

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРА БН

Рогожкин С.А.¹, Крылов А.Н.¹, Осипов С.Л.¹, канд. техн. наук, Сазонова М.Л.², канд. физ.-мат. наук, Шепелев С.Ф.¹,
канд. техн. наук, Шмелев В.В.²

¹ ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия

² ООО «ТЕСИС», Москва, Россия

В настоящее время в соответствии с Федеральной целевой программой «Ядерные энерготехнологии нового поколения» в ОКБМ ведется разработка проекта реактора четвертого поколения БН-1200.

Конструктивная схема реактора БН-1200 представлена на рис. 1.

В табл. 1 приведены технические характеристики



- 1 - Промежуточный теплообменник
- 2 - Основной корпус
- 3 - Страховочный корпус
- 4 - Опорный пояс
- 5 - Напорная камера
- 6 - Устройство сбора топлива
- 7 - Активная зона
- 8 - Напорный трубопровод
- 9 - Главный циркуляционный насос
- 10 - Поворотные пробки
- 11 - Исполнительные механизмы СУЗ
- 12 - Механизм перегрузки ТВС

Рис. 1 – Конструктивная схема реактора БН-1200

Табл. 1 – Технические характеристики реактора БН-1200

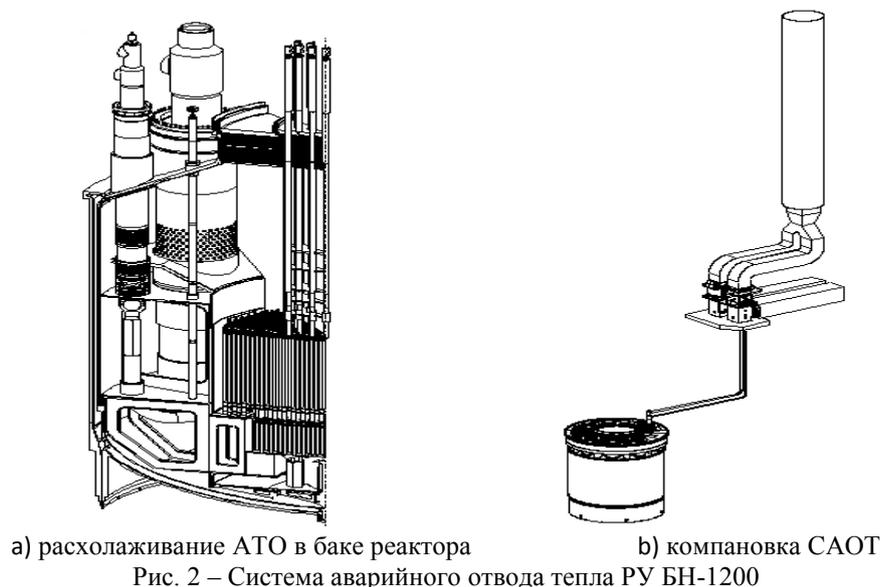
Наименование характеристики	БН-1200
Номинальная тепловая мощность, МВт	2800
Количество теплоотводящих петель	4
Температура теплоносителя по первому контуру, °С:	550
- на входе в ПТО;	410
- на выходе из ПТО.	
Температура теплоносителя по второму контуру, °С:	527
- на входе в ПГ;	355
- на выходе из ПГ.	
Срок службы РУ, год	60

Технические решения, заложенные в проект БН-1200, направлены на повышение безопасности и увеличение срока службы РУ.

Увеличение срока службы и повышение безопасности, проектируемой реакторной установки, не может быть достигнуто без достоверной информации о теплогидравлических характеристиках теплоносителя в элементах контура циркуляции реактора. В последние годы для обоснования теплогидравлических характеристик все чаще используются методы вычислительной гидродинамики (CFD коды), основанные на современных компьютерных технологиях.

Одним из принципиальных решений является, введение в корпус реактора БН-1200 оборудования системы аварийного отвода тепла - САОТ. САОТ предназначен для отвода остаточных тепловыделений, от остановленного реактора к конечному поглотителю – атмосферному воздуху. Система состоит из четырех независимых петель, каждая из которых включает в себя три теплопередающих контура: контур в баке реактора, промежуточный и воздушный контуры (рис. 2).

Натрий первого контура, циркулируя через АТО и тепловыделяющие сборки, отводит тепло от активной зоны реактора. Натрий промежуточного контура циркулирует через АТО, расширительный бак, два воздушных теплообменника натрий-воздух и передает тепло от натрия (первого контура), к атмосферному воздуху. В воздушном контуре воздух проходит через воздухопроводы, ВТО с шиберами, вытяжную трубу и сбрасывается в атмосферу. Во всех контурах САОТ реализуется естественная циркуляция теплоносителей. Данная система расхолаживания обеспечивает прямой отвод теплоносителя из АТО трубопроводом с обратным клапаном в напорную камеру. Работа обратного клапана осуществляется следующим образом: запорный элемент перекрывает сечение проточной части под действием потока теплоносителя при работе насоса, или открывает его, опускаясь в исходное положение при отключении насоса под действием собственного веса.



Опыт эксплуатации реактора БН-600, результаты экспериментальных исследований на моделях и численного моделирования для реакторов БН-600 и БН-800 показали, что в верхней камере реактора и на входе в теплообменники существует температурное расслоение теплоносителя (стратификация) [1].

Процессы температурной стратификации теплоносителя приводят к формированию застойных и рециркуляционных зон, с большими градиентами и пульсациями температур на границах раздела изотермических зон, которые обуславливают дополнительные термоциклические нагрузки на оборудование и могут оказывать существенное влияние на ресурс несущих конструкций.

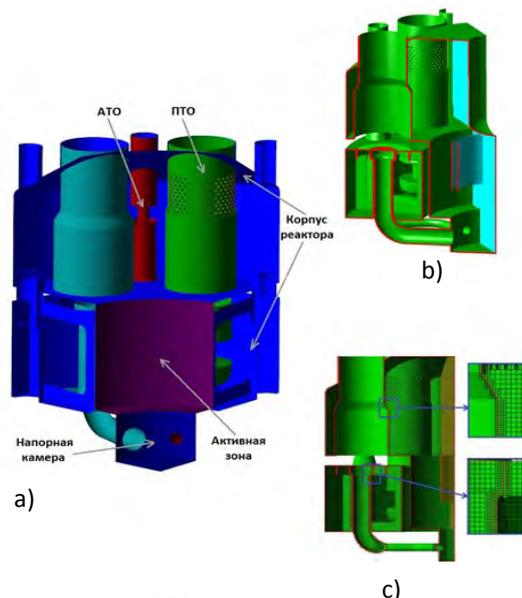
Целью численного моделирования является, исследование особенностей теплогидравлики стратифицированного потока в элементах контура циркуляции быстрого реактора в различных режимах эксплуатации, разработка рекомендаций по уменьшению температурной неоднородности, а также подтверждение принятых проектных решений об эффективности пассивной системы аварийного отвода тепла с погружными теплообменниками в верхней камере реактора.

Моделирование проведено для сектора, приведенного на рис. 3, с использованием ПС FlowVision. Модель подготовлена с учетом следующих конструктивных элементов:

- напорный трубопровод от насоса, к напорной камере;
- напорная камера;
- активная зона;
- опора ПТО;
- АТО, с обратным клапаном;
- камера смешения.

Рассматривается два режима работы реактора:

- номинальный режим (вынужденная конвекция);
- режим расхолаживания через САОТ, после срабатывания аварийной защиты и остановки насосов первого и второго контуров (естественная конвекция).



a – сектор геометрической модели реактора БН-1200

b – расчетная модель

c – фрагмент расчетной сетки

Рис. 3 – Расчетная модель РУ БН-1200

Моделирование реакторного оборудования (ПТО ГЦН, напорная камера, активная зона) осуществлялось с использованием методик, позволяющих избежать прямого моделирования оборудования. Решение задачи, с прямым моделированием реакторного оборудования, существенно усложняет задачу и приводит к увеличению потребности в используемых вычислительных ресурсах и, как следствие, времени решения задачи. В связи с этим, моделирование теплообменников и насосов проводилось с использованием метода замены их сплошной пористой средой, имеющей эквивалентное гидравлическое сопротивление. При этом отвод тепла в теплообменнике, моделировался с помощью отрицательного источника мощности.

В активной зоне выделены три области: ТВС, ТВС БЗВ, СБЗ и ТВС в ВРХ (рис. 4), в которых задавались объемные источники тепла. При таком способе моделирования, как показали результаты тестовых расчетов, возникает радиальное распространение тепла в активной зоне от области ТВС с наибольшим тепловыделением к областям: ТВС БЗВ и СБЗ и ТВС в ВРХ. В реальной конструкции этого не происходит из-за наличия чехла (обечайки) ТВС. В связи с этим, для корректного моделирования подогрева теплоносителя в активной зоне, в данных областях, были добавлены цилиндрические стенки, разделяющие области ТВС и препятствующие теплообмену между ними. Высота стенок от нижнего уровня зоны тепловыделения ТВС БЗВ до выхода из активной зоны.

В качестве граничных условий, на входе в напорный трубопровод, задавались значения давления, температуры и начальной степени турбулизации потока теплоносителя (k и ϵ). Для режима расхолаживания на входе задавалось изменение давления от времени (имитировался выбег ГЦН с номинальных оборотов).

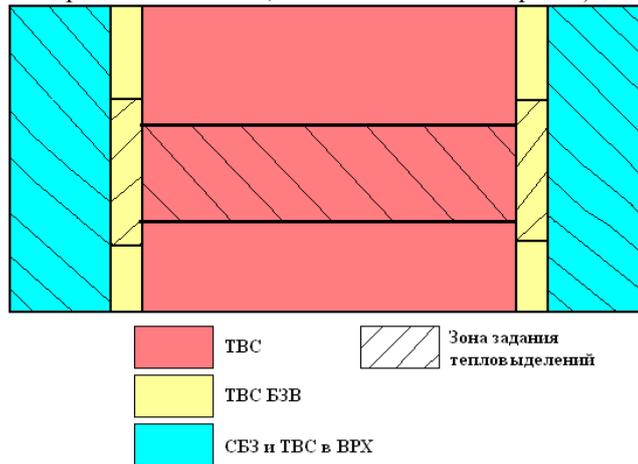


Рис. 4 – Расчетная модель активной зоны реактора БН-1200

В результате численного моделирования определены значения расходов и температур теплоносителя на выходе из активной зоны. Проведено сравнение с контрольными значениями, полученными на основе детальных расчетов активной зоны по специализированным программам. Используемый подход к моделированию, представление активной зоны тремя областями с заданным тепловыделением и гидродинамическим сопротивлением, позволяет получить характеристики на выходе из активной зоны с погрешностью менее 3%. Полученные результаты представлены на рис. 5 и 6.

В номинальном режиме работы обратный клапан АТО находится в закрытом положении. Давление и температура в подводящем канале от АТО к напорной камере принимают постоянные значения соответствующие параметрам напорной камеры. В верхней камере реактора вблизи ПТО и АТО образуются вихревые зоны, способствующие перемешиванию разнотемпературных потоков теплоносителя, выходящих из активной зоны. Однако полного перемешивания не происходит и на входе в теплообменники существует температурное расслоение теплоносителя.

Результаты расчета режима расхолаживания с использованием системы аварийного отвода тепла через САОТ представлены на рис. 7 в графическом виде, а на рис. 8 и 9 в виде графиков изменения температур теплоносителя на входе в АТО и активную зону от времени.

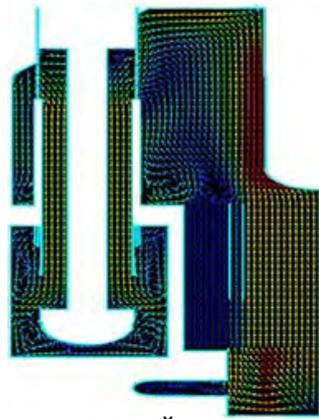
Температура натрия первого контура на входе в ПТО и АТО начинает уменьшаться через 20-30с с начала режима расхолаживания за счет отвода тепла во второй контур, при выбеге насосов. К моменту открытия клапана (49 с), температура на входе в АТО достигает значения около 490 °С. Температура в подводящем трубопроводе от АТО к напорной камере, при закрытом обратном клапане постоянна и равна 410 °С.

К 47с режима расхолаживания изменяется характер течения теплоносителя в верхней камере реактора. Движение натрия вверх после выхода из активной зоны наблюдается только вблизи днища ЦПК. Далее направление потока меняется на горизонтальное образуя вихрь.

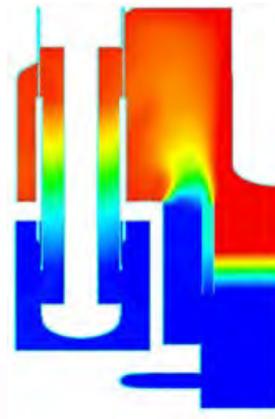
Через 68с, с начала режима расхолаживания, начинает формироваться движение теплоносителя в подводящем трубопроводе от напорной камеры вверх к АТО, под действием избыточного давления после открытия обратного клапана. Часть охлажденного натрия из АТО попадает в верхнюю смесительную камеру реактора.

К 148 с после останова ГЦН-1, формируется движение теплоносителя от АТО вниз к напорной камере, охлажденный натрий начинает поступать в подводящий трубопровод и к 200с достигает активной зоны.

Установившийся режим расхолаживания в реакторе наблюдается после 1000 с. Полученные результаты подтверждают эффективность системы аварийного отвода тепла с погруженными теплообменниками.

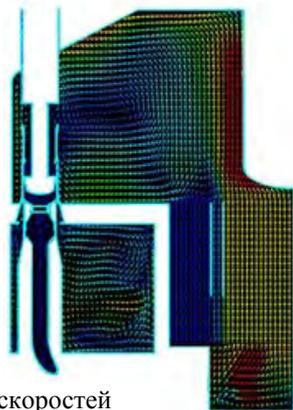


a) – поле скоростей

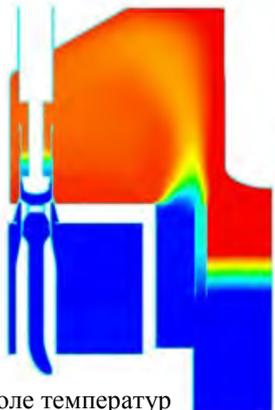


b) поле температур

Рис. 5 – Результаты численного моделирования для номинального режима (плоскость, секущая ПТО)



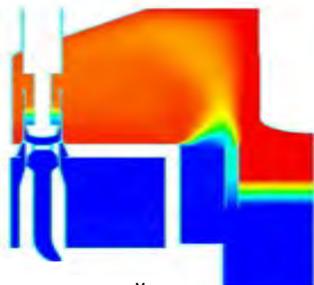
a) поле скоростей



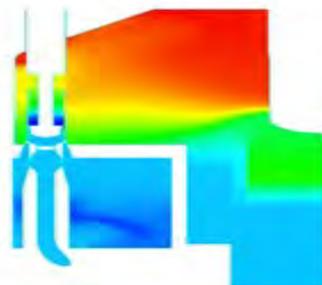
b) поле температур

Рис. 6 – Результаты численного моделирования для номинального режима (плоскость, секущая АТО)

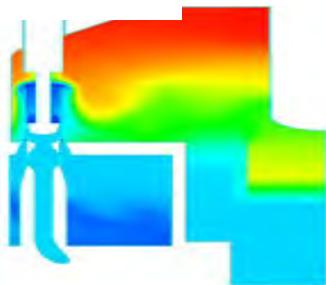
550



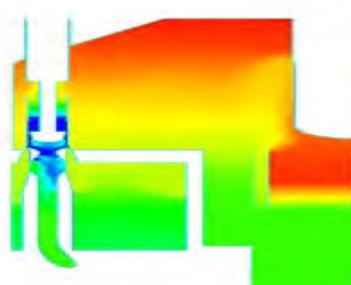
a) исходное состояние - номинальный режим



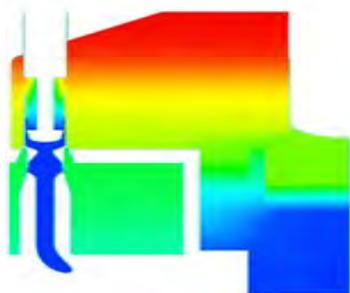
b) момент времени 47с



c) момент времени 68с



d) момент времени 148с



e) момент времени 2980с-
установившийся режим течения

Рис. 7 – Результаты численного моделирования для режима расхолаживания с помощью САОТ в плоскости секущей АТО (поля температур)

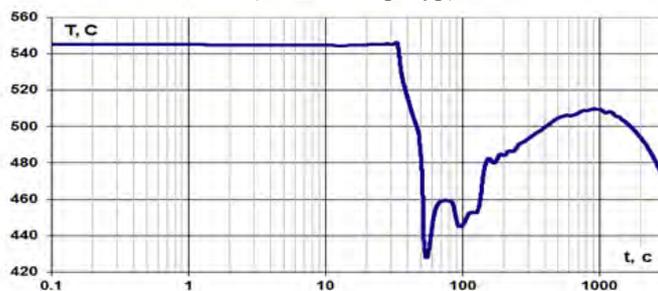


Рис. 8 – Изменение температуры теплоносителя на входе в АТО в режиме расхолаживания с помощью САОТ

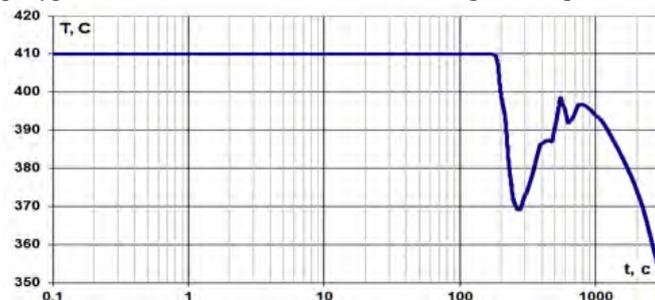


Рис. 9 – Изменение температуры теплоносителя на входе в АТО в активную зону в режиме расхолаживания с помощью САОТ

Проведено исследование теплогидравлики, стратифицированного потока в элементах контура циркуляции реактора БН-1200 в различных режимах эксплуатации.

Подтверждена эффективность пассивной системы аварийного отвода тепла с погружными теплообменниками.

Показана эффективность использования методов вычислительной гидродинамики при обосновании теплогидравлических характеристик реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

Список литературы

1. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф., Сазонова М.Л., Шмелев В.В. Опыт применения и проблемы верификации CFD кодов в проектах реакторов БН // Сборник тезисов научно-технического семинара «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», Н.Новгород, 2012.