

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОДА SKETCH-THERMUSO

А.М. Веселов, В.Г. Зимин, А.С. Корсун, И.Г. Меринов, С.Д. Романин, В.С. Харитонов, Н.В. Щукин

Московский инженерно-физический институт (государственный университет), г. Москва



Дано описание трехмерной математической модели и реализующего ее программного комплекса для согласованного расчета нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активных зонах (АЗ) быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Представлены результаты расчетов некоторых стационарных и нестационарных аварийных процессов в АЗ перспективного реактора БРЕСТ-2400.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании АЗ перспективных реакторных установок (РУ) предлагаются все более сложные конструкционные решения, направленные на повышение уровня безопасности РУ и улучшение их эксплуатационных характеристик. Среди них можно отметить бесчехловые ТВС, внутрикассетную гетерогенность, различные системы профилирования потока теплоносителя и др. В свою очередь, усложнение конструкции ужесточает требования к применяемым моделям и реализующим их компьютерным кодам.

Одним из проектов отвечающих перечисленным положениям является перспективная РУ БРЕСТ. Обоснование нейтроники и теплогидравлики реакторов такого типа предполагает использование целого набора компьютерных кодов. Из него следует выделить основные программы, которые используются для получения данных, входящих в документы по обоснованию ядерной и радиационной безопасности, – код FAST-BR (НИКИЭТ) [1] трехмерного диффузионного расчета быстрых реакторов, коды MCNP (США) и MMCKENO (ФЭИ) – прецизионных расчетов методом Монте-Карло [2]. Особенностью теплогидравлических расчетов является малое количество специализированных сертифицированных комплексов, среди которых наиболее известны: STAR-CD (CD Adarco), RELAP-3D, NEPTUNE (CEA). Также существуют исследовательские узкоспециализированные коды, разрабатываемые в ФЭИ, НИКИЭТ, ЭНИКО и т.д. Основной проблемой является совместный нейтронно-теплогидродинамический расчет АЗ реактора. Следует отметить, что концепция малых запасов реактивности реак-

© А.М. Веселов, В.Г. Зимин, А.С. Корсун, И.Г. Меринов, С.Д. Романин, В.С. Харитонов, Н.В. Щукин, 2006

тора БРЕСТ задает новый масштаб допустимых точностей расчета и обоснования нейтронно-физических характеристик реактора. Это определяет повышенные требования к программному и константному обеспечению, степени его верификации.

Здесь представлен инструмент для обоснования проектных решений по обеспечению безопасности перспективных реакторов с бесчехловой компоновкой ТВС и жидкометаллическим теплоносителем – программный комплекс SKETCH-ТНЕНУСО (Space Kinetics and Thermal Hydrodynamics – THERmal Hydro COde). Комплекс позволяет проводить полномасштабные трехмерные совместные нейтронно-физические и теплогидродинамические расчеты переходных процессов в штатных и аварийных (при условии сохранения целостности АЗ) режимах работы реактора.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SKETCH-ТНЕНУСО

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

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

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

где $\Phi(t)$ – плотность потока нейтронов; $C_m(t)$ – концентрация предшественников i -й группы запаздывающих нейтронов; L – линейный оператор, описывающий перенос, рассеяние и поглощение нейтронов; \hat{F}^T – линейный оператор, описывающий генерацию вторичных нейтронов деления; χ_p – спектр мгновенных нейтронов деления; χ_m – спектр m -ой группы запаздывающих нейтронов; β_m – доля m -ой группы запаздывающих нейтронов; β – суммарная доля запаздывающих нейтронов; λ_m – постоянная распада m -ой группы запаздывающих нейтронов.

Система уравнений (1), (2) решается при краевом условии

$$\alpha\Phi(t)|_{r=R} + \gamma\partial\Phi(t)/\partial n|_{r=R} = 0, \quad (3)$$

где $R \subset S$; $\alpha, \gamma \geq 0$; $\alpha + \gamma \neq 0$ на кусочно-гладкой поверхности S невогнутого конечно-го объема. Тестирование данной модели было выполнено на широко известных задачах: 3D IAEA, тесте Лангенбуха и др. Первая версия реализации и результаты тестирования подробно описаны в работе [3].

В целях выявления наиболее подходящего комплекса подготовки макросечений и коэффициентов диффузии, а также демонстрации адекватности моделирования РУ БРЕСТ 2400 комплексом SKETCH, было проведено сравнение результатов расчетов с результатами расчетов программного комплекса JAR-FR в 26-групповом диффузионном приближении с применением константного обеспечения CONSYST/БНАБ93 (предоставлены НИКИЭТ). Сравнивались результаты, полученные для активной зоны РУ. Это сравнение можно считать вполне представительным, т.к. ТВС обеих установок (БРЕСТ-2400 и БРЕСТ ОД-300) идентичны, за исключением высоты, а активные зоны набраны из одинаковых типов сборок. Основные интегральные характеристики, полученные в ходе расчетов, представлены в табл. 1.

Как видно из приведенных сравнительных характеристик, существуют некоторые

Таблица 1

Сравнение интегральных характеристик активной зоны РУ БРЕСТ ОД-300, полученных различными программными комплексами

	SKETCH&GETERA (расчет (МИФИ))	JAR-FR&CONSYST/БНАБ93 (расчет НИКИЭТ)
$K_{эф}$	1.00812	1.02110
K_v	1.48117	1.54544
K_r	1.24266	1.27625
K_z	1.19145	1.20949

различия в результатах расчетов по программам SKETCH&GETERA и JAR-FR&CONSYST/БНАБ93. Расхождения могут объясняться как различием алгоритмов расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов, так и возможными различиями в исходных библиотеках микроконстант. Поэтому возник естественный интерес в проведении тех же самых расчетов по программе SKETCH с использованием 26-группового константного обеспечения CONSYST/БНАБ93. Эти расчеты были проведены, и показали полное совпадение с результатами расчетов, получающимися при использовании комплекса программ JAR-FR с константным обеспечением CONSYST/БНАБ93. Последнее позволяет сделать вывод об адекватности моделирования АЗ РУ БРЕСТ с помощью комплекса SKETCH.

В итоге в качестве основного средства подготовки макросечений, коэффициентов диффузии и других параметров для групповых диффузионных расчетов был выбран комплекс CONSYST/БНАБ93. Выбор объясняется во многом тем, что именно этот комплекс используется подавляющим большинством исследовательских коллективов, участвующих в проекте БРЕСТ, а корректное сопоставление результатов различных авторов, естественно, требует единой константной базы.

Для теплогидродинамического расчета переходных процессов в АЗ 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 «А3») одновременно для всего времени рассматриваемого процесса производится расчет локальных (уровень «ячейка-твэл») и осредненных по сечению ячеек значений температур, скоростей и давлений (уровень «сборка твэлов»).

Применение приближения пористого тела позволяет учесть такие особенности конструкции АЗ, как бесчехловые ТВС и профилирование за счет проходного сечения. Решение задач более детального уровня дает возможность 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, которые могут быть получены также из экспериментальных данных.

В используемом приближении АЗ реактора представляет собой многокомпонентное пористое тело. В качестве отдельных компонентов АЗ рассматривались однофазный теплоноситель, твэлы 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 АЗ средней температуры $T_{construct}$ конструкционных элементов принимается равным распределению средней температуры T_f теплоносителя.

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

$$\partial(\varepsilon_f \rho_f)/\partial\tau + \operatorname{div}(\varepsilon_f \rho_f \mathbf{u}) = 0; \quad (4)$$

$$\partial(\varepsilon_f \rho_f u_i)/\partial\tau + \operatorname{div}(\varepsilon_f \rho_f \mathbf{u} u_i) = \operatorname{div}(\bar{\bar{\sigma}}) - F_i - \varepsilon_f (\operatorname{grad} P, \mathbf{e}_i) + \varepsilon_f \rho_f g_i; \quad (5)$$

$$c_f (\partial(\varepsilon_f \rho_f \Phi_f)/\partial\tau + \operatorname{div}(\varepsilon_f \rho_f \mathbf{u} T_f)) = -\operatorname{div}(\mathbf{q}) + q_v; \quad (6)$$

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

где $\varepsilon_f \equiv V_f/V$ – пористость по теплоносителю; ρ_f – плотность теплоносителя; \mathbf{u} – вектор скорости теплоносителя; $\bar{\bar{\sigma}}$ – тензор напряжений, содержащий эффективную вязкость теплоносителя μ_e ; $F_i = K_i c_f |\mathbf{u}| u_i$ – проекция силы сопротивления потоку жидкости; P – давление теплоносителя; \mathbf{e}_i – единичный направляющий вектор координаты; g_i – проекция ускорения свободного падения; c_f – теплоемкость теплоносителя; \mathbf{q} – вектор теплового потока; q_v – эффективная плотность энерговыделения в теплоносителе.

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

$$[\rho c \partial T / \partial \tau = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v]_k \quad (8)$$

с граничными условиями третьего рода.

Для решения системы уравнений (4)–(8) необходимо определить коэффициенты эффективной теплопроводности, эффективной вязкости и сопротивления потоку жидкости. Они находятся из экспериментальных данных или результатов решения задачи более детального уровня рассмотрения «сборка твэлов» [4, 5]. Описанный способ расчета реализован в компьютерном коде ТНЕНУСО-3DT [6, 7].

Сравнение расчетов и экспериментальных данных для модели ТВС типа БРЕСТ (сборка ФЭИ) показало работоспособность кода ТНЕНУСО. Среднее значение отклонения расчетных значений температур от экспериментальных равняется 3%, а максимальное расхождение 4,7% [8].

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В АЗ ПРОЕКТИРУЕМОЙ РУ БРЕСТ-2400

В последнее время в рамках развития концепции перспективных быстрых свинцовоохлаждаемых реакторов рассматривается возможность создания РУ большой мощности БРЕСТ-2400, для которой характерны следующие конструкционные особенности:

- существенная протяженность и модульная структура АЗ реактора;
- применение бесчехловых ТВС квадратного сечения с нитридным уран-плутониевым топливом.

Разработанный программный комплекс использован для моделирования динамических процессов в АЗ 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 АЗ. Отметим следующие основные черты РУ БРЕСТ, которые необходимо учитывать при моделировании теплогидродинамических процессов [9]. Топливом является мононитрид урана и плутония (UN + PuN) плотностью 13 г/см³, теплопроводностью ~ 17–20 Вт/(м°С)

и температурой плавления 2800°C. Материал оболочки твэлов – ферритно-мартенситная сталь с 12% Cr и 1% Si, толщина оболочки 0,5 мм. Предельно допустимая температура внутренней поверхности оболочки 650°C. ТВС АЗ выполняются бескожуховыми, а твэлы в них располагаются в квадратной упаковке, что обеспечивает большую объемную долю свинца в активной зоне (70%). В АЗ 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. В табл. 2 приведены геометрические параметры АЗ.

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

Таблица 2

Геометрические размеры АЗ реактора (без отражателя) и ряд интегральных параметров

L , м	D , м	H , м	$K_{эф}$	K_v	K_r	K_z
13,182	2,197	0,94	1,0255	1,926	1,636	1,177

Здесь L , D , H – длина, ширина и высота активной зоны, а $K_{эф}$, K_v , K_r , K_z – эффективный коэффициент размножения, объемный, радиальный и высотный коэффициенты неравномерности энерговыделения соответственно.

В нейтронных расчетах стационарных состояний использовалось приближение с 26 энергетическими группами в соответствии с энергетическим разбиением библиотеки нейтронных данных БНАБ-93. Однако в динамических расчетах использование многогруппового приближения приводит к большим затратам машинного времени, что вынуждает увеличивать шаг временной дискретизации и приводит к неточностям в описании быстропротекающих переходных процессов. В связи с этим было принято решение о сокращении количества энергетических групп при условии недопущения больших ошибок при расчете нейтронно-физических характеристик, влияющих на динамику реактора, а именно, запаса реактивности, эффективности органов регулирования, эффектов реактивности. Количество энергетических групп было сокращено до 5, с границами групп, представленными в табл. 3. Такое разбиение основано на результатах исследований по минимизации числа энергетических групп при динамических расчетах реактора БРЕСТ-ОД-300, проведенных в НИКИЭТ (С.В. Баринков, В.Е. Попов, Техническая справка 5.125 ТС).

В качестве примера расчета стационарного режима на рис. 1 показано изменение по высоте АЗ температуры теплоносителя, оболочки твэла и максимальной температуры топлива в центральной ТВС. Распределение температуры по радиусу твэла

Таблица 3

Границы энергетических групп в 5-групповом приближении

Номера групп БНАБ	Нижняя граница энергии, эВ	Верхняя граница энергии, эВ
1 – 2	$4.0 \cdot 10^6$	$10.5 \cdot 10^6$
3 – 4	$1.4 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$
5 – 7	$0.2 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^6$
8 – 15	464.1589	$0.2 \cdot 10^6$
16 – 26		464.1589

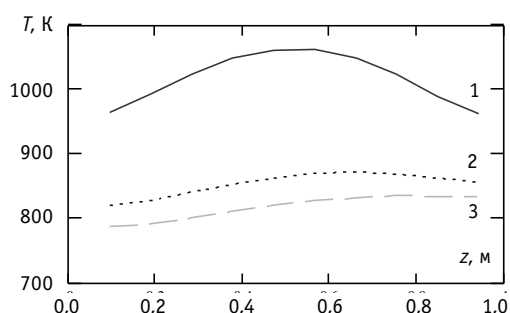


Рис. 1. Распределение по высоте АЗ максимальной температуры топлива (1), внешней поверхности оболочки (2) и теплоносителя (3) центральной ТВС

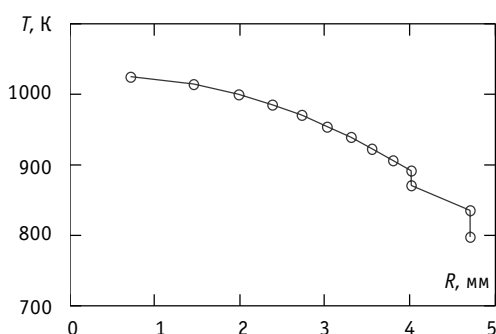


Рис. 2. Распределение температур по радиусу твэла для центральной ТВС на высоте 60 см от входа в АЗ

в центральной ТВС на высоте 60 см от входа показано на рис. 2.

В ходе моделирования аварийных ситуаций были выбраны те же их типы, что и рассмотренные ранее для РУ БРЕСТ-ОД-300 [10]. Рассматривались следующие классы тяжелых аварий без срабатывания активных средств защиты (WS):

- TOP WS – ввод максимальной положительной реактивности;
- LOF WS – потеря принудительной циркуляции свинцового теплоносителя.

Ввод максимальной положительной реактивности (TOP WS) имитировался путем вывода всех стержней СУЗ из АЗ без срабатывания аварийной защиты. Реактивность, вносимая в данном режиме, составляет порядка $\Delta\rho \approx 2 \cdot 10^{-3}$ [10].

Скорость вывода стержней СУЗ 1,5 м/с моделирует самоход стержней управления и защиты. Моделировался процесс всплытия стержней в потоке свинцового теплоносителя, поэтому скорость ввода реактивности принималась равной скорости теплоносителя.

Изменение во времени средней температуры топлива, оболочки и теплоносителя в центральной ТВС на высоте 70 см от входа в АЗ показаны на рис. 3.

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

Потеря принудительной циркуляции свинца (LOF WS) – частичная блокада проходного сечения на входе в АЗ. Этот тип аварий рассматривался подробно в предыдущих работах [11]. Здесь же дан сравнительный анализ влияния обратных связей по температуре и плотности теплоносителя на теплогидравлические характеристики АЗ при блокаде на входе 16 центральных ТВС.

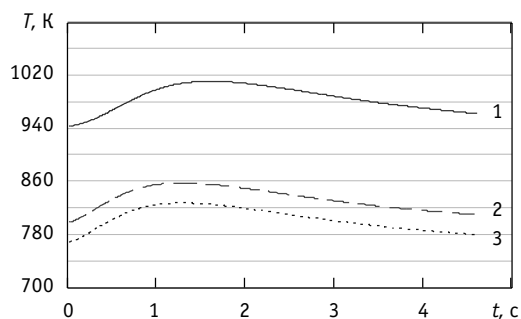


Рис. 3. Изменение во времени средней температуры топлива (1), оболочки (2) и теплоносителя (3) в центральной ТВС

На рис. 4–6 приведены расчетные зависимости средней температуры теплоносителя от времени в ходе протекания процесса, распределения температуры по радиусу твэла на высоте 70 см и температуры теплоносителя по высоте АЗ в установившемся стационарном состоянии, полученные без учета обратных связей (1) и с их учетом (2), для центральной блокированной ТВС. Как видно из графиков, учет отрицательных коэффициентов реактивности по температуре и плотности теплоносителя

ля приводит к снижению максимальных значений температур и уменьшению времени действия перегревов.

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 АЗ). При этом, в первую очередь, аварийная ситуация возникает из-за превышения максимально допустимой температуры оболочки твэлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью комплекса совместного нейтронно-теплогидродинамического расчета SKETCH-THERMICO проведено расчетное моделирование ряда аварийных ситуаций (TOP WS, LOF WS) для АЗ проектируемой РУ БРЕСТ-2400. Результаты показывают, что принятые конструктивные решения для этой проектируемой РУ обеспечивают безопасность в рассмотренных проектных авариях.

Полученные на сегодняшний день результаты позволяют утверждать, что представленный инструмент моделирования АЗ реакторов с жидкометаллическим теплоносителем – интегрированный программный комплекс (SKETCH-THERMICO), основанный на модернизированной версии нейтронно-физического расчета и новой, существенно переработанной версии теплогидродинамического расчета дает возможность решать актуальные задачи проектирования перспективных быстрых жидкометаллических реакторов.

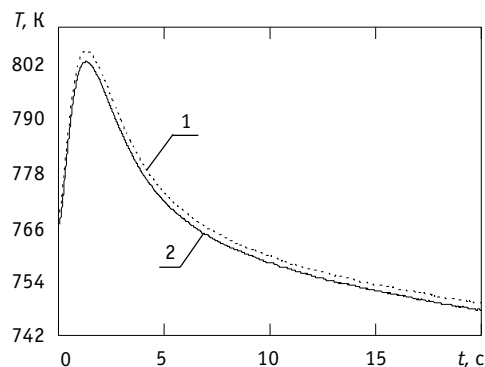


Рис. 4. Зависимость средней температуры теплоносителя в центральной ТВС на высоте 70 см от времени процесса, полученная без учета обратных связей (1) и с их учетом (2)

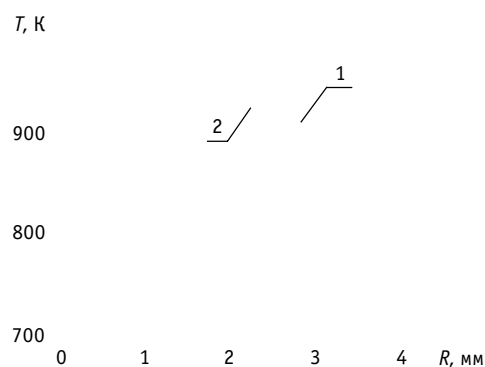


Рис. 5. Распределение температуры по радиусу твэла, находящегося в центральной ТВС на высоте 70 см через 20 с после начала процесса, полученное без учета обратных связей (1) и с их учетом (2)

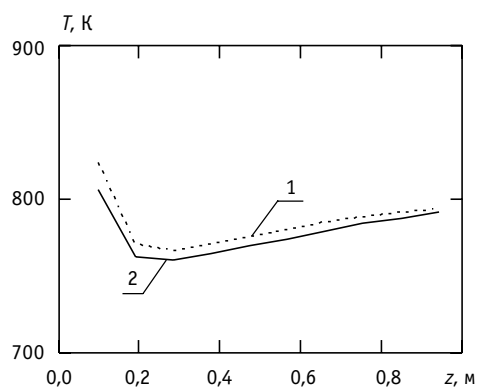


Рис. 6. Распределение температуры теплоносителя в центральной ТВС по высоте активной зоны через 20 с после начала процесса, без учета обратных связей (1) и с их учетом (2)

Литература

1. *Баринов С.В., Радкевич А.В.* Использование системы подготовки многогрупповых нейтронных данных CONSYST/ABBN в программном комплексе FACS-BR для трехмерных нейтронно-физических расчетов: Сборник «Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов». – 1999. – С. 341-5. (MCNP-4B, Manual, LA-12625M, 1997).
2. *Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Программный комплекс CONSYST//MMKKENO для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в Рn-приближении/Препринт ФЭИ-2887. – Обнинск, 2001. – 28 с.
3. *Щукин Н.В., Зимин В.Г., Романин С.Д., Витрук С.Г., Корсун А.С., Батулин Д.М.* Программный комплекс SKETCH для моделирования пространственной динамики перспективных быстрых реакторов //ВАНТ: Серия «Физика ядерных реакторов». – 1995. – Вып. 4. – С. 8-27.
4. *Корсун А.С.* Эффективная теплопроводность пористых структур, составленных из пучков стержней или труб/Тепломассообмен ММФ_4. Труды IV Минского межд. форума. – Т. 10. – Минск, 2000. – С. 242-250.
5. *Корсун А.С., Викулова С.В.* Эффективная теплопроводность вдоль сборки ТВЭЛ при ее продольном обтекании/Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР: Труды межд. конф. «Теплофизика-98» (в 2-х т.). – Т. 1. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – С. 77-87.
6. *Аналитическое* и расчетное обеспечение проектных решений АЭС с реактором БРЕСТ большой мощности (БРЕСТ-2400) и газотурбинным циклом преобразования энергии/Отчет о НИР. Гос. рег. № 01200216755. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
7. *Веселов А.М., Корсун А.С., Меринов И.Г., Романин С.Д., Харитонов В.С., Щукин Н.В.* Нейтронно-теплогидродинамический расчет активной зоны проектируемой РУ «БРЕСТ-2400»/ Научная сессия МИФИ-2003: Сб. научных трудов. – Т.8. – М.: МИФИ, 2003. – С. 83-84.
8. *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. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2004.
9. *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/11th International Conference on Nuclear Engineering. – Tokyo, Japan, 2003.
10. *Орлов В.В., Смирнов В.С., Филин А.И., Леонов В.Н., Долгов Ю.А., Баринов С.В.* Концепция безопасности будущих коммерческих быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем/Доклад на встрече рабочих групп W2/W3 МИНАТОМ РОССИЯ – CAE FRANCE. – Кадараш, 2002.
11. *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. – Т.8. – М.: МИФИ, 2004.

Поступила в редакцию 29.08.2005