

УДК 621.039

ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВ КОРСАР И RELAP ДЛЯ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ "МАЛАЯ ТЕЧЬ"

В. М. Махин, И. И. Семидоцкий
(ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград)

Приведены результаты расчетного исследования посредством кодов КОРСАР/V1.008.000 и RELAP5/MOD3.2 режимов испытаний на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР семи- и девятнадцатиэлементных ТВС. Твэлы испытаны в режиме, моделирующем конечные стадии аварии на ВВЭР с потерей теплоносителя и осушением верхней части твэлов (малые течи). Оценена консервативность кодов для расчетного анализа изучаемых режимов.

Введение

В реакторе МИР проведена серия испытаний фрагментов ТВС (из 7 и 19 укороченных твэлов высотой 1 м) в режимах аварий с потерей теплоносителя (ЛОСА) с целью изучения поведения твэлов при ситуации с осушением верхней части активной зоны ВВЭР и последующим заливом водой [1–3]. Моделируемый режим достигается при малой массовой скорости теплоносителя $5\text{--}15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и низком энерговыделении в испытуемом фрагменте ТВС, соответствующем уровню остаточного тепловыделения в активной зоне ВВЭР. Конечное состояние — дисперсный режим течения теплоносителя с осушением твэлов. Повторное смачивание реализуется резким снижением мощности реактора и соответственно ТВС.

В данной статье приводятся основные результаты расчетного анализа указанных условий испытаний ТВС. Расчеты выполнены с применением кодов КОРСАР/V1.008.000 и RELAP5/MOD3.2. Из совокупности экспериментов выбраны испытания с незначительным формоизменением твэлов (МТ-5П и МТ-6) [1, 2].

Методика реакторных испытаний и основные исходные данные для расчетов

Методика реакторных испытаний изложена в работах [1–3]. В испытаниях реализуются:

- 1) номинальный режим по тепловой нагрузке твэлов и параметрам теплоносителя, кото-

рый необходим для формирования структуры сердечника, а также определения мощности ТВС и проверки датчиков;

- 2) переходный (немодельный) режим;
- 3) режим с моделированием стадий аварии (с частичным осушением ТВС и последующим повторным смачиванием с закалкой оболочек) — режим LOCA + QUENCH.

В настоящей работе рассматриваются второй и третий режимы испытаний. Второй режим испытаний начинается на пониженном уровне мощности с операции выпаривания теплоносителя из подъемного участка. Последний выбирается таким образом, чтобы на стадии выпаривания исключить как возникновение кризиса 1-го рода, так и явление *захлебывания*. В дальнейшем (третий режим испытаний) требуемая динамика изменения температуры оболочки обеспечивается управлением мощностью реактора.

В третьем режиме испытаний реализуется дисперсный характер течения теплоносителя в верхней половине фрагмента ТВС с резким ростом температуры до $T_{\text{ф}} = 530 \pm 40^\circ\text{C}$ [4]. Рост температуры оболочки, обусловленный высыханием пленки жидкости, опережает увеличение температуры теплоносителя на выходе из ТВС. Установлен значительный тепломассообмен между ячейками в нижней части ТВС, приводящий к увеличению расхода пара в теплонапряженных ячейках и выравниванию температуры оболочек по сечению ТВС [4]. Исследования с применением датчиков паросодержания показали, что

на расстоянии $\sim 0,2$ м от границы раздела фаз объемное паросодержание составляет более 0,95, и зарегистрированы мелкодисперсные капли воды в паре, влияющие на охлаждение оболочек и дистанционирующих решеток [4, 5]. Указанный дисперсный режим с различной степенью неравновесности фаз характерен как для условий аварий с малой течью (МТ) и частичным осушением активной зоны ВВЭР, так и для второй стадии максимальной проектной аварии — повторного залива [6, 7].

Мощность ТВС определяется калориметрическим методом по измеренным значениям расхода теплоносителя в канале и подогрева теплоносителя в канале и ТВС. Дополнительный контроль мощности осуществляется путем регистрации мощности шести рабочих ТВС окружения и использования этих данных для установления мощности испытываемой ТВС. Соответствующие коэффициенты привязки мощности испытываемой ТВС к средней мощности рабочих ТВС определяются расчетом по программе MSU [8] и прямым измерением на критическом стенде (крит-сборке) реактора. Относительное изменение мощности ТВС регистрируется по показаниям трех датчиков прямого заряда (ДПЗ), разнесенных по высоте канала, и показаниям ближайшей ионизационной камеры (этот способ применим при изменении фазового состояния теплоносителя в переходном режиме и режиме LOCA).

Объект исследований — фрагмент штатной ТВС, состоящий из 7 или 19 твэлов с высотой активной части 1 м. Твэлы размещены в шестигранном чехле с шагом 12,2 мм (МТ-5П: шесть "свежих", с пониженным обогащением, твэлов (1–6) и центральный — выгоревший твэл из реактора ВВЭР-440) и 12,75 мм (МТ-6: восемнадцать свежих твэлов с интерметаллидным топливом и оболочкой ВВЭР и центральный — выгоревший штатный твэл из ТВС реактора ледокола "Ленин"). Часть твэлов оснащается термопарами, расположенными в топливных сердечниках и оболочках твэлов [1–3]. В МТ-5П два свежих твэла были оснащены оболочечными термопарами (уровни 720 и 850 мм от низа сердечника), третий свежий твэл — топливной, центральной, термопарой (уровень 875 мм) [2]. В МТ-6 термопары размещались в высокотеплопроводных сердечниках десяти твэлов на уровнях 325, 525, 725 и 925 мм [1]. Общий вид облучательного устройства приведен на рис. 1,а, схема разме-

щения твэлов и термопар — на рис. 1, б, в. Канал имеет два корпуса — основной и наружный (охранный), между ними — зазор, который заполняется азотом, гелием или вакуумируется.

Для расчетного исследования использованы следующие экспериментальные данные:

- размеры элементов конструкции облучательного устройства, ТВС и твэлов;
- мощность ТВС;
- расход и давление теплоносителя в канале;
- температура теплоносителя на входе в канал и ТВС и на выходе из ТВС и подъемного участка над ТВС (см. рис. 1,а);
- температура оболочек твэлов;
- температура сердечников твэлов;
- распределение энерговыделения по высоте твэлов;
- моменты начала осушения и роста температуры в различных сечениях ТВС;
- расположение границы раздела фаз *пар-жидкость*, за которую принята область раздела деформированных (обжатых) и недеформированных оболочек.

Параметры, которые применены для оценки адекватности расчета эксперименту, следующие:

- температура оболочек и сердечников твэлов;
- температура теплоносителя на выходе из ТВС;
- уровень границы раздела *пар-жидкость*;
- сечение с максимальной температурой оболочек;
- момент начала осушения оболочек.

Параметры режима LOCA в испытании МТ-5П [2, 5]: давление 5,6 МПа; массовая скорость $14 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; недогрев теплоносителя на входе в ТВС $4\text{--}8^\circ\text{C}$; мощность ТВС $Q = 35\text{--}45 \text{ кВт}$ (увеличение в процессе испытаний); нагрузка в сечении с максимальной температурой $34\text{--}43 \text{ Вт}/\text{см}$.

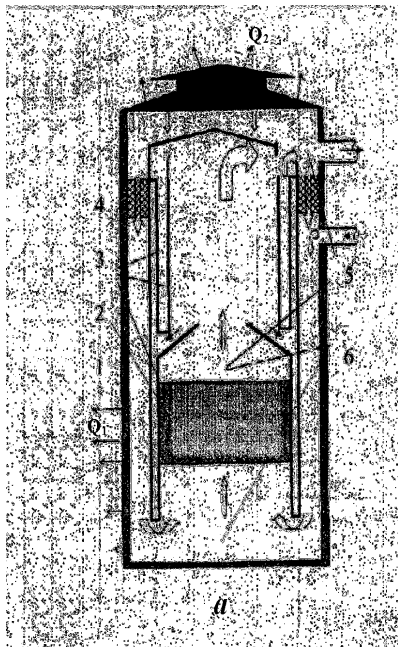
Максимальная температура твэлов наружного ряда:

- уровень 720 мм — температура оболочек 930 и 940°C (соответственно твэлы 2, 6 — см. рис. 1, б);
- уровень 850 мм — температура оболочки 860°C (твэл 2);
- уровень 875 мм — температура сердечника 960°C , температура оболочки $830\text{--}850^\circ\text{C}$ (твэл 4).

Параметры режима LOCA в испытании МТ-6 [1]: давление 2,3 МПа; массовая скорость 4–6 кг/(м² · с); недогрев теплоносителя на входе в ТВС до 10°С; мощность ТВС $Q = 28–35$ кВт (увеличение в процессе испытаний); нагрузка в сечении с максимальной температурой 22–28 Вт/см.

Максимальная температура сердечников, зарегистрированная в эксперименте:

- уровень 525 мм — температура сердечников 520 и 530°С (соответственно твэлы 16, 14 — см. рис. 1, в);
- уровень 725 мм — температура сердечников 820, 820 и 869°С (твэлы 5, 11 и 15);
- уровень 925 мм — температура сердечников 700, 725 и 730°С (твэлы 7, 1 и 13).



Вследствие высокой теплопроводности топливной композиции средняя температура оболочки незначительно отличается от температуры сердечника (для уровня 725 мм меньше на 5–7°С, для уровня 525 мм — на 10–15°С).

Расчетная схема

Расчетная схема включает модели всех основных элементов облучательного устройства, представленных на рис. 1. Всего схема насчитывает 80 объемов, 78 соединений и 123 тепловые структуры. Ее детальное описание дано в работе [9]. Учитываются теплообмен корпуса канала и верхней части облучательного устройства с водяным бассейном реактора, изменение распределения энерговыделения в ТВС в результате замены воды на пар в верхней части ТВС, а также энерговыделение в элементах конструкции в результате поглощения γ -квантов реакторного излучения, лучистый теплообмен между твэлами и элементами конструкции.

Для анализа применялась и упрощенная схема, в которой были представлены только ТВС и граничные условия на ее входе и выходе. По этой схеме оценивалась чувствительность расчета по отношению к указанным параметрам.

Результаты расчетов

Расчет 7-элементной ТВС (эксперимент МТ-5П). Расчеты по упрощенной схеме позволили выявить существенную роль конденсата,

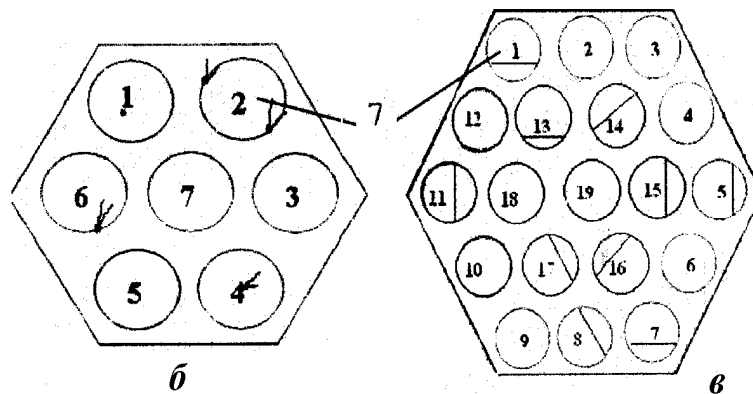


Рис. 1. Облучательное устройство: а — общий вид; б — сечение МТ-5П; в — сечение МТ-6; 1 — канал; 2 — ТВС; 3 — теплоизоляция в виде прослоек; 4 — узел уплотнения; 5 — измерения паросодержания; 6 — измерение температуры теплоносителя; 7 — термометрированные твэлы с термопарами в сердечнике и оболочке на различной высоте; Q_1, Q_2 — тепловые потоки, отводимые в бассейн

который образуется в подъемном участке и головке канала и может поступать на вход ТВС как по стенке разделителя потоков теплоносителя, так и через узел уплотнения. В переходном режиме испытания МТ-5П вклад конденсата сравним с расходом теплоносителя в канале.

Расчетом по детальной модели [9] установлено, что *горячее пятно* образуется при мощности 20 кВт и до уровня мощности $Q = 32$ кВт температура твэлов увеличивается незначительно вследствие влияния воды, поступающей из подъемного участка над ТВС. При большей мощности ($Q \geq 32$ кВт) реализуется закритический режим испытаний, характерный для охлаждения паром. Удовлетворительное описание кодом RELAP5/MOD3.2 момента образования горячего пятна и изменения температуры во времени достигается при занижении мощности на 30 % (рис. 2). С учетом погрешности определения мощности и расхода, а также снижения мощности осушенной части твэлов при замене воды на пар (до 10 %) можно оценить консервативность кода, которая равна 5–15 % [9].

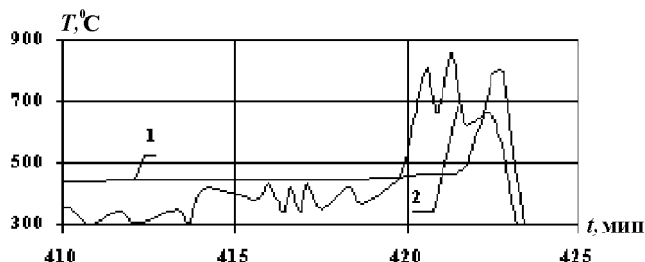


Рис. 2. Расчетные (1) и экспериментальные (2) значения температуры оболочек на уровне $Z = 850$ мм в испытании МТ-5П

На основе расчетов усовершенствована конструкция устройства. Для сбора конденсата и дальнейшего его выпаривания теплоизолирующие прослойки выполнены Z-образной формы (см. рис. 1). Принятыми конструктивными мерами снижена доля конденсата, поступающего в ТВС и влияющего на режимы испытаний.

Расчет 19-элементной ТВС (эксперимент МТ-6). Режим испытаний 19-элементной ТВС отличается от рассмотренного выше режима снижением массовой скорости теплоносителя и его давления. Вследствие отмеченных особенностей испытание МТ-6 проведено при меньшей граничной мощности ТВС. Реализация режима ЛОСА при низкой нагрузке (снижение на 40 %) улучшила управляемость режимом испытаний.

Согласно рекомендации [4] для учета эффекта тепломассопереноса между ячейками расчет выполнен для твэла со средней мощностью. По высоте ТВС выделялось 19 участков с заданием измеренного профиля энерговыделения. Учтено снижение на 10 % мощности верхней части ТВС при замене воды на пар.

Установлено, что и в этом случае коды КОРСАР и RELAP5/MOD3.2 обладают консервативностью и качественно правильно описывают процесс осушения твэлов и рост температуры оболочки в верхней части экспериментальной ТВС с приемлемым совпадением расчетных и экспериментальных данных по температуре твэлов (рис. 3, 4).

Момент образования горячего пятна предсказывается кодами RELAP и КОРСАР, если расход теплоносителя на входе в ТВС (G) в указанный момент завышен на 20 %. Этот результат характеризует степень консервативности кода при расчете момента образования горячего пятна. В дальнейшем, после достижения в расчете состояния с осушением оболочек, расход был уменьшен до истинного значения $G = 8$ г/с. При указанном (реальном) расходе достигнуто удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных значений температуры оболочки на уровнях 725 и 925 мм от начала обогреваемого участка (см. рис. 3, 4).

При дальнейшем увеличении мощности момент образования горячего пятна для уровня 525 мм рассчитывается корректно (рис. 5). Вместе с тем расчетные значения температуры оболочки для этого сечения существенно выше экспериментальных значений (на 400°C), что подтверждает отмеченный консерватизм кодов, наиболее сильно сказывающийся вблизи границы раздела фаз. Несмотря на это, оценка такой интегральной характеристики, как максимальная температура твэла, проводится с удовлетворительной точностью (рис. 6). Так, расчетные значения максимальной температуры оболочки по коду RELAP выше экспериментального значения (863°C) на 51°C , по коду КОРСАР наблюдается практическое совпадение (860°C). Таким образом, в целом код КОРСАР обладает меньшей консервативностью, чем код RELAP5.

Отмеченный экспериментальный эффект опережающего роста температуры оболочки (высыхание пленки жидкости) в сравнении с температурой теплоносителя на выходе ТВС кодами не отслеживается.

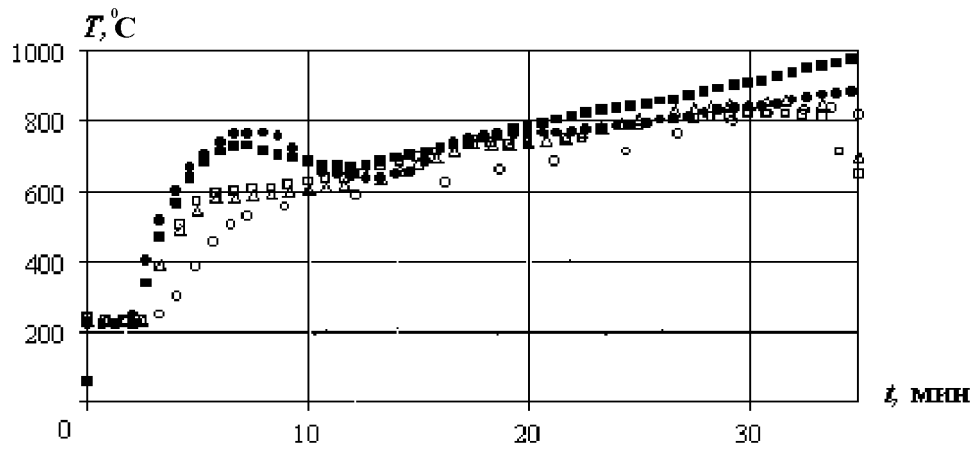


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения средних температур оболочек на уровне $Z = 725$ мм в испытании МТ-6: ● — расчет по коду КОРСАР; ■ — расчет по коду RELAP; ○ — эксперимент, твэл 5; □ — эксперимент, твэл 11; △ — эксперимент, твэл 15

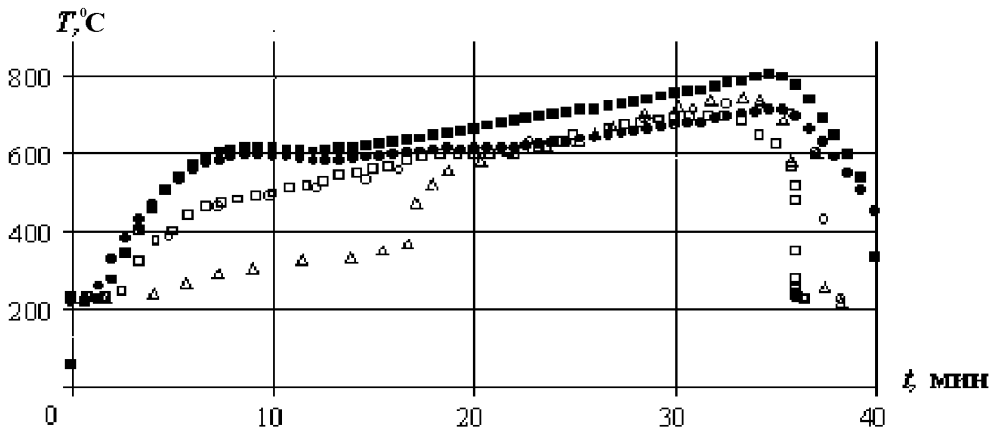


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные значения средних температур оболочек на уровне $Z = 925$ мм в испытании МТ-6: ● — расчет по коду КОРСАР; ■ — расчет по коду RELAP; ○ — эксперимент, твэл 1; □ — эксперимент, твэл 7; △ — эксперимент, твэл 13

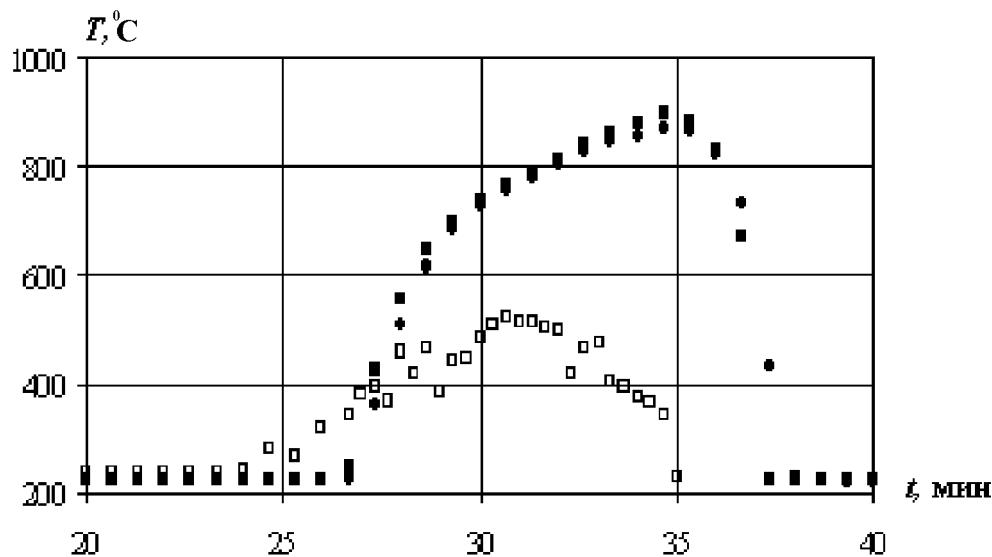


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения температуры сердечника твэла 16 на уровне $Z = 525$ мм: ● — расчет по коду КОРСАР; ■ — расчет по коду RELAP; □ — эксперимент

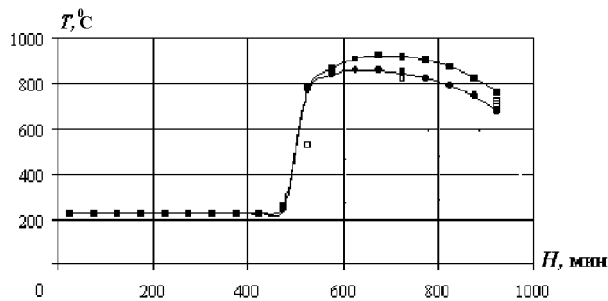


Рис. 6. Высотное распределение усредненной по сечению ТВС температуры оболочек твэлов в момент достижения максимума температуры твэлов в эксперименте и расчете $t = 1870$ с, $Q = 30$ кВт, $G = 8$ г/с: ● — расчет по коду КОРСАР; ■ — расчет по коду RELAP; □ — эксперимент; --- — флуктуации температуры

Заключение

В результате расчетного анализа двух режимов реакторных испытаний ТВС в условиях аварии с потерей теплоносителя и частичным осушением активной зоны установлена применимость кодов RELAP и КОРСАР для моделирования подобных режимов и оценена степень их консервативности.

Расчетные значения максимума температуры оболочки в модельном режиме МТ-6 — 919 °С (RELAP) и 857 °С (КОРСАР) — близки к экспериментальному (863 °С). Тем не менее в целом оба кода дают консервативные результаты. В частности, граница участка с осушением в расчете расположена ниже на 45 мм, чем в эксперименте (480 мм согласно расчету, 525 мм по показаниям термопар — см. рис. 6).

Расчетный анализ режимов МТ-5П также подтверждает консервативность кода RELAP, оценка которой составляет 5 — 15 %.

Список литературы

1. Куприенко В. А., Махин В. М., Шулимов В. Н. и др. Реакторные испытания сборки твэлов с интерметаллидным топливом в режиме "Малая течь" на петле ПВП-2 реактора МИР // Тр. междунар. конф. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР" ("Теплофизика-98"). Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. Т. 1. С. 7—13.
2. Горячев А. В., Киселева И. В., Махин В. М. и др. Результаты исследования поведения высоковыгоревших и "свежих" твэлов

ВВЭР-440 в условиях аварии с осушением активной зоны // Там же. С. 338—345.

3. Махин В. М., Шулимов В. Н. Экспериментальное изучение поведения многоэлементных ТВС и твэлов ВВЭР в аварийных режимах эксплуатации с потерей теплоносителя // Там же. Т. 2. С. 27—36.
4. Махин В. М., Шулимов В. Н. Анализ теплогидравлических условий испытаний фрагментов ТВС ВВЭР в экспериментах LOCA в реакторе МИР-М1 и рекомендации по совершенствованию кодов // Тез. докл. семинара "Современное состояние развития программных средств для анализа динамики и безопасности АЭС". Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 44—45.
5. Джусов Ю. П., Махин В. М., Шулимов В. Н. Использование метода электротрондирования в реакторных экспериментах с осушением активной зоны ВВЭР в режиме "Малая течь" // Тр. междунар. конф. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР". Теплофизика-95. Т. 1. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1995. С. 127—132.
6. Балунев Б. Ф., Гурьянов С. В., Югай Т. С. и др. Охлаждение частично осушенной активной зоны корпусного реактора при "малой течи" // Тр. междунар. семинара "Теплофизика-90". Т. 1. Обнинск: ФЭИ, 1991. С. 239—244.
7. Ложкин В. В., Колмаков А. П., Куликов Б. И. и др. Эксперименты по повторному заливу на модели ТВС ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1998. Вып. 1. С. 94—103.
8. Gomin E., Maiorov L. The MSU Monte Carlo Code for 3D Depletion Calculation // Proc. of Int. Conf. on Math. and Comp., Reactor Phys. and Environ. Anal. in Nucl. Applic. Madrid, 1999. Vol. 2. P. 997—1006.
9. Семидоцкий И. И., Махин В. М. Применение теплогидравлического кода RELAP5/MOD3 для анализа режима петлевых испытаний в исследовательском реакторе МИР твэлов ВВЭР при параметрах аварии "Малая течь" // Тр. междунар. конф. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР" ("Теплофизика-98"). Т. 2. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. С. 208—217.