

ВАЛИДАЦИЯ ПРОГРАММЫ MATADOR ДЛЯ ПОЯЧЕЙКОВОГО ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТВС ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Залесов А.С., Чуркин А.Н., Баисов А.М.
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия)

Введение

В рамках Международного форума Generation IV ядерные энергетические установки с водой при сверхкритическом давлении и быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем рассматриваются в качестве инновационных направлений развития атомной энергетики. В настоящее время в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ведутся работы по обоснованию ТВС для реактора ВВЭР-СКД и проектируются такие реакторные установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем как СВБР-100 и СВЕТ-М. Одна из особенностей перечисленных реакторных установок – высокая плотность теплового потока с поверхности твэлов, поэтому в активных зонах планируют использовать различные средства для интенсификации процесса теплообмена. Одним из наиболее распространенных способов интенсификации теплообмена является применение твэлов с навивкой на оболочке по спирали проволокой, которая также служит для дистанционирования твэлов.

Влияние проволоочной навивки на формирование тепловой и гидродинамической картины в активной зоне существенно, поэтому ни одна современная программа теплогидравлического расчета активной зоны не может обойтись без учета этого фактора. В АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» разработана программа MATADOR [1], которая предназначена для поячейкового расчета локальных неоднородных процессов тепломассопереноса в пучках гладких стержней и пучках стержней с дистанционирующей проволоочной навивкой. В данной работе в рамках валидации программы MATADOR проведены расчеты экспериментов с охлаждением пучков стержней различной геометрии водой при сверхкритическом давлении и свинцово-висмутовым теплоносителем.

1. Краткое описание программы MATADOR

Программа MATADOR написана на алгоритмическом языке Fortran 95 и создавалась для расчета стационарного и нестационарного течения однофазного теплоносителя при наличии локальных неоднородностей. Математическая модель программы основана на трехмерных уравнениях переноса массы, импульса и энергии, записанных в интегральной форме для неподвижных в пространстве контрольных объемов. В каждом контрольном объеме свойства и параметры течения усредняются. Разбиение расчетной области проходного сечения ТВС может быть проведено как для треугольной, так и для квадратной решетки расположения твэлов. В продольном направлении расчетная область разбивается на слои. Причем для уравнений переноса массы, энергии и поперечной составляющей импульса используется один способ разбиения, а для уравнения переноса продольной составляющей импульса – другой способ, в котором слои располагаются между средними линиями основных слоев. Пересечения каналов и слоев образуют в расчетной области смещенные друг относительно друга наборы контрольных объемов.

В программе MATADOR применена полунейная схема конечно-разностной аппроксимации системы дифференциальных уравнений переноса. Для решения системы реализован численный метод, основанный на алгоритме SIMPLE [2]. Основными

неизвестными величинами являются средние по контрольным объемам величины – давление, энтальпия, массовый расход в продольном и поперечном направлениях. Остальные величины находятся либо из уравнения состояния, либо с помощью различных замыкающих соотношений.

Более подробно система уравнений переноса и алгоритм решения в программе MATADOR описаны в [1].

2. Результаты расчетов

2.1 Задача № 1

В Сианьском университете Цзяотон сооружен экспериментальный контур для изучения теплоотдачи к воде сверхкритического давления в вертикальных каналах. Экспериментальный канал для первой задачи состоял из наружной необогреваемой трубы из нержавеющей стали и квадратного изолятора ($20,32 \times 20,32$ мм) с закругленными углами, имитирующего чехол топливной сборки в испытательной секции. Пучок стержней 2×2 состоял из четырех труб из нержавеющей стали, каждая из которых имела наружный диаметр 8 мм, толщину стенки 1,5 мм и обогреваемую длину 600 мм. Зазор между двумя обогреваемыми стержнями поддерживался на уровне 1,44 мм. Зазор между обогреваемым стержнем и закругленным углом квадратного керамического изолятора также поддерживался на уровне 1,44 мм. На обогреваемой секции труб дистанционирующие элементы не устанавливались, но трубы были приварены друг к другу точечно в двух местах, чтобы исключить вибрацию при подаче переменного тока.

В экспериментах измерены значения углового распределения температур на внешней поверхности труб. Температуры стенок были получены в двух из четырех обогреваемых имитаторах твэлов. В одну из труб вставлялись подвижные термопары, в другую – неподвижные. Вдоль имитатора твэла (на расстоянии 100 мм друг от друга) было пять высотных отметок, на которых проводились измерения подвижными термопарами. Однако в открытых источниках [3] результаты измерений углового распределения температур стенки приведены только для пятой высотной отметки.

В программе MATADOR экспериментальный канал смоделирован девятью основными каналами и двенадцатью каналами связи. По высоте каналы разбивались на 121 слой. На рис. 1 представлено разбиение проходного сечения экспериментального канала и цифрами пронумерованы основные каналы, каналы связи и имитаторы твэлов.

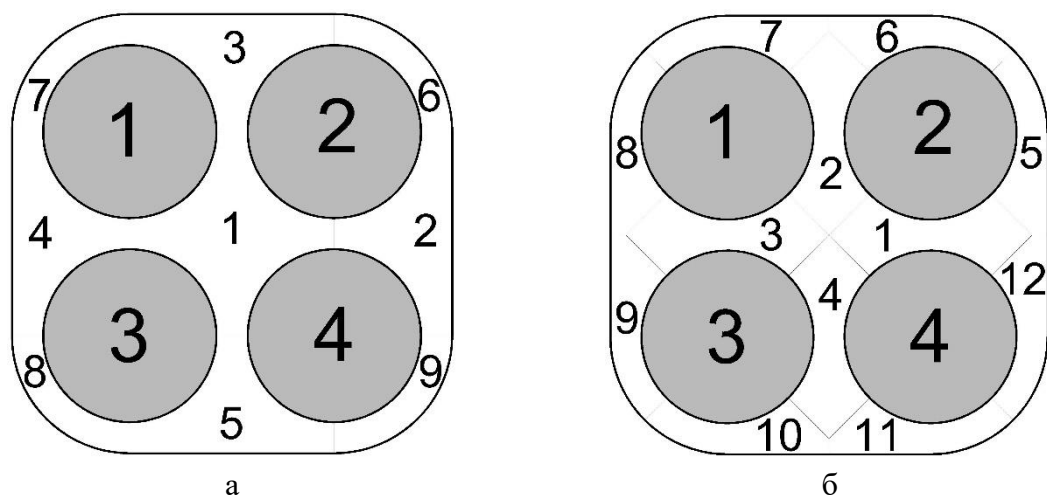


Рис. 1. Схема проходного сечения экспериментального канала:

а – основные каналы, б – каналы связи

Начало отсчета по азимуту и направление изменения угла поворота зонда показаны на рис. 2 вместе с сопоставлением экспериментальных значений из [3] и результатов расчетов по программам MATADOR, ТЕМПА-СК [4] и ASSERT-PV [5].

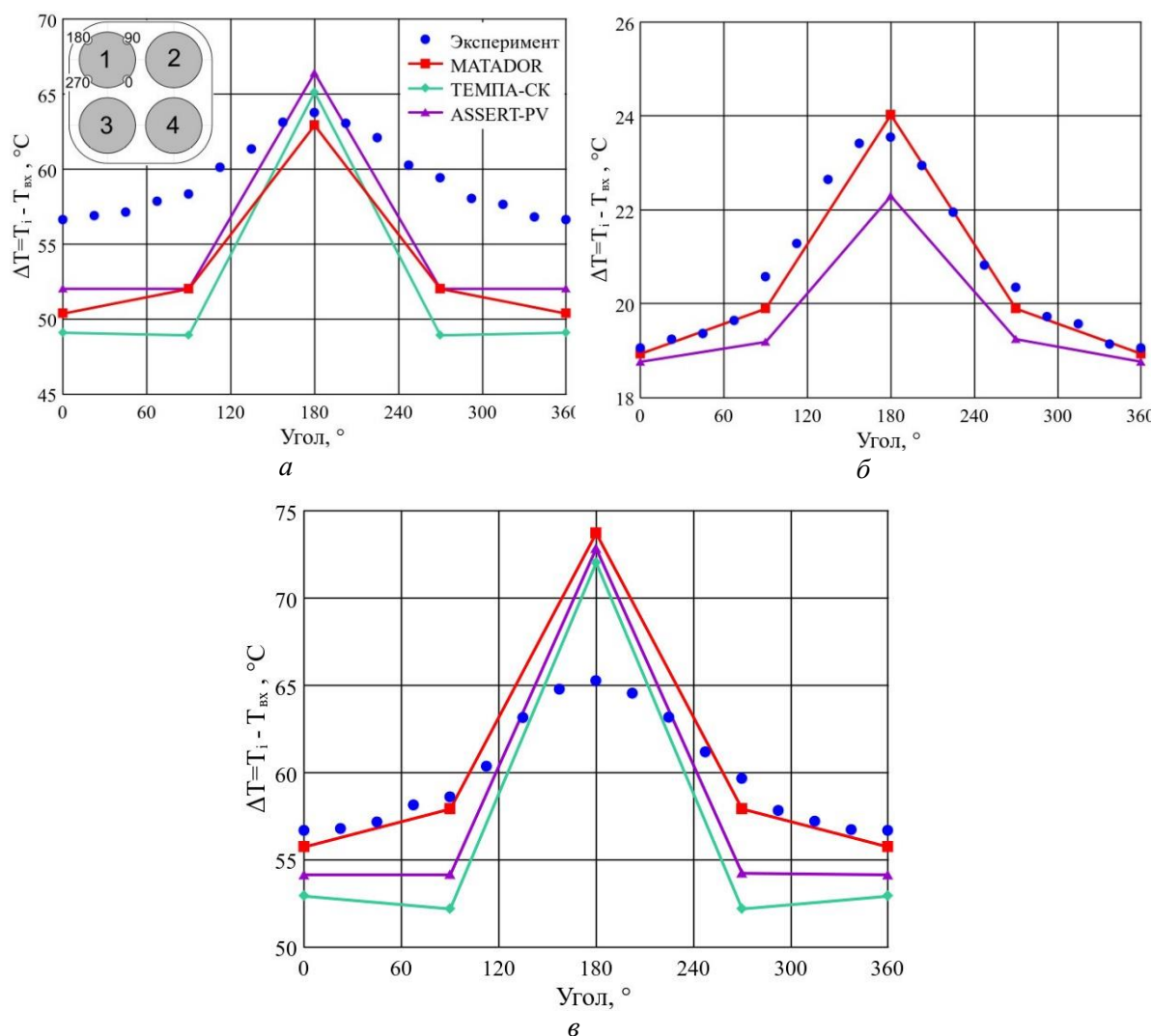


Рис. 2. Распределения температур стенки по окружности стержня № 1 при режимных параметрах $P = 25$ МПа, $G = 1000$ кг/м²·с, $q = 400$ кВт/м²:

a - $T_{вх} = 216$ °C, *б* - $T_{вх} = 375$ °C, *в* - $T_{вх} = 417$ °C

В таблице приведены средние расхождения расчетных значений по различным программам от экспериментальных данных.

Средние расхождения расчетных значений от экспериментальных данных

Эксперимент	MATADOR	ТЕМПА-СК	ASSERT-PV
$T_{вх} < T_{пк}$ (рис. 2а)	0,09	0,12	0,09
$T_{вх} \approx T_{пк}$ (рис. 2б)	0,02	—	0,05
$T_{вх} > T_{пк}$ (рис. 2в)	0,05	0,10	0,08

Во всех случаях, как эксперименты, так и расчеты показывают симметричное изменение температур стенки по окружности стержней с максимумом в секторах,

обращенных к угловым каналам. Поячейковые программы позволяют определить только средние значения температур теплоносителя и участков стержней в пределах одного контрольного объема. Этими причинами можно объяснить некоторое расхождение расчетных значений по программам от экспериментальных данных. На результаты также могло повлиять отсутствие проверенных методик учета турбулентного переноса массы, импульса и энергии в поперечном направлении при течении сверхкритических сред. При этом из таблицы видно, что результаты расчетов по программе MATADOR точнее описывают экспериментальные данные по сравнению с другими программами-аналогами.

2.2 Задача № 2

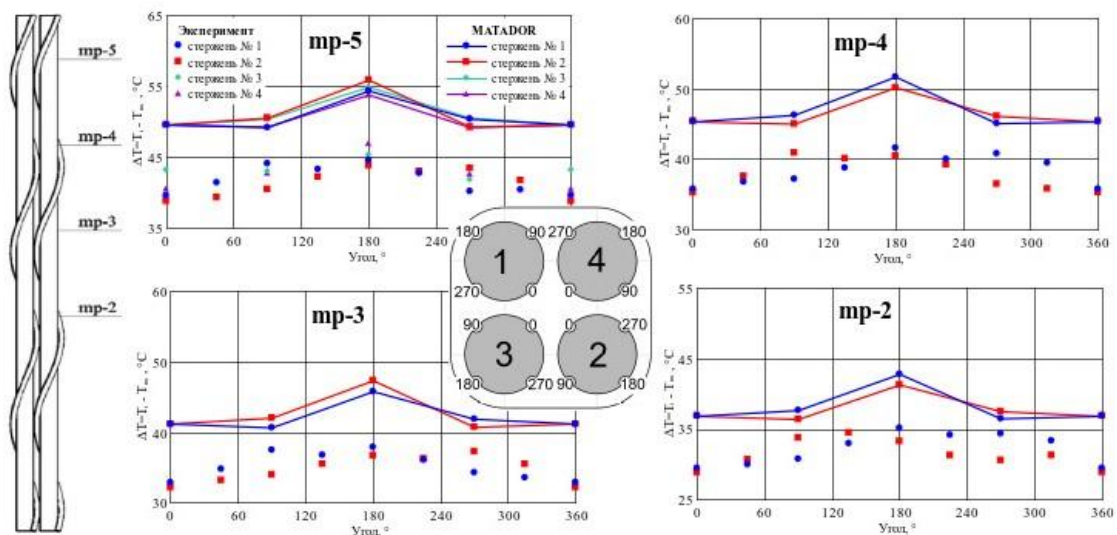
Во второй задаче пучок стержней аналогичен модели первой задачи, за исключением наличия на имитаторах твэлов навитой проволоки по всей длине. Проволока из нержавеющей стали с наружным диаметром 1,2 мм располагалась по спирали вокруг каждого обогреваемого стержня с шагом навивки 200 мм.

Температуры стенок были получены на всех обогреваемых стержнях. Подвижные термопары были установлены внутри двух стержней, а неподвижные термопары были прикреплены внутри двух других стержней. Измерения температур стенки каждого обогреваемого стержня проводились на пяти высотных отметках, которые находились на расстоянии 150, 250, 350, 450 и 550 мм от входа в обогреваемый участок. Но данные по первой высотной отметке не приведены в открытых источниках, поэтому он не рассматривался в расчетном анализе.

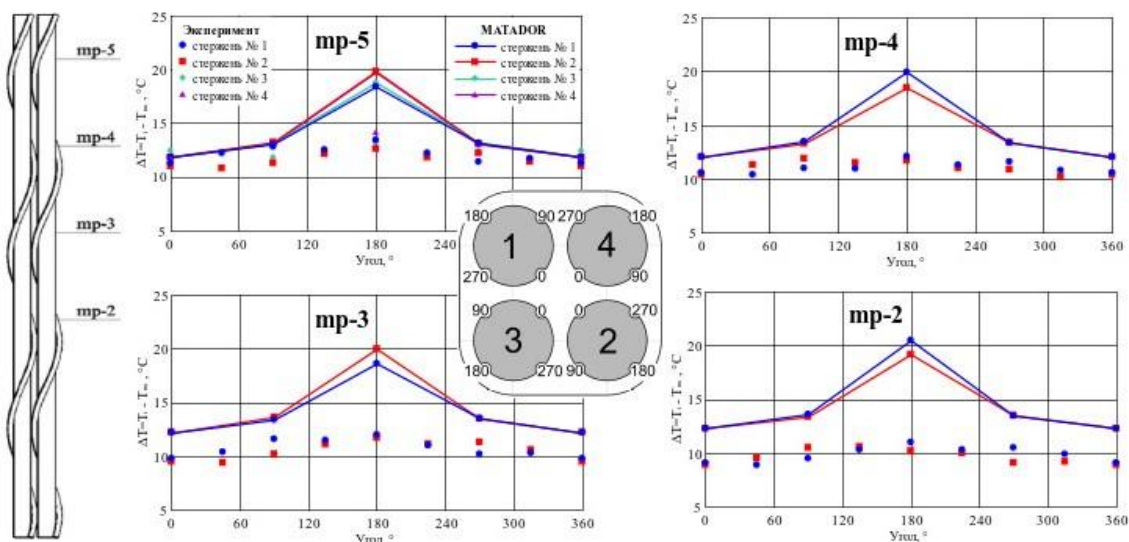
В программе MATADOR влияние спиральной навивки по окружности нагреваемых стержней учитывалось геометрическим методом, путем изменения площади проходного сечения и гидравлического диаметра основных каналов и площади поперечного сечения каналов связи по высоте расчетной области. При появлении навивки в ячейке основного канала, его площадь проходного сечения уменьшается, а смоченный периметр увеличивается, вследствие этого уменьшается гидравлический диаметр ячейки. Предполагается, что проволока располагается вертикально прямо, параллельно стержню в каждом контрольном объеме. На один полный оборот проволоочной навивки приходится 24 высотных слоя, что соответствует 15 градусам поворота проволоки вокруг стержней на один слой.

Начало отсчета по азимуту и направление изменения угла поворота зонда показаны на рис. 3 вместе с сопоставлением экспериментальных значений из [6] и результатов расчетов по программе MATADOR.

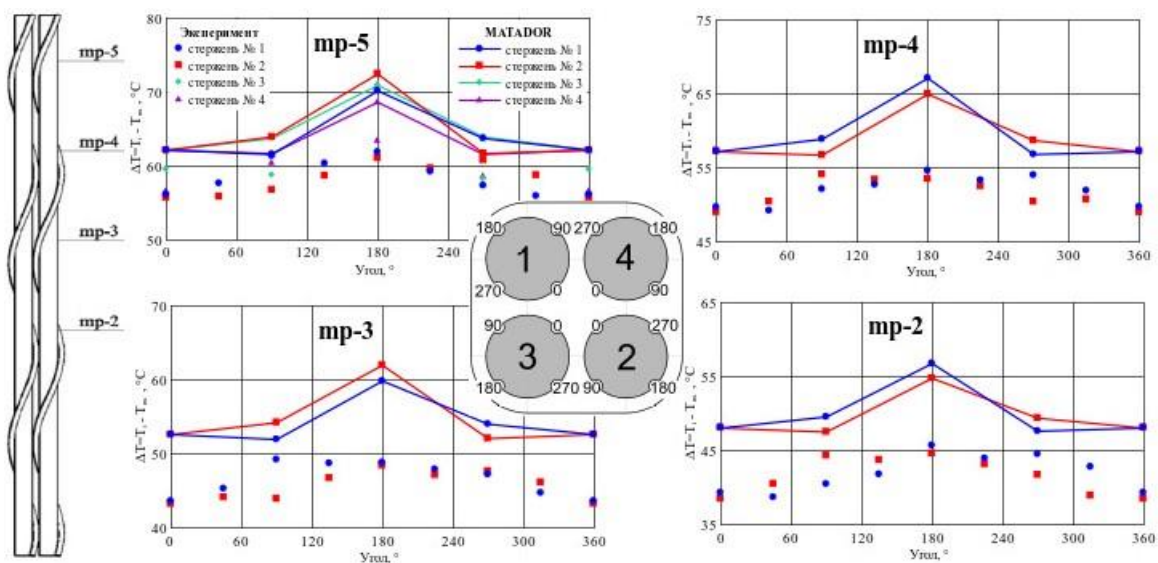
Общая тенденция завышения результатов расчетов по программе MATADOR наблюдается во всех экспериментах. Максимальное расхождение температур составляет около 10 °С. В экспериментальных данных замечен эффект смещения максимума температур стенки по окружности стержней из угловых в боковые каналы, что говорит об интенсификации процесса перемешивания теплоносителя по сравнению с пучком гладких стержней. Приведенный эффект не удалось описать с помощью программы MATADOR из-за того, что внедренные в программу замыкающие соотношения для расчетов коэффициентов теплоотдачи и межканального обмена применимы только для пучков гладких стержней. Систематическое завышение расчетных значений над экспериментальными, также может быть объяснено тепловыми потерями, величина которых не была оценена и представлена в статье китайских специалистов.



а



б



в

Рис. 3. Распределения температур стенки по окружности стержней при режимных параметрах $P = 25$ МПа, $G = 1000$ кг/м²·с, $q = 400$ кВт/м²:
а – $T_{вх} = 267$ °С, б – $T_{вх} = 378$ °С, в – $T_{вх} = 419$ °С

2.3 Задача № 3

Обширные исследования влияния дистанционирующей навивки на формирование потока были проведены для жидкометаллических теплоносителей. В рамках Международного бенчмарка, организованным МАГАТЭ, на стенде NACIE-UP выполнены эксперименты, в которых моделировались динамические процессы при переходе от принудительной к естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя в контуре. В работе [7] опубликованы результаты измерений локальных температур теплоносителя и оболочек имитаторов твэлов эксперимента ADP 10 в стационарном режиме, который был смоделирован в программе MATADOR.

Экспериментальный канал состоял из 19 стержней с проволочной навивкой, расположенных в треугольной решетке и охлаждаемых свинцово-висмутовым теплоносителем. Имитаторы твэлов имели наружный диаметр 6,55 мм и обогреваемую длину 600 мм. Проволочная навивка с наружным диаметром 1,75 мм располагалась по спирали вокруг каждого обогреваемого стержня с шагом навивки 262 мм.

Экспериментальный канал оснащен в общей сложности 64 термopарами. На трех высотных отметках располагались 5 термopар, измеряющих температуру теплоносителя в каналах, и 12 термopар, встроенных в оболочки имитаторов твэлов. Высотные отметки расположены на расстоянии 38, 300 и 562 мм от начала обогреваемого участка. Расположение термopар (контрольных точек) показано на рис. 4. Стержень № 3 оснащен 13 термopарами, встроенными в стенку и размещенными вдоль через каждые 43 мм от первой высотной отметки.

В программе MATADOR влияние спиральной навивки учитывалось геометрическим методом. Расчетная модель состояла из 42 основных каналов и 60 каналов связи. По высоте пучок разбивался на 111 слоев. На один полный оборот проволочной навивки приходится 24 слоя.

На рис. 4 и 5 приведены результаты экспериментальных данных, результаты расчета по программе MATADOR и CFD расчета из [7]. Данные по первой высотной отметке не рассматривались при анализе результатов расчетов из-за низкого подогрева теплоносителя в каналах.

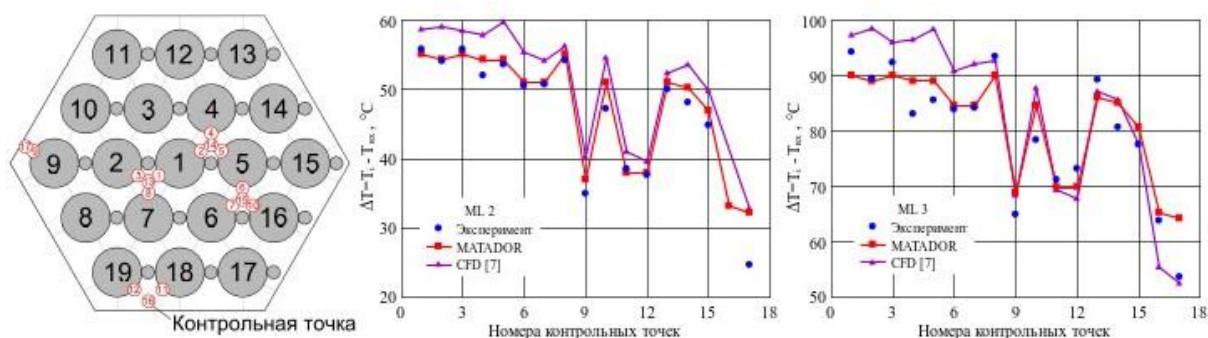


Рис. 4. Распределения температур оболочки имитаторов твэлов и теплоносителя на высотных отметках ML 2 и ML 3

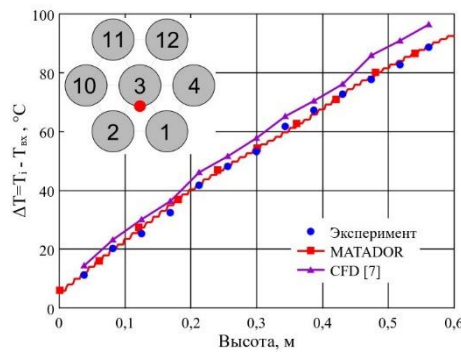


Рис. 5. Распределения температур оболочки имитатора твэла № 3 по высоте обогреваемого участка

Из представленных результатов расчетов можно сделать вывод о том, что программа MATADOR позволяет корректно описывать общий тренд распределения температур оболочки стержней и теплоносителя в пучках тепловыделяющих стержней с проволоочной навивкой. Количественная оценка отклонений результатов расчетов от экспериментальных данных показала, что среднее значение расхождения температур по программе MATADOR составило 9 %.

Заключение

В работе представлен один из этапов валидации программы MATADOR. Выполненные расчетные исследования различных экспериментов позволили сделать следующие выводы:

1. В экспериментах на гладком пучке стержней, охлаждаемом водой при сверхкритическом давлении, наблюдается хорошее совпадение результатов расчетов по программе MATADOR с экспериментальными данными и результатами расчетов по аналогичным программам. Расчетные значения по программе MATADOR и экспериментальные данные в среднем отличаются не более чем на 10 %;

2. Проведенные расчеты экспериментов охлаждения пучка стержней с дистанционирующей проволоочной навивкой водой при сверхкритическом давлении показали неудовлетворительные результаты. Одна из причин – недостаточная изученность процессов теплообмена при заданных условиях. В настоящее время не существует подходящих корреляций для расчета коэффициентов теплоотдачи и межканального обмена при охлаждении пучков стержней со спиральной навивкой водой при сверхкритическом давлении. Эти проблемы являются общемировыми и необходимо проведение дополнительных исследований для их решения;

3. На основе качественного и количественного анализа подтверждена высокая точность расчетного моделирования программой MATADOR эксперимента с охлаждением пучка стержней со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Список литературы

1. Залесов А.С., Чуркин А.Н. Программа MATADOR для расчета локальных неоднородных процессов теплопереноса в пучках тепловыделяющих стержней // Сборник докладов «XXII Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам». 2022. С. 427–442.
2. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow // Hemisphere Publishing Corporation. 1980. 124 p.
3. Wang H., Bi Q., Wang L., Leung L. Experimental investigation of heat transfer from 2×2 rod bundle to supercritical water // Nuclear Engineering and Design. 2014. P. 205–218.
4. Баисов А.М., Чуркин А.Н. Валидация программы ТЕМПА-СК на экспериментах с пучками тепловыделяющих стержней, охлаждаемых водой сверхкритического

давления // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия: «Физика ядерных реакторов». 2022. Вып. 3. С. 4–15.

5. Rao Y.F., Onder E.N., Podila K. Assessment of subchannel code ASSERT-PV for supercritical applications // Journal of Supercritical Fluids. 2016. Vol. 117. P. 164–171.
6. Wang H., Bi Q., Leung L. Heat transfer from 2×2 wire-wrapped rod bundle to supercritical pressure water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. P. 486–501.
7. Marinari R., Di Piazza I., Tarantino M., Angelucci M., Martelli D. Experimental test and post-test analysis of non-uniformly heated 19-pins fuel bundle cooled by Heavy Liquid Metal // Nuclear Engineering and Design. 2019. P. 166–177.