

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ БЫСТРОГО РАСПЛАВНОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА-ПЕРЕЖИГАТЕЛЯ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ

А. А. Фролов, А. А. Седов

*НИИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Россия, Москва, пл. Курчатова, 1*

*e-mail: frolov@dhtp.kiae.ru*

Быстрый расплавносолевой реактор с полостной активной зоной предлагается в качестве установки для выжигания и трансмутации минорных актинидов из отработавшего ядерного топлива реакторов типа ВВЭР-1000. В докладе приводятся результаты моделирования динамики первого контура интегральной компоновки. Также представлены результаты серии расчетов модели полостной активной зоны, проделанных с использованием современного кода вычислительной гидродинамики OpenFOAM. Проведенные расчеты показали, что использование различных турбулентных моделей приводит к получению не только количественно, но и качественно различающихся картин течения в полостной активной зоне.

## **Введение**

Для эффективного использования топлива в ядерной энергетике (ЯЭ) необходимо искать способы вовлечения трансурановых нуклидов, накапливающихся в ходе эксплуатации АЭС, в топливный цикл ЯЭ, замыкать его не только по U, Th и Pu, но также использовать Np, Am, Cm, Bk, Cf. Необходимо разработать такие реакторы, отвечающие современным требованиям по безопасности, которые могли бы эффективно утилизировать трансурановые элементы.

Присутствие минорных актинидов (МА) и продуктов деления в твердотопливных реакторах на тепловых и быстрых нейтронах может усложнить конструкции этих реакторов, отрицательно сказаться на их безопасности, потребует разработки новых видов топлива. Более всего для цели сжигания МА и трансмутации некоторых долгоживущих продуктов деления подходят высокопоточные реакторы с расплавносолевым теплоносителем.

Концепция расплавносолевых ядерных реакторов строится на использовании топлива в жидкой фазе, допускающей непрерывную коррекцию его состава в процессе работы реактора.

В жидком топливе фторидные соединения U, Pu, MA растворены в расплаве неорганических солей. Такая топливная композиция циркулирует в контуре, образованном ядерным реактором, подводными коммуникациями, насосом и теплообменником, где тепло передается теплоносителю второго контура. Параллельно основному контуру циркуляции существует малый байпасный контур, в котором производится управление ядерно-физическим составом и физико-химическими свойствами топлива: топливная композиция освобождается от газообразных и нерастворимых продуктов деления.

Концептуальное проектирование расплавносолевого реактора, играющего роль трансмутатора-пережигателя, проводимое в течение ряда лет НИЦ “Курчатовский институт” совместно с ОКБ “Гидропресс”, НИИАР и ВНИПИЭТ показало, что для энерготехнологического комплекса с высокопоточным быстрым реактором на жидких солях (ЭКОР) наиболее оптимальным является реактор с полостной активной зоной. Концепция использования полостной активной зоны позволяет избежать необходимости применения конструкционных материалов в условиях высокого потока нейтронов и высокой температуры химически агрессивного теплоносителя.

### **Описание реактора**

Расплавносолевой реактор предлагается в качестве установки для выжигания и трансмутации МА из отработавшего ядерного топлива реакторов типа ВВЭР-1000. Реактор ЭКОР с электрической мощностью 1 ГВт может обеспечить сжигание 1000 кг/год МА.

Первый контур ЭКОР имеет интегральную компоновку (см. рис. 1). В номинальном режиме работы установки расплав соли течет из активной зоны через подъемный участок и насос в теплообменник. Рис. 1 дает качественное представление о размещении элементов первого контура по высоте: активная зона расположена в нижней части бака, вмещающего первый контур, выход теплообменника и вход блока подводных труб расположены на одной высоте.



Рис. 1. Принципиальная схема одной петли первого контура ЭКОР

Активная зона представляет собой полый, вертикально установленный цилиндр. Его диаметр равен 2,7 м, высота – 3,1 м. В цилиндре реализуется свободное течение теплоносителя. Особенностью ЭКОР является очень высокая величина средней по активной зоне плотности нейтронного потока, достигающая  $2 \times 10^{15}$  нейтр/(см<sup>2</sup> с) при умеренной средней величине объемной энергонапряженности 160 кВт/л.

В качестве теплоносителя первого контура используется расплав топливной соли 0,89 FLiNaK + 0,11 THF3 (TH – тяжелые нуклиды, состав соли FLiNaK – 0,465 LiF + 0,115 NaF + 0,42 KF). Расход теплоносителя через активную зону – 23 т/с. Температура теплоносителя на входе в активную зону – 650°C, на выходе – 750°C. Высокий уровень температур в первом контуре обусловлен большой величиной температуры плавления расплавносолевой композиции с высоким процентом топливной составляющей. Давление теплоносителя на входе в блок подводящих труб – 1 атм.

## **Моделирование теплогидравлики первого контура установки**

Особенностью реакторной установки (РУ) ЭКОР является использование топливного расплава соли, вследствие чего необходимо аккуратно учитывать взаимовлияние нейтронно-физических, теплогидравлических и физико-химических процессов, проходящих в ней. Ограничением на машинное время, резервируемое для теплогидравлической модели динамики РУ, является необходимость параллельно с ее расчетом производить расчет аналогичных нейтронно-физической и физико-химической моделей с итерационным обменом промежуточными результатами расчетов между тремя моделями.

Для исследования теплогидравлики первого контура РУ ЭКОР применена сетевая методика моделирования, позволяющая соединять петлевые одномерные модели отдельных частей контуров с двух- и трехмерными моделями оборудования. При использовании методики, гидравлическая сеть, по которой течет теплоноситель, разбивается на отдельные протяженные элементы. Для каждого элемента записывается система одномерных нестационарных уравнений, характеризующая режимные параметры находящегося в нем теплоносителя (скорость, давление, температуру и т.п.). При относительной простоте такой модели РУ, расчет этой модели позволяет достаточно точно оценить основные теплогидравлические характеристики солевого теплоносителя в РУ.

Модель теплогидравлики петли первого контура РУ ЭКОР, реализованная в программной среде MATLAB/SIMULINK [1], применена для решения некоторых задач, возникших при конструировании установки.

Интегральная компоновка первого контура с полостной активной зоной определяет выбор направления прокачки теплоносителя через активную зону: сверху вниз. При этом горячий расплав соли с меньшей плотностью оказывается ниже холодного расплава с большей плотностью, что может привести к возникновению в контуре колебаний расхода и давления. Для проверки наличия подобных колебаний в РУ ЭКОР произведена серия расчетов модели первого контура, в которых варьировалась высота свободного уровня теплоносителя над теплообменником и блоком подводящих труб. Требовалось определить ее минимальное

значение, обеспечивающее отсутствие колебаний расхода и давления в петле. В расчетах моделировался запуск насоса и установление циркуляции теплоносителя в контуре. В ходе расчета модель сама сформировала профиль свободного уровня – рис. 2. На данном рисунке за нулевую отметку высоты принят выход теплоносителя из теплообменника, нулевую отметку радиуса – центр бака. Крайняя левая “полка” на рис. 2 соответствует средней величине высоты свободного уровня над центральной частью блока подводящих труб, крайняя правая – над теплообменником. В номинальном режиме при выбранной величине высоты свободного уровня колебания расхода и давления в контуре отсутствуют.

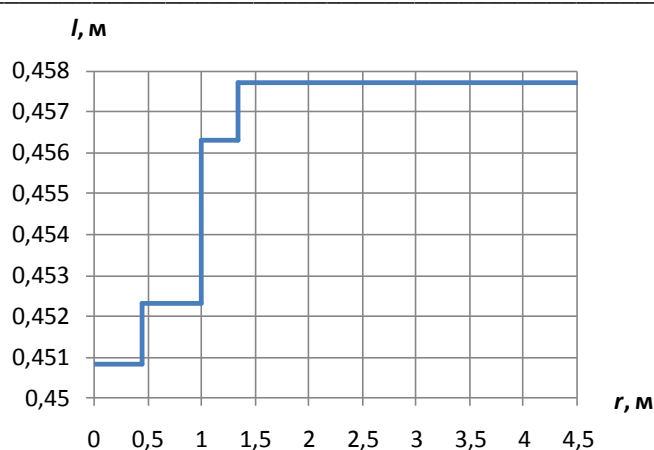


Рис. 2. Распределение высоты свободного уровня по радиусу бака, содержащего активную зону, для номинального режима работы установки

Произведено варьирование полной тепловой мощности активной зоны в пределах 20% от ее номинального значения, а также мощности, подаваемой на вал насоса, в пределах 20% от ее номинального значения. Во всех исследованных вариантах РУ переходила в ненормальные режимы работы без колебаний расхода и давления в контуре.

Проведено исследование режима естественной циркуляции теплоносителя, устанавливающегося в первом контуре в случае отключения насосов. Сделано предположение о том, что до начала аварии контур работал в номинальном режиме. В момент времени 30 с мощность, подаваемая на вал каждого насоса РУ, стала равна нулю.

По результатам расчета, в ходе развития аварии расход теплоносителя через первый контур упал, но опрокидывания циркуляции при переходе от вынужденной к естественной циркуляции теплоносителя в контуре не произошло. В установившемся режиме естественной циркуляции колебания расхода (см. рис. 3) и давления в контуре отсутствуют.

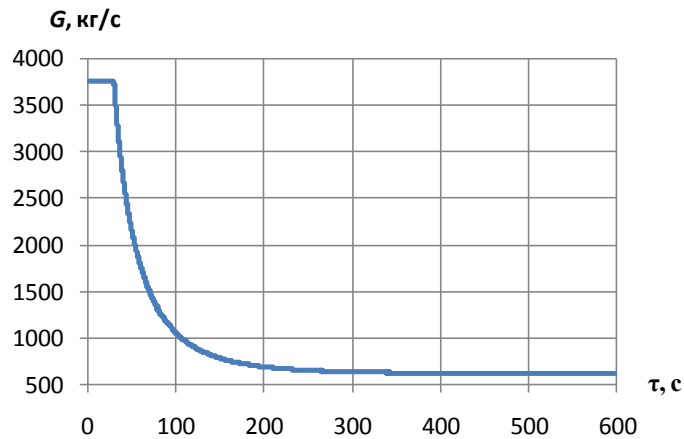


Рис. 3. Изменение во времени расхода теплоносителя на входе в теплообменник

---

В ходе развития аварии насос перешел в турбинный режим работы: вращение рабочего колеса производится не за счет подводимой извне мощности, но вследствие движения расплава соли через колесо (см. рис. 4). Однако, возможен вариант развития аварии, при котором после прекращения подачи мощности извне произойдет заклинивание насоса.

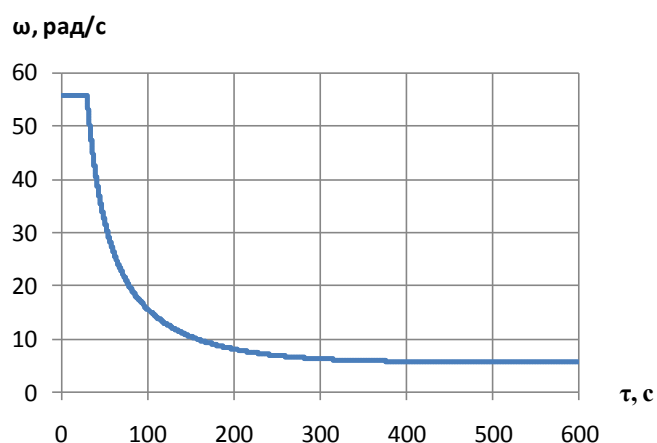


Рис. 4. Изменение во времени угловой скорости вращения рабочего колеса насоса

---

## Моделирование теплогидравлики активной зоны установки

Течение топливного расплава соли в полостной активной зоне больших размеров является свободным, без преимущественной направленности, которая свойственна кассетным активным зонам большинства реакторов с твердым топливом (ВВЭР, БН). Для свободного течения характерно доминирование турбулентных вихрей больших пространственных и временных масштабов, что способствует возникновению в объеме активной зоны и на ее границах с конструкциями реактора колебаний давлений и температур с низкими частотами в диапазоне от 0,1 до 10 Гц. При оценках работоспособности конструкций принципиально необходимо учитывать воздействие этих колебаний.

Современные коды вычислительной гидродинамики (CFD) предлагают следующие альтернативные методы расчета для моделирования гидродинамики и теплообмена в РУ:

1) моментные методы, оперирующие с осредненными по времени характеристиками (например, методы класса RANS);

2) модели с неосредненными по времени характеристиками течения, такие как модель крупных вихрей (LES), модель неприсоединенных вихрей (DES).

RANS-методы применимы к течениям в области развитой турбулентности в каналах определенной формы (трубы, пучки стержней). Использование этих моделей в больших полостях со свободным течением теплоносителя, вообще говоря, не является корректным. Тем не менее, для определения осредненных по времени характеристик течения возможно использование таких моделей. Модели LES и DES более применимы для воспроизведения динамического поведения неуставливающегося или периодически повторяющегося течения в полости активной зоны.

Для того, чтобы выделить модели, пригодные для исследования турбулентных пульсаций в активной зоне РУ ЭКОР, и получить предварительные оценки частоты пульсаций, произведена серия расчетов модели активной зоны. Геометрия, расчетная сетка и граничные условия модели в каждом расчете задавались одинаковыми, варьировалась только модель турбулентности. Расчеты проведены при помощи CFD-кода OpenFOAM [2].

1) Применение  $k-\omega$  модели турбулентных моментов.

$k-\omega$  модель турбулентных моментов является представителем класса моделей турбулентности, в которых для преобразования уравнений Навье-Стокса используется осреднение по Рейнольдсу. Получающиеся в результате уравнения Рейнольдса (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) описывают осредненное по времени течение жидкости.

Согласно результатам расчета CFD-модели возле боковых стенок активной зоны образуется крупный вихрь, в большей же части ее объема теплоноситель движется в виде струй от входа к выходу зоны, не формируя вихрей (рис. 5).

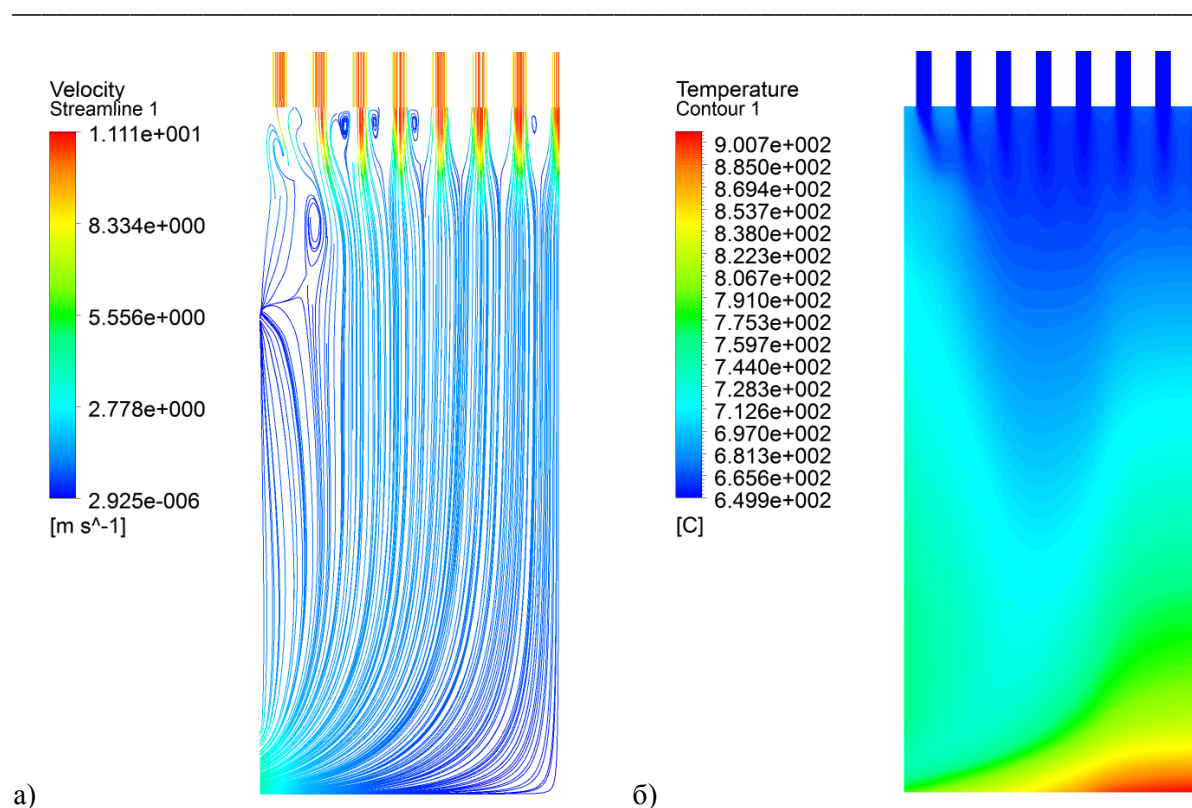


Рис. 5. Результаты расчета с использованием  $k-\omega$  модели турбулентных моментов:

- а) положение линий тока теплоносителя в радиальном сечении активной зоны
- б) поле температур теплоносителя в радиальном сечении активной зоны

Применение к уравнениям Навье-Стокса осреднения по Рейнольдсу привело к потере информации о турбулентных флуктуациях малых масштабов и, как следствие, получению в качестве результата расчета стационарной картины течения теплоносителя.



2) Применение модели крупных вихрей (LES) с моделью Смагоринского для расчета подсеточной турбулентной вязкости.

В модели LES используется альтернативный осреднению по Рейнольдсу подход, при котором движение больших вихрей явно рассчитывается в ходе нестационарного моделирования с помощью “фильтрованных” уравнений Навье-Стокса. Влияние на турбулентное течение малых вихрей учитывается в методе при помощи дополнительных моделей (например, модели Смагоринского).

Результаты расчета показывают, что течение теплоносителя в активной зоне имеет нестационарный характер, постоянно формируются, меняют свои размеры вихри и затопленные струи (см. рис. 6). Соответственно меняется поле температур – рис. 7.

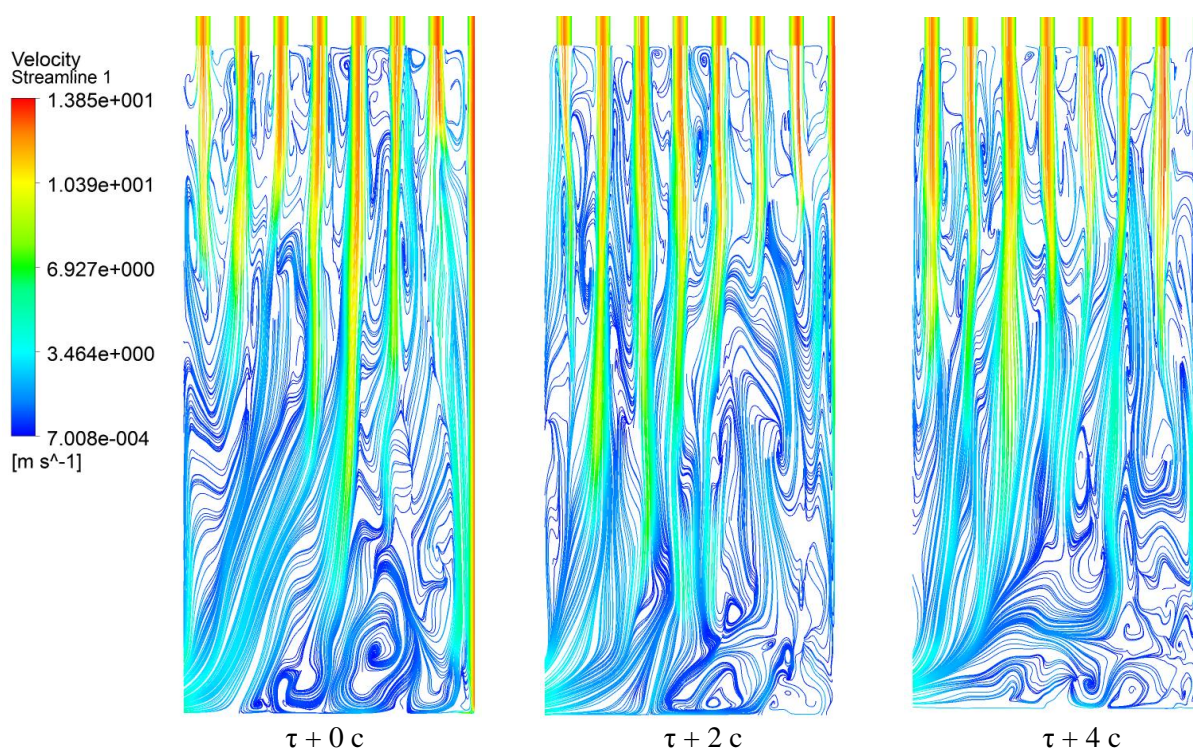


Рис. 6. Изменение положений линий тока теплоносителя в радиальном сечении активной зоны с течением времени (использована модель крупных вихрей)

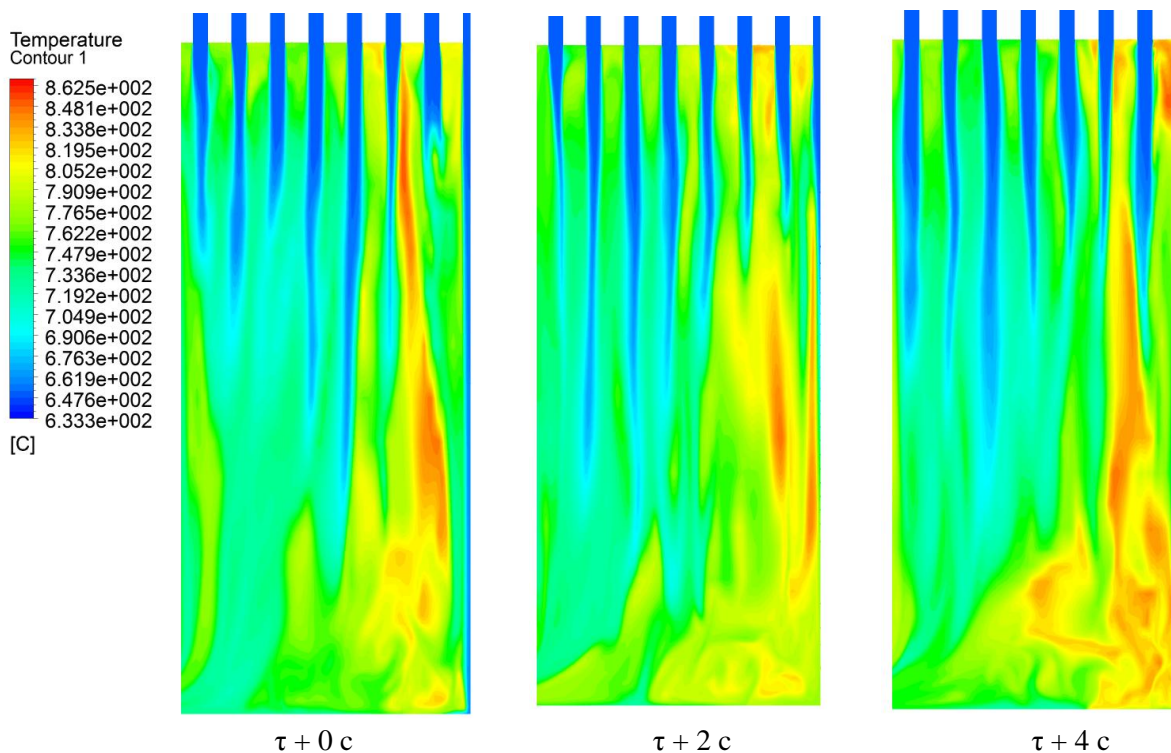


Рис. 7. Изменение поля температур теплоносителя в радиальном сечении активной зоны с течением времени (использована модель крупных вихрей)

В активной зоне наблюдаются колебания давлений и температур с периодом, приблизительно равным 20 с, на которые накладываются более частые колебания с периодом 2 - 3 с. Осредненная по времени картина течения теплоносителя, полученная с использованием метода крупных вихрей (затопленные струи, множественные вихри), не соответствует картине течения, рассчитанной с использованием  $k-\omega$  модели. В картине течения, полученной с использованием модели LES, имеется нефизичная аномалия: струя теплоносителя, выходящая из центрального канала блока подводящих труб сохраняется в объеме активной зоны, не размываясь и достигая ее дна. Качественно объяснить появление такой струи в теплоносителе с большой вязкостью невозможно, ее возникновение – следствие ошибок турбулентной модели.

### 3) Применение модели неприсоединенных вихрей (DES).

Результаты расчета с использованием модели DES показывают, что течение теплоносителя в активной зоне имеет нестационарный характер. Наблюдаются частые

колебания давлений и температур с периодом, приблизительно равным 1,5 с. Пример такого колебания представлен на рис. 8.

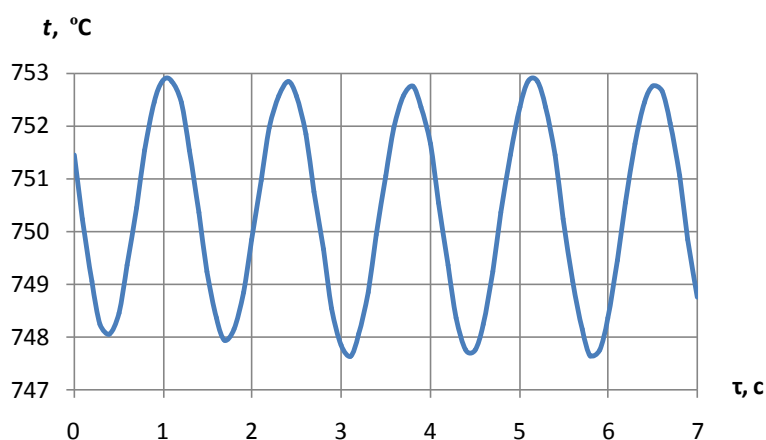


Рис. 8. Изменение во времени значения среднемассовой температуры теплоносителя на выходе из активной зоны (использована модель неприсоединенных вихрей)

---

Картина течения теплоносителя, полученная с использованием модели DES (рис. 9 – один крупный вихрь у боковых стенок, меняющий форму с течением времени; в остальной части активной зоны вихрей нет, положение струй теплоносителя не меняется во времени), схожа с картиной течения, рассчитанной с использованием  $k-\omega$  модели турбулентных моментов. Поле температур теплоносителя, рассчитанное с использованием модели DES, представлено на рис. 10.

По результатам расчетов, модели LES и DES демонстрируют неустановившийся характер течения в активной зоне, причем в обоих случаях колебания скоростей, давлений и температур происходят в субгерцовом диапазоне частот.

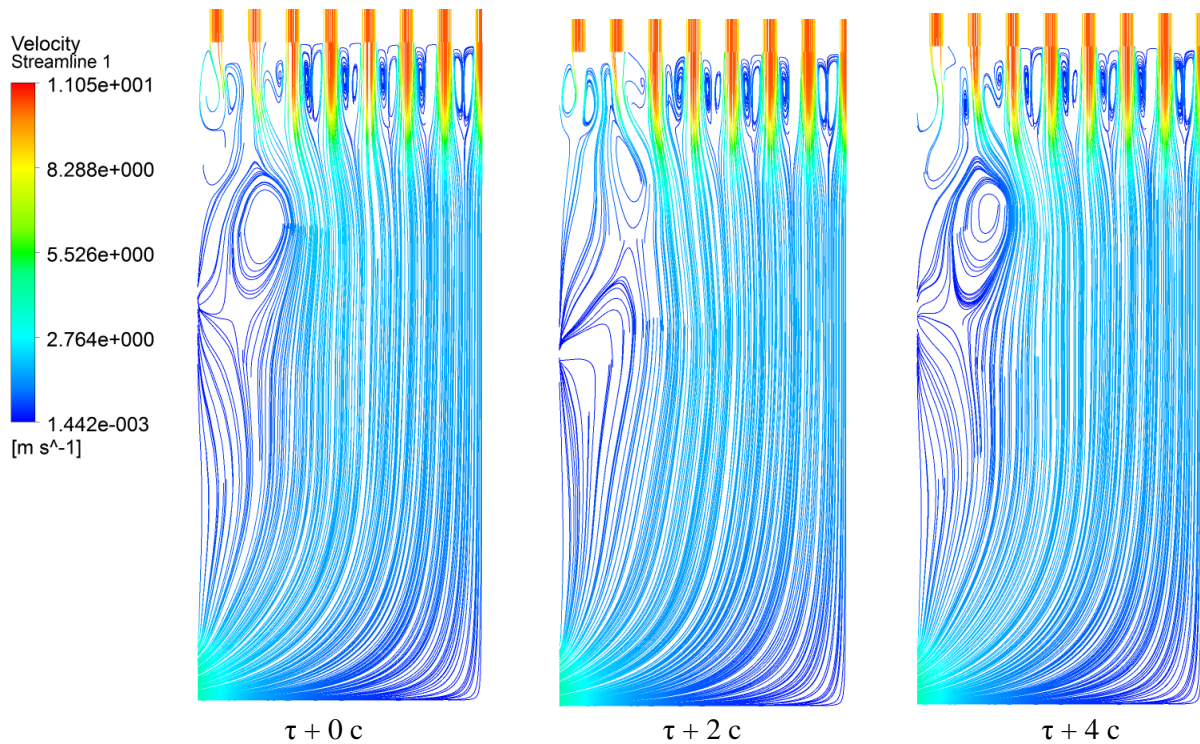


Рис. 9. Изменение положений линий тока теплоносителя в радиальном сечении активной зоны с течением времени (использована модель неприсоединенных вихрей)

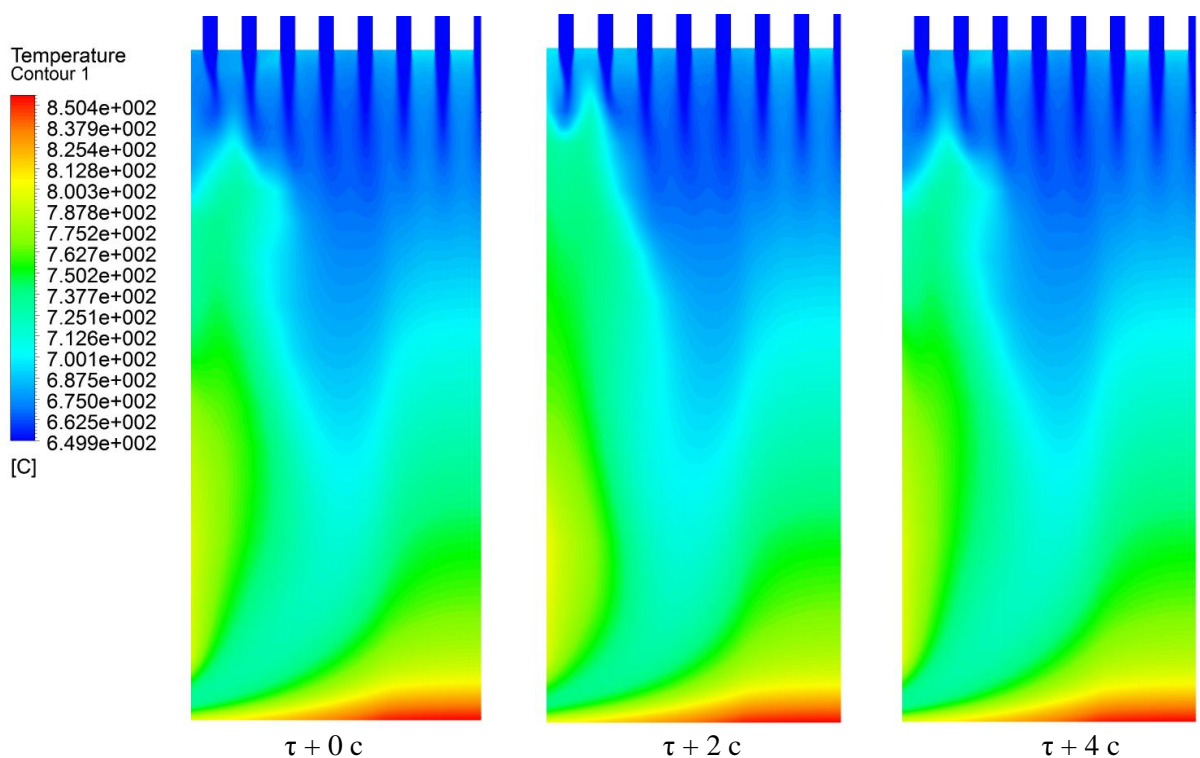


Рис. 10. Изменение поля температур теплоносителя в радиальном сечении активной зоны с течением времени (использована модель неприсоединенных вихрей)



## **Заключение**

В рамках работы над проектом энерготехнологического комплекса с расплавносолевым реактором, служащим для выжигания и трансмутации минорных актинидов из отработавшего ядерного топлива реакторов типа ВВЭР-1000, разработана сетевая модель теплогидравлики реакторной установки, пригодная для сочетания с нейтронно-физической и физико-химической моделями. С ее помощью проведены расчеты динамики первого контура интегральной компоновки, показавшие отсутствие колебаний расхода и давления при работе контура в номинальном и переходе к некоторым ненормальным режимам.

Проведены расчеты гидродинамики и теплообмена в полостной активной зоне. Результаты расчетов, полученные с использованием моделей крупных вихрей и неприсоединенных вихрей, говорят об установлении в активной зоне режима течения с низкочастотными колебаниями скорости и температуры теплоносителя. Осредненные по большому масштабу времени картины течений, полученные с использованием  $k-\omega$  модели турбулентных моментов, модели неприсоединенных вихрей и модели реактора, построенной при помощи сетевой методики, качественно и количественно схожи. Данные различных моделей о характере и частоте отклонений скоростей и температур теплоносителя от средних по времени значений расходятся. В такой ситуации целесообразно проведение прецизионного эксперимента по получению характеристик течения в полости с использованием воздуха в качестве модельной среды. Полученную в таком эксперименте информацию можно использовать в моделях RANS, крупных вихрей, неприсоединенных вихрей для настройки их константной базы.

---

## **Ссылки**

- [1] Simulink Getting Started Guide. The MathWorks Inc., USA, 2009.
- [2] <http://www.openfoam.com> (дата обращения: 16.02.2012 г.).