

**Программный комплекс SKETCH-THENYCO для моделирования  
активных зон реакторов с жидко-металлическим теплоносителем.**

**А.М. Веселов, В.Г. Зимин, А.С. Корсун, И.Г. Меринов,  
С.Д. Романин, В.С. Харитонов, Н.В. Щукин**  
МИФИ, Москва, Каширское шоссе, 31

*Представлена трехмерная математическая модель и основанный на ней программный код для согласованного расчета нейтронно-физических и тепло-гидравлических процессов в активных зонах быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Приведены результаты расчета стандартной задачи для верификации тепло-гидравлического модуля программного комплекса. Проведен расчет некоторых стационарных и нестационарных аварийных процессов в активной зоне реактора БРЕСТ.*

**Computer code SKETCH-THENYCO for the modeling of a liquid metal reactor core.** *Three dimension mathematical model and based on it computer code for simultaneous neutron kinetics and thermal hydrodynamics calculation in fast liquid metal reactor core are presented. Benchmark calculations for thermo-hydraulic module verification are given. The calculations of steady - state and transient accident processes in the BREST reactor core are performed.*

Современный уровень анализа безопасности проектируемых ЯЭУ нового поколения требует проведения широкого спектра расчетов переходных процессов в штатных и аварийных режимах работы реактора. Зачастую проектировщики (особенно на этапе предварительных проработок) вынуждены ограничиться расчетами по упрощенным моделям. Такая практика оправдывается необходимостью рассмотрения многочисленных вариантов и значительными вычислительными затратами, необходимыми для расчета аварийных ситуаций по сложным трехмерным программам. Однако, использование упрощенных моделей возможно лишь для ограниченного круга переходных процессов и только в том

случае, если параметры упрощенных моделей корректно рассчитываются по полномасштабным трехмерным программам. В настоящее время проекты перспективных реакторных установок (РУ) отличаются все более сложными конструкциями активных зон (а.з.) (бесчехловые ТВС, внутрикассетная гетерогенность, различные системы профилирования потока теплоносителя и др.) Все это призвано повысить уровень безопасности РУ и улучшить их эксплуатационные характеристики. В свою очередь, усложнение конструкции ужесточает требования к используемым моделям и реализующим их компьютерным кодам.

В настоящей работе представлен инструмент для обоснования проектных решений по обеспечению безопасности перспективных реакторов с бесчехловой компоновкой ТВС и жидкометаллическим теплоносителем – программный комплекс SKETCH-THENYCO (Space Kinetics and Thermal Hydrodynamics). Комплекс позволяет проводить полномасштабные трехмерные совместные нейтронно-физические - тепло-гидродинамические расчеты переходных процессов в штатных и аварийных режимах работы реактора.

### ***Физико-математические модели программного комплекса***

#### ***SKETCH-THENYCO***

Для описания нейтронно-физических процессов в программном комплексе SKETCH используются трехмерные малогрупповые диффузионные уравнения нейтронной кинетики с учетом запаздывающих нейтронов. Пространственная дискретизация исходных уравнений выполнена с помощью конечно-разностного и нодального методов с расчетными точками в центрах разностной сетки. В модели реализована прямоугольная и гексагональная геометрия расчетной задачи. Полученная в результате пространственной дискретизации система обыкновенных дифференциальных уравнений имеет вид:

$$V^{-1}_g d\Phi(t)/dt = -L\Phi(t) + (1-\beta)\chi_p F^T \Phi(t) + \sum \lambda_m \chi_m C_m(t) \quad (1)$$

$$dC_m(t)/dt = \beta_m F^T \Phi(t) - \lambda_m C_m(t), m=1, \dots, M \quad (2)$$

где:  $\Phi(t)$  - плотность потока нейтронов;  $C_m(t)$  - концентрация предшественников  $i$ -ой группы запаздывающих нейтронов;  $L$  - линейный оператор, описывающий перенос, рассеяние и поглощение нейтронов;  $F^T$  - линейный оператор, описывающий генерацию вторичных нейтронов деления;  $\chi_p$  - спектр мгновенных нейтронов деления;  $\chi_m$  - спектр  $m$ -й группы запаздывающих нейтронов;  $\beta_m$  - доля  $m$ -ой группы запаздывающих нейтронов;  $\beta$  - суммарная доля запаздывающих нейтронов;  $\lambda_m$  - постоянная распада  $m$ -й группы запаздывающих нейтронов.

Система уравнений (1) - (2) решается при краевом условии:

$$\alpha \Phi(t) \big|_{r=R} + \gamma \partial \Phi(t) / \partial n \big|_{r=R} = 0, \text{ где } R \subset S, \alpha, \gamma \geq 0, \alpha + \gamma \neq 0 \quad (3)$$

на кусочно-гладкой поверхности  $S$  невогнутого конечного объема. Первая версия реализации и тестирование данной модели подробно описаны в работе [1].

Для тепло-гидродинамического расчета переходных процессов в а.з. быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем использовалась многоуровневая модель, в которой наряду с расчетом полей температур, скорости и давления во всей зоне в приближении пористого тела (уровень "активная зона"), одновременно, для всего времени рассматриваемого процесса производится расчет локальных значений (уровень "ячейка-твэл") и осредненных по сечению ячеек температур, скоростей и давлений (уровень "сборка твэлов"). Использование приближения пористого тела позволяет учесть такие особенности конструкции активной зоны, как бесчехловые ТВС и профилирование за счет проходного сечения. Решение задач более детального уровня позволяет определить эффективные коэффициенты переноса импульса и энергии, сопротивления потоку жидкости, теплоотдачи и термического сопротивления твэла, и тем самым замкнуть систему уравнений сохранения в пористом теле. Многоуровневый расчет позволяет корректно учитывать временные зависимости

эффективных коэффициентов переноса. Эффективные коэффициенты могут быть получены также из экспериментальных данных.

В используемом приближении активная зона реактора представляет собою многокомпонентное пористое тело. В качестве отдельных компонентов а.з. рассматривались:

- однофазный теплоноситель;
- тепловыделяющие элементы нескольких типов ( $k = 1, \dots, type$ );
- конструкционные элементы.

Для типичных вариантов проектируемых перспективных РУ, когда доля конструкционных элементов в зоне невелика и плотность энерговыделения в них мала, распределение по а.з. средней температуры конструкционных элементов  $T_{construct}$  принимается равным распределению средней температуры теплоносителя  $T_f$ .

Уравнения сохранения массы, импульса, энергии и уравнение состояния для теплоносителя в модели пористого тела имеют следующий вид:

$$\frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f)}{\partial \tau} + \text{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{u}) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f u_i)}{\partial \tau} + \text{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{u} u_i) = \text{div}(\vec{\sigma}) - F_i - \varepsilon_f (\text{grad} P, \vec{e}_i) + \varepsilon_f \rho_f g_i, \quad (5)$$

$$c_f \left( \frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f T_f)}{\partial \tau} + \text{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{u} T_f) \right) = -\text{div}(\vec{q}) + q_v, \quad (6)$$

$$\rho_f = \rho_f(P, T_f), \quad (7)$$

где  $\varepsilon_f \equiv \frac{V_f}{V}$  - пористость по теплоносителю;  $\rho_f$  - плотность теплоносителя;  $\vec{u}$  -

вектор скорости теплоносителя;  $\vec{\sigma}$  - тензор напряжений, содержащий эффективную

вязкость теплоносителя  $\mu_{eff}$ ;  $F_i = K_i \rho_f |\vec{u}| u_i$  - проекция силы сопротивления потоку

жидкости;  $P$ -давление теплоносителя;  $\vec{e}_i$ -единичный направляющий вектор координаты;  $g_i$ - проекция ускорения свободного падения;  $c_f$ -теплоемкость теплоносителя;  $\vec{q}$ -вектор теплового потока;  $q_v$ -эффективная плотность энерговыделения в теплоносителе.

Для определения температуры твэлов в каждом из них решается одномерное уравнение теплопроводности:

$$\left[ (\rho c) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_v \right]_k. \quad (8)$$

с граничными условиями третьего рода.

Описанный способ расчета реализован в компьютерном коде ТНЕНУСО-3dt [2,3]. Для решения системы уравнений (4) - (8) необходимо определить коэффициенты эффективной теплопроводности, эффективной вязкости и сопротивления потоку жидкости. Эти коэффициенты находятся из экспериментальных данных или результатов решения задачи более детального уровня рассмотрения "сборка твэлов" [4,5].

### Верификация кода ТНЕНУСО-3dt

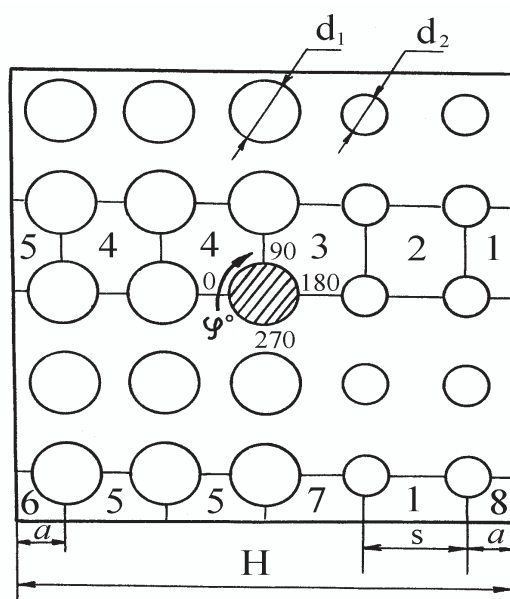


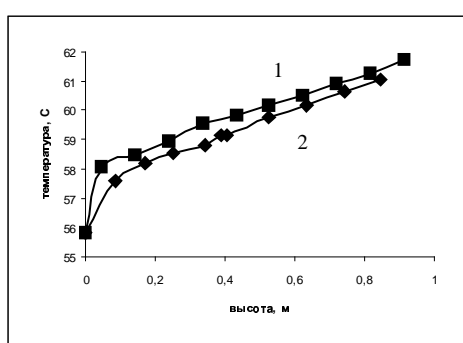
Рис. 1 Сечение модельной сборки, где  $a=10.2$  мм,  $H=90.4$  мм,  $s=17.5$  мм,  $d_1=14$  мм,  $d_2=12$  мм, цифрами обозначены характерные ячейки

В целях верификации программного комплекса, было выполнено моделирование экспериментальной сборки ФЭИ [6]. Модельная ТВС активной зоны реактора типа БРЕСТ представляет собой пучок стержней, расположенных в квадратной упаковке. ТВС разбита на две подзоны, различающиеся диаметрами стержней и уровнем

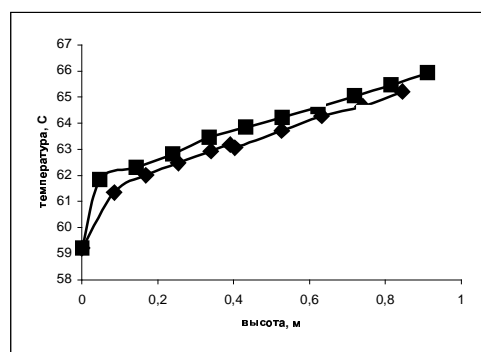
энерговыделения. Модельная ТВС

содержит дистанционирующую решетку, высотой 38 мм, располагающуюся на высоте 40 см от входа. Длина зоны энергосвечения по высоте составляет 96 см. Поперечное сечение модельной сборки представлено на рис. 1. В качестве теплоносителя используется жидкометаллический теплоноситель (сплав натрий-калий: 22%Na + 78% K).

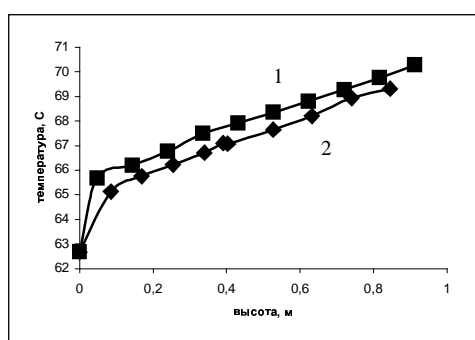
На рис. 2 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных распределений по высоте ТВС температуры на внешней поверхности измерительного твэла для режимов работы с различным соотношением мощностей энергосвечения в подзоне. Цифрами 1 и 2 обозначены расчетные и экспериментальные кривые, соответственно.



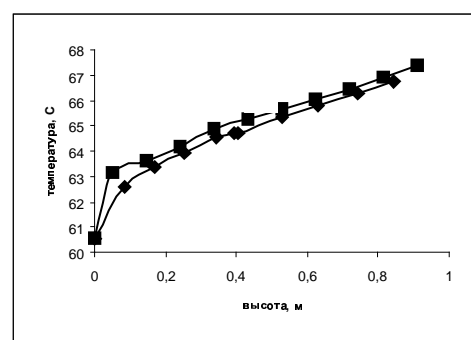
а)



б)



в)



г)

Рис.2 Распределение температур теплоносителя по высоте ТВС при  $E = 10,2$  МВ;  $\bar{u} = 2.6$  м/с;  $Re = 53393$ ,  $Pe = 1316$  для различных соотношений мощностей энергосвечения по подзонам: а)  $N_{15} / N_{10} = 1.35$  кВт / 2 кВт; б)  $N_{15} / N_{10} = 1.65$  кВт / 2 кВт; в)  $N_{15} / N_{10} = 2$  кВт / 2 кВт; г)  $N_{15} / N_{10} = 2$  кВт / 1.65 кВт;

Среднее значение отклонения расчетных значений температур от экспериментальных равняется 3% , а максимальное расхождение 4,7%.

Расчеты показали работоспособность программного кода THENYCO-3DT на задачах данного типа.

### ***Моделирование аварийных процессов в активной зоне проектируемой***

#### ***РУ БРЕСТ-2400***

В последнее время в рамках развития концепции перспективных быстрых свинцовоохлаждаемых реакторов рассматривается возможность создания РУ большой мощности (2400 МВт электр.) БРЕСТ-2400. Для РУ этого типа характерны следующие конструкционные особенности:

- существенная протяженность и модульная структура а.з. реактора;
- использование бесчехловых ТВС квадратного сечения с нитридным уран-плутониевым топливом.

Разработанный программный комплекс был использован для моделирования динамических процессов в а.з. РУ БРЕСТ-2400 в аварийных режимах, связанных с вводом максимальной положительной реактивности при несанкционированном выводе СУЗ, а также процессов, происходящих при наложении событий таких, как ввод положительной реактивности и одновременная блокада проходного сечения активной зоны.

Отметим следующие основные черты РУ БРЕСТ, которые необходимо учитывать при моделировании теплогидродинамических процессов [7].

- Топливом является моонитрид урана и плутония ( $UN + PuN$ ), плотностью –  $13 \text{ г/см}^3$  , теплопроводностью  $\sim 17 - 20 \text{ Вт/м}^0\text{С}$  и температурой плавления  $2800^0\text{С}$ .
- Материал оболочки твэлов – ферритно-мартенситная сталь с 12% Cr и 1% Si, толщина оболочки – 0,5 мм. Предельно допустимая температура наружной поверхности оболочки –  $650^0\text{С}$ .

- ТВС активной зоны выполняются бескожуховыми, а твэлы в них располагаются в квадратной упаковке, что обеспечивает большую объемную долю свинца в активной зоне (70%).

- В активной зоне вместо обычного выравнивания радиального распределения энерговыделения обогащением топлива (реакторы типа БН) применено трехзонное выравнивание подогревов свинца и температур оболочек твэлов путем профилирования энерговыделения и расхода свинца в ТВС за счет использования твэлов разного диаметра, но с одинаковым содержанием плутония в загруженном топливе.

#### *Стационарный режим работы реактора на полной мощности*

Расчет стационарного режима работы реактора на полной мощности был выполнен с целью получения распределений давления, скорости, температуры теплоносителя и распределения температуры твэлов, которые использовались в качестве начальных условий при моделировании рассмотренных переходных процессов.

В качестве примера, на рис. 3 – 5 показано изменение по высоте активной зоны продольной скорости и температуры теплоносителя для всех ТВС, температуры оболочки твэла и максимальной температуры топлива в центральной ТВС. Полученные распределения температуры теплоносителя в поперечном сечении активной зоны на высоте 60 см от входа (в области максимального энерговыделения) представлены на рис. 6, а распределение температуры по радиусу твэла в центральной ТВС на той же высоте показано на рис. 7.



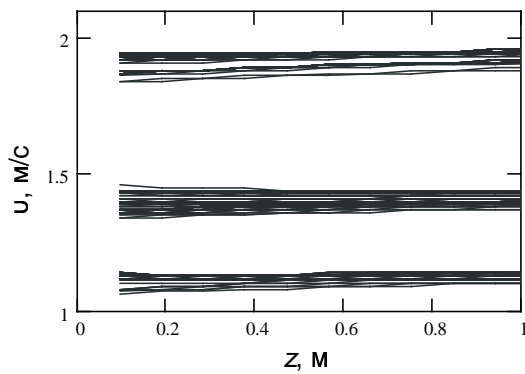


Рис. 3. Распределение по высоте активной зоны продольной скорости теплоносителя (каждая кривая показывает изменение средней по сечению TBC скорости в одной сборке)

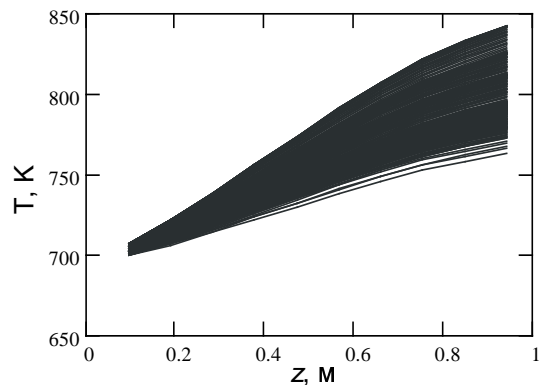


Рис. 4. Распределение по высоте активной зоны температуры теплоносителя (каждая кривая показывает изменение средней по сечению TBC температуры в одной сборке)

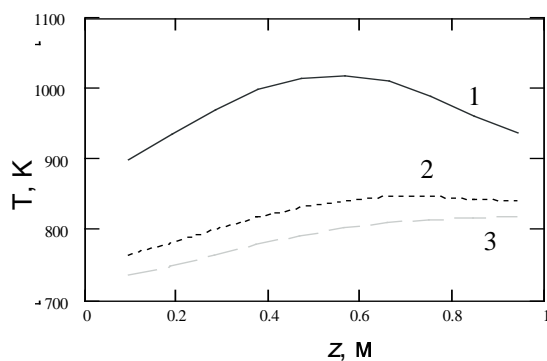


Рис. 5. Распределение по высоте активной зоны максимальной температуры топлива (1), внешней поверхности оболочки (2) и теплоносителя (3) центральной TBC

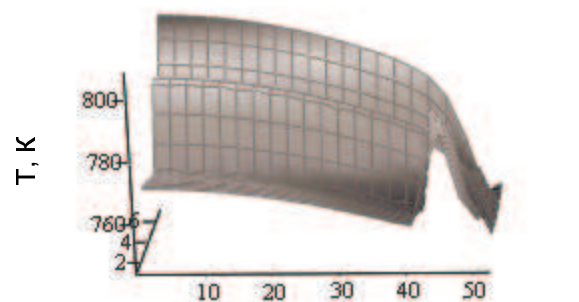


Рис.6. Распределение температуры теплоносителя в поперечном сечении активной зоны на высоте 60 см (представлена ¼ часть активной зоны, по осям x и y отложен номер TBC)

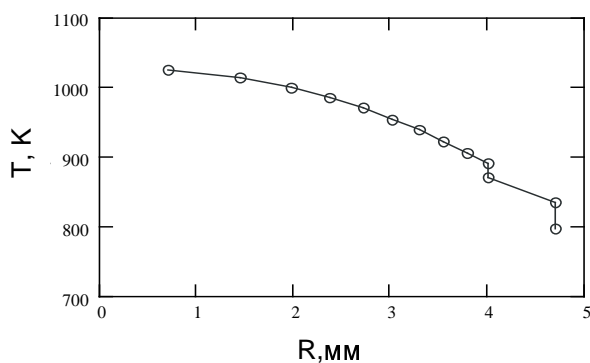


Рис. 7. Распределение по радиусу твэла температур топлива и оболочки для центральной TBC на высоте 60 см от входа в активную зону

### *Ввод максимальной положительной реактивности (TOP WS)*

Данная авария имитировалась путем вывода всех стержней СУЗ из активной зоны без срабатывания аварийной защиты. Реактивность, вносимая в данном режиме составляет порядка  $\Delta\rho \approx 2 \cdot 10^{-3}$  \$.

### Режим 1. Скорость вывода стержней СУЗ 1.5 м/с

Этот режим моделирует самоход стержней управления и защиты. Всплытие стержней происходит за счет потока теплоносителя, поэтому скорость ввода реактивности принималась равной скорости теплоносителя.

На рис. 8 – 11 показано изменение во времени средней температуры топлива, оболочки и теплоносителя в центральной ТВС на высоте 70 см от входа в активную зону, распределение поля энерговыделения в поперечном сечении АЗ на высоте 10 см до и через 20 с после начала процесса, а также распределение температуры по радиусу твэла в центральной ТВС на высоте 70 см в установившемся стационарном режиме. Распределения температур и скоростей по высоте активной зоны через 20 с после начала аварийного режима показаны на рис. 12, 13 соответственно.

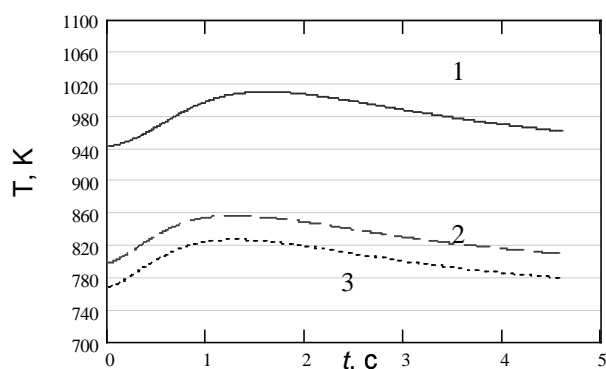


Рис. 8. Изменение во времени средней температуры топлива (1), оболочки (2) и теплоносителя (3) в центральной ТВС

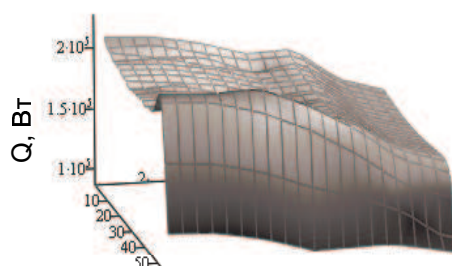


Рис. 9. Распределение поля энерговыделения в поперечном сечении АЗ на высоте 10 см перед началом процесса (представлена  $\frac{1}{4}$  часть активной зоны по осям  $x$  и  $y$  отложен номер ТВС)

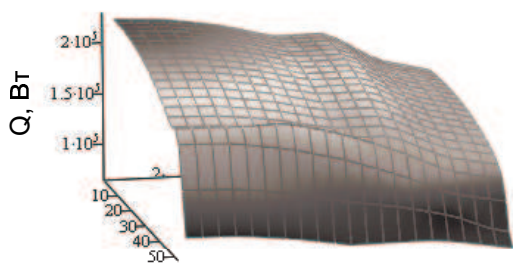


Рис. 10. Распределение поля энерговыделения в поперечном сечении а.з. на высоте 10 см через 20 с после начала процесса (представлена  $\frac{1}{4}$  часть а.з., по осям  $x$  и  $y$  отложен номер ТВС)

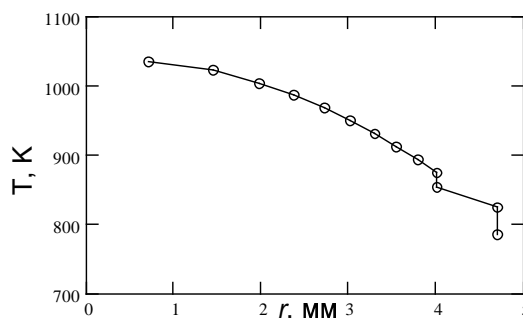


Рис. 11. Распределение температуры по радиусу твэла центральной ТВС на высоте 70 см через 20 с после начала процесса

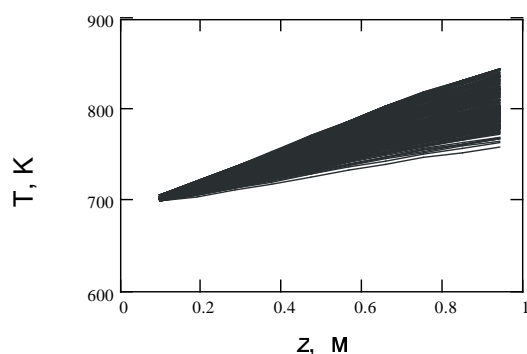


Рис. 12. Распределение по высоте АЗ температуры теплоносителя для каждой ТВС через 20 с после начала процесса

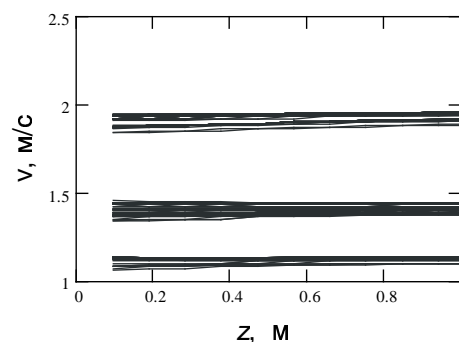


Рис.13. Распределение по высоте АЗ скорости теплоносителя для каждой ТВС через 20 с после начала процесса

Расчеты показывают, что в рассмотренном режиме наличие доплеровского эффекта позволяет избежать недопустимых перегревов оболочки, топлива и теплоносителя.

#### *Режим 2. Скорость вывода стержней СУЗ 4.5 м/с*

Данный режим может иметь место в случае локального увеличения скоростей теплоносителя во всех каналах с СУЗ, что является мало вероятным, но с точки зрения последствий наиболее неблагоприятно для активной зоны.

На рис. 14, 15 показано изменение средней температуры топлива и теплоносителя в центральной ТВС на высоте 70 см от входа в активную зону от времени за первые 90 с и 1 с, соответственно. Распределение температур и скоростей по высоте для всех ТВС, в новом стационарном состоянии, показано на рис. 16 и 17. Изменение поля энерговыделения в поперечном сечении АЗ на высоте 10 см в стационарном состоянии, с полностью извлеченными СУЗ, отображено на рис. 18. На рис. 19 показано новое стационарное распределение температур по радиусу твэла для центральной ТВС на высоте 70 см.

В этом режиме реактор переходит на новый стационарный уровень мощности за время порядка 100 с. Выбег мощности реактора достигает значения  $N_{\text{макс}} = 4,1N_{\text{ном}}$ , а максимальная температура оболочек твэлов достигает  $1200^{\circ}\text{C}$ ,

что почти вдвое превышает допустимое значение. Максимальные значения температур для теплоносителя и топлива при этом не превышают своих критических значений. Таким образом, в данном гипотетическом режиме произойдет разрушение оболочек ТВЭлов ТВС.

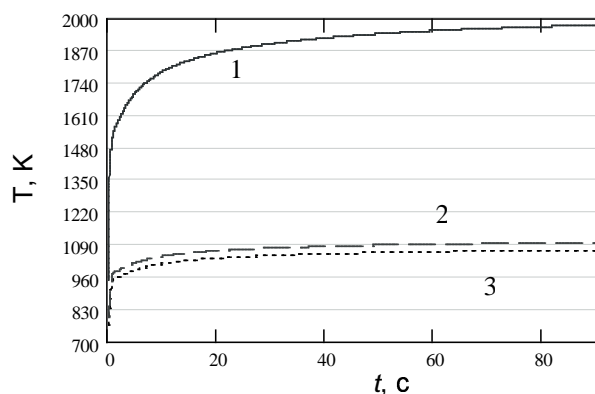


Рис. 14. Изменение средней температуры топлива (1), оболочки (2) и теплоносителя (3) в центральной ТВС на высоте 70 см в зависимости от времени процесса

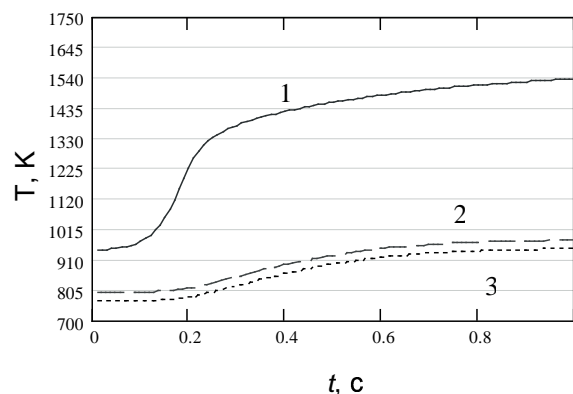


Рис. 15. Изменение средней температуры топлива (1), оболочки (2) и теплоносителя (3) в центральной ТВС на высоте 70 см в зависимости от времени процесса

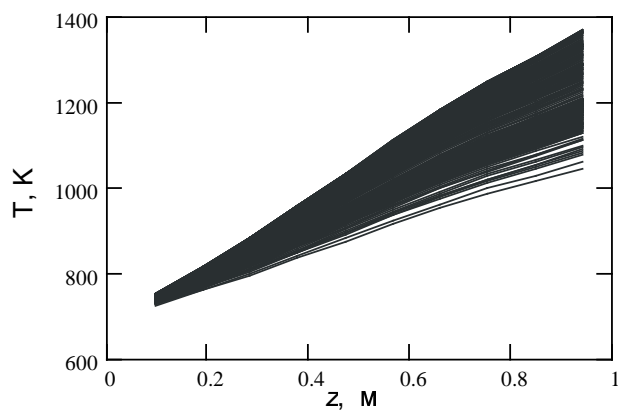


Рис. 16. Распределение по высоте температуры теплоносителя для каждой ТВС через 100 с после начала процесса

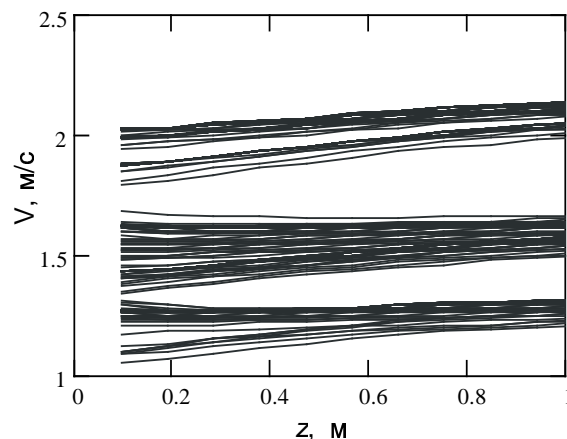


Рис. 17. Распределение по высоте скорости теплоносителя для каждой ТВС через 100 с после начала процесса

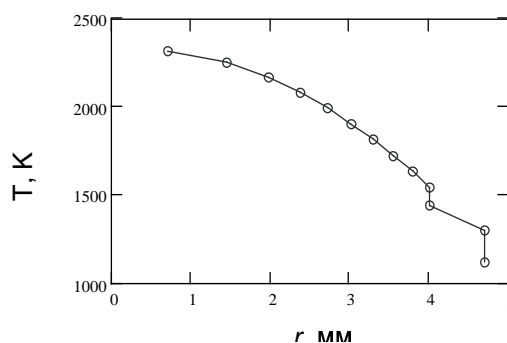
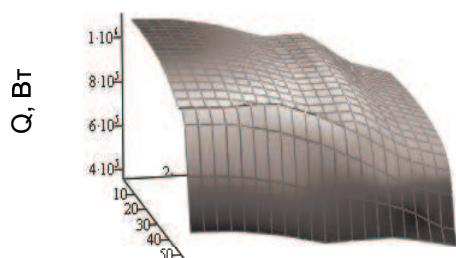


Рис.18. Распределение поля энерговыделения в поперечном сечении АЗ на высоте 10 см через 100 с после начала процесса (представлена ¼ часть активной зоны, по осям  $x$  и  $y$  отложен номер ТВС)

Рис.19. Распределение температур по радиусу твэла центральной ТВС на высоте 70 см через 100 с после начала процесса

### Потеря принудительной циркуляции свинца (LOF WS)

Частичная блокада проходного сечения на входе в активную зону. Этот тип аварий рассматривался подробно в предыдущих работах [8]. Здесь же дан сравнительный анализ влияния обратных связей по температуре и плотности теплоносителя на тепло-гидравлические характеристики активной зоны при блокаде на входе 16 центральных ТВС.

На рис. 20-22 приведены расчетные зависимости средней температуры теплоносителя в зависимости от времени процесса, распределения температуры по радиусу твэла на высоте 70 см и температуры теплоносителя по высоте активной зоны в установившемся стационарном состоянии, полученные без учета обратных связей (1) и с их учетом (2), для центральной блокированной ТВС.

Как видно из графиков, учет наличия отрицательных коэффициентов реактивности по температуре и плотности теплоносителя приводит к снижению максимальных значений температур и к уменьшению времени действия перегревов.

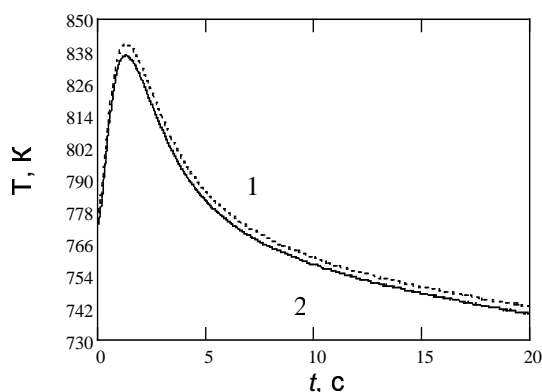


Рис. 20. Зависимость средней температуры теплоносителя в центральной ТВС на высоте 70 см от времени процесса, полученный без учета обратных связей (1) и с их учетом (2)

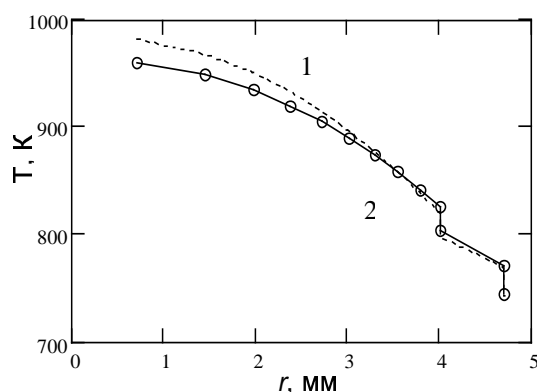


Рис.21. Распределение температуры по радиусу твэла, находящегося в центральной ТВС на высоте 70 см через 20 с после начала процесса, полученное без учета обратных связей (1) и с их учетом (2)

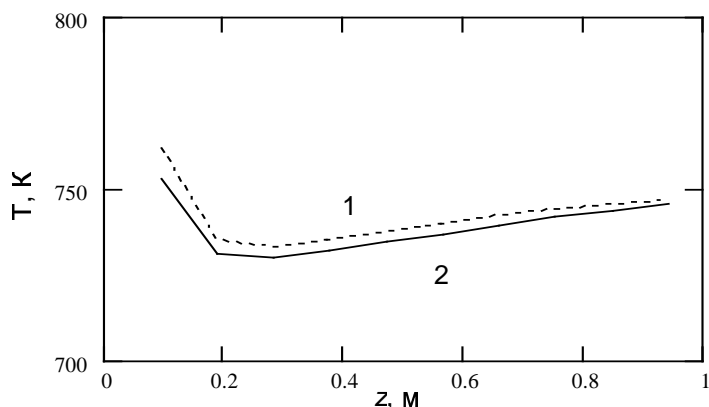


Рис. 22 Распределение температуры теплоносителя в центральной ТВС по высоте активной зоны через 20 с после начала процесса

Проведенные расчеты показали, что бесчехловая конструкция ТВС обеспечивает в рассматриваемых переходных процессах возникновение заметных поперечных перетечек теплоносителя, которые при блокаде на входе даже 16 ТВС позволяют сохранить температуры теплоносителя и твэлов в допустимых пределах. Наиболее опасно возникновение блокады проходного сечения в зоне высокого энерговыделения (в районе 70% высоты активной зоны). При этом в первую очередь аварийная ситуация возникает из-за превышения максимально допустимой температуры оболочки твэлов.

### **Заключение**

В итоге проделанной работы получен инструмент моделирования активных зон реакторов с жидкометаллическим теплоносителем – интегрированный программный комплекс (SKETCH-THENYCO), основанный на модернизированной версии нейтронно-физического расчета и новой, существенно переработанной версии теплогидродинамического расчета.

Сравнение расчетов и экспериментальных данных для модели ТВС типа БРЕСТ (сборка ФЭИ), показало работоспособность кода THENYCO. Среднее значение отклонения расчетных значений температур от экспериментальных равняется 3% , а максимальное расхождение 4,7%.

С помощью комплекса SKETCH-THENYCO проведено расчетное моделирование ряда аварийных ситуаций (TOP WS, LOF WS) для активной зоны проектируемой РУ БРЕСТ-2400.

Полученные на сегодняшний день результаты показывают, что представленный комплекс позволяет решать актуальные задачи проектирования перспективных быстрых жидко-металлических реакторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щукин Н.В., Зимин В.Г., Романин С.Д., Витрук С.Г., Корсун А.С., Батурин Д.М.** Программный комплекс SKETCH для моделирования пространственной динамики перспективных быстрых реакторов. //ВАНТ, серия “Физика ядерных реакторов”, выпуск 4,1995г. СС. 8-27
2. Аналитическое и расчетное обеспечение проектных решений АЭС с реактором БРЕСТ большой мощности (БРЕСТ-2400) и газотурбинным циклом преобразования энергии / Отчет о НИР. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. Гос. рег. № 01200216755, 314 с.
3. **Веселов А.М., Корсун А.С., Меринов И.Г., Романин С.Д., Харитонов В.С., Щукин Н.В.** Нейтронно-теплогидродинамический расчёт активной зоны проектируемой РУ “БРЕСТ-2400” // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов. М.: МИФИ, 2003. Т.8. С.83-84.
4. **Корсун А.С.** Эффективная теплопроводность пористых структур, составленных из пучков стержней или труб. // Теплообмен ММФ\_4. Труды IV Минского международного форума. Минск, 2000, Т. 10. С. 242-250
5. **Корсун А.С., Викулова С.В.** Эффективная теплопроводность вдоль сборки ТВЭЛ при ее продольном обтекании. // Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Труды международной конференции. “Теплофизика 98” в 2-х томах, Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. Т. 1. С. 77-87.
6. **Жуков А.В., Кузина А.Ю., Сорокин А.П., Богословская Г.П., Филин А.И., Леонов В.Н., Смирнов В.П., Сила-Новицкий А.Г.,** Спецификация стандартной задачи
7. **Орлов В.В., Смирнов В.С., Филин А.И., Сила-Новицкий А.Г., Леонов В.Н.,**



**Цикунов В.С., Баринов С.В., Козут В.А.,** Детерминистическая безопасность реакторов БРЕСТ. // “11<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering”, Tokio, Japan, 2003.

8. **Веселов А.М., Корсун А.С., Меринов И.Г., Романин С.Д., Харитонов В.С., Щукин Н.В.** Моделирование нейтронно-теплогидродинамических процессов в активной зоне РУ “БРЕСТ-2400” // Научная сессия МИФИ-2004. Сб. научных трудов. М.: МИФИ, 2004. Т.8.