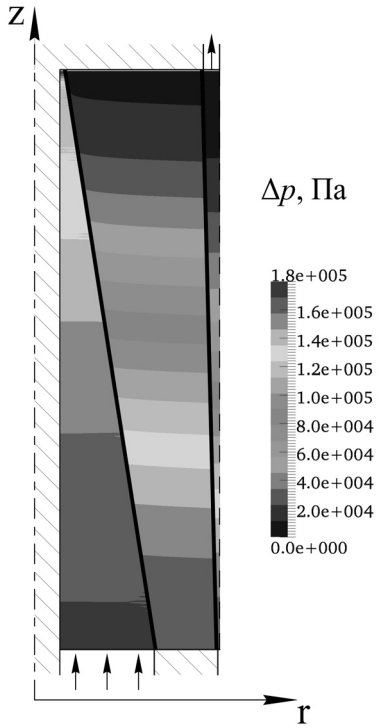

Рис.6 Распределение потерь давления.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты численного моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках. Моделирование выполнялось в пакете прикладных программ Anes. Выполнено тестирование математической модели, в результате которого получено достаточное соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными. Наилучшего соответствия удалось достичь при использовании двухзонной модели пористости.

Выполнено численное моделирование тепловыделяющей сборки с микротвэлами, в результате которого:

- определены параметры перфорации чехлов, при которых достигается наибольшая равномерность подогрева теплоносителя по высоте ТВС и обеспечивается радиальное течение теплоносителя;
- показано, что наибольшие потери давления происходят на перфорированных чехлах;
- показано, что в области занятой шаровой засыпкой практически отсутствует продольное движение теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., и др. Перспективы развития микротвэлов в ВВЭР // Атомная энергия, Т.86, №6, 1999. – С. 443-449. Ponomarev-Stepnoy N.N, Kukharkin N.E., KHrulev A.A., etc (1999), "Prospects of development microfuel in VVER", *Atomnaya energiya*, Vol.10, no.6, pp. 443-449
2. "ВВЭР с микротвэлами," Отчет 27. 6111. Д, ВНИИАМ, Москва, 2003. "VVER s mikrotvelami" (2003), Otchet 27.6111. D, VNIIAM, Moscow, Russia.
3. Авдеев А.А., Балунов Б.Ф., и др. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке // ТВТ, Т.41, №3, 2003. – С. 432-438. Avdeev A.A., Balunov B.F., etc (2003), "Hydrodynamic resistance in the flow of a two-phase mixture in a pebble bed", *Teplofizika vysokikh temperatur*, Vol.41, no.3, pp. 432-438
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. 326 с. Idelchik I.E. (1975), *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance], Mashinostroenie, Moscow, USSR
5. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. 510 с. Aerov M.E, Todes O.M. (1968) *Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so statsyonarnym i kipyashchim zernistym sloem* [Hydraulic and thermal basics of apparatus with fixed and fluidized granular layer], KHimiya, Leningrad, USSR.