

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОЙ ОБОЛОЧКИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

*А. М. Анфимов, И. Н. Кирилов, Д. В. Кузнецов, С. Л. Осипов,  
М. В. Гусев<sup>1</sup>, А. А. Кечков<sup>1</sup>, С. В. Сумароков<sup>1</sup>*

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород  
<sup>1</sup>ИБРАЭ РАН, Москва

## Введение

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» обоснование безопасности действующих и проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) в условиях нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и при авариях осуществляется путем выполнения связанных теплогидравлических, нейтронно-физических и термомеханических расчётов. Для проведения такого рода расчетных исследований используются интегральные коды СОКРАТ-БН и ЕВКЛИД, а также коды, моделирующие отдельные физические процессы [1].

В последнее время расчетным исследованиям в обоснование безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах присущи следующие современные тенденции развития:

- рост числа расчетов и их сложности, увеличение объема хранимых и обрабатываемых данных;
- необходимость длительного хранения утвержденных результатов и данных моделирования, большое количество используемых расчетных кодов;
- необходимость проведения расчетов на высокопроизводительных вычислительных ресурсах.

В данном докладе рассмотрены вопросы применения системной оболочки (СО), интегрирующей работу кодов различного функционального назначения в единой информационной среде, что снижает трудоемкость выполняемых работ, при сохранении качества выполнения расчетов.

## Проблемы, свойственные текущей технологии проведения расчетов

При организации и проведении расчетных обоснований у пользователей расчетных кодов возникают проблемы, свойственные текущей технологии проведения расчетов, которые схематично представлены на рис. 1.

Наличие такого рода проблем приводит к увеличению трудоемкости выполняемых работ в рамках обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах, повышению требований к квалификации сотрудников и возникновению ошибок при проведении расчетных исследований.

Для решения изложенных выше проблем необходимо и целесообразно создание единой расчетной платформы обоснования безопасности реакторной установки БН. Данная платформа должна выполнять следующие функции:



Рис. 1. Проблемы, свойственные текущей технологии проведения расчетов

– автоматизация управления расчетными данными (сбор, структурирование, централизованное и защищенное хранение, поиск, подготовка для визуализации и т. д.);

– унификация механизмов для проведения расчетов с использованием различных расчетных систем (в том числе собственной разработки) и вычислительных ресурсов;

– автоматизация, организация и регламентация совместной работы всех участников (в том числе территориально удаленных друг от друга) процессов проведения расчетных обоснований;

– сохранение и автоматизация методик моделирования (процедур расчетного обоснования) в том числе организация хранилища и систематизация расчетных кодов).

### Системная оболочка

В рамках реализации этой расчетной платформы специалистами ИБРАЭ РАН совместно с АО «ОКБМ Африкантов» и РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана СО [2, 3].

СО предназначена для организации и проведения расчетов с использованием как кодов нового поколения, так и других специализированных расчетных кодов собственной разработки, проектных кодов, коммерческих расчетных систем. СО включает в себя средства подготовки входных данных, механизмы для запуска, управления и мониторинга расчетов на вычислительных ресурсах различного уровня, инструменты обработки результатов расчетов. Потенциальными пользователями системной оболочки являются предприятия и научно-исследовательские институты, широко применяющие компьютерное моделирование при обосновании конструкторских решений, вычислительные центры, предоставляющие услуги и вычислительные ресурсы для проведения расчетов.

Схема функционирования СО представлена на рис. 2.

Основными преимуществами использования СО являются:

– централизованное и упорядоченное хранение и доступ к данным моделирования с отслеживанием версии и контролем прав доступа;

– единая точка доступа и унифицированные механизмы взаимодействия со всеми расчетными кодами, средствами подготовки входных данных и визуализации результатов;

– простые процедуры взаимодействия с вычислительными ресурсами – все механизмы взаимодействия реализуются средствами системной оболочки и скрыты от пользователей;

– широкие возможности по наращиванию функциональности системной оболочки за счет простой и быстрой интеграции дополнительных расчетных средств без их модификации.

### Опытная эксплуатация СО

Для подтверждения работоспособности и правильности функционирования СО при проведении расчетов с использованием кодов нового поколения в 2016 году в АО «ОКБМ Африкантов» была проведена ее опытная эксплуатация.

Опытная эксплуатация СО включала в себя несколько этапов:

– обучение пользователей (изучение сопроводительной документации и демонстрация специалистами ИБРАЭ РАН основных функциональных возможностей СО);

– опытная эксплуатация административных функций СО (установка и настройка актуальной версии СО, регистрация расчетных кодов и пользователей);

– опытная эксплуатация пользовательских функций СО (указание индивидуальных пользова-

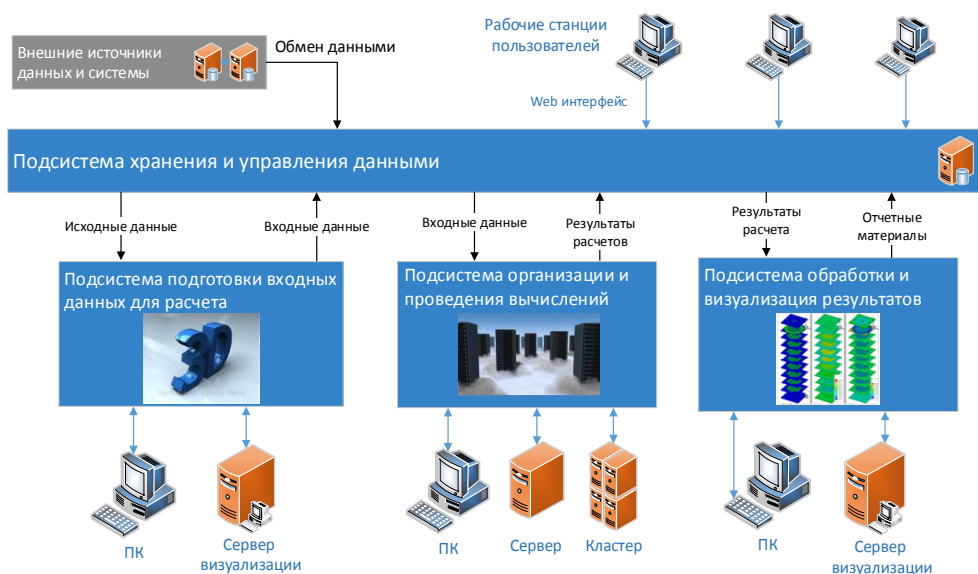


Рис. 2. Схема функционирования СО

тельских настроек и структуры хранения данных, регистрация локальных пре / постпроцессоров и проведение локальных и удаленных расчетов расхолаживания реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем).

Опытная эксплуатация пользовательских функций СО представляет наибольший практический интерес с точки зрения непосредственного использования системной оболочки применительно к расчетным исследованиям.

В рамках опытной эксплуатации пользовательских функций СО были выполнены расчеты следующих режимов:

- расхолаживание на естественной циркуляции (ЕЦ) реактора БН-600;
- потеря системного электроснабжения реактора БН большой мощности;
- начальная стадия тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности.

В виду того, что для проведения локальных и удаленных расчетов с использованием СО используются различные адаптированные версии расчетных кодов, было проведено сравнение результатов расчетов с целью подтверждения их соответствия.

### Расхолаживание на ЕЦ реактора БН-600

Локальный и удаленный расчеты режима расхолаживания на ЕЦ реактора БН-600 с использованием СО на базе ANSYS EKM, а также независимый от СО расчет на ПК выполнялись кодом HYDRA-IBRAE/LM/V1.

В качестве исходных данных для расчета режима расхолаживания на ЕЦ реактора БН-600 использовалась нодализационная схема установки БН-600, подробно описанная в верификационном отчете кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 [4].

Исходное состояние реактора соответствовало работе на уровне мощности 50 % от номинальной. В начале эксперимента отключились главные циркуляционные насосы первого и второго контуров (ГЦН-1, ГЦН-2) всех петель одновременно. По сигналу снижения оборотов ГЦН-1 сформировался сигнал быстрой аварийной защиты, в результате чего в активную зону (а. з.) были введены стержни аварийной защиты (АЗ). После этого были отключены секции пароперегревателя, и расхолаживание осуществлялось через испарители парогенератора (ПГ). Регулирование расхода питательной воды осуществлялось оператором с помощью регулирующих клапанов. В результате эксперимента было установлено развитие ЕЦ в первом и втором контурах РУ.

Сравнение результатов расчетов приводится на рис. 3, где представлена температура натрия на выходе из а. з. Из рис. 3 видно, что результаты расчета с использованием СО удовлетворительно совпадают с независимым расчетом на ПК без использования СО. Максимальное отклонение результатов расчетов с использованием СО от независимых расчетов на ПК составляет менее 1 %.

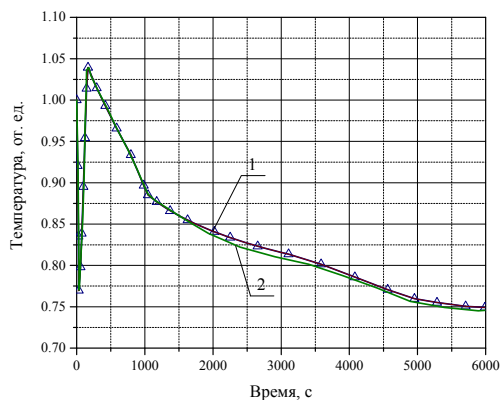


Рис. 3. Сравнение результатов расчета режима расхолаживания на ЕЦ реактора БН-600 с уровня мощности 50 %  $N_{ном}$ :  $\Delta$  – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (независимый от СО расчет на ПК), 1 – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (локальный расчет с использованием СО), 2 – отношение температуры натрия на выходе из а. з. к исходному значению (удаленный расчет с использованием СО)

### Потеря системного электроснабжения реактора БН большой мощности

Локальный расчет режима с потерей системного электроснабжения реактора БН большой мощности с использованием СО, а также независимый от СО расчет на ПК выполнялись кодом СОКРАТ-БН/В2.

Для расчета данного режима в качестве исходных данных была использована нодализационная схема реактора БН большой мощности, подробно описанная в [5]. В качестве исходного состояния при анализе аварии рассматривается работа энергоблока на четырех теплоотводящих петлях, уровень мощности составляет 100 % от номинального значения.

Потеря системного электроснабжения приводит к отключению ГЦН-1 и ГЦН-2, отключению питательных и конденсатных электронасосов, что приводит к прекращению подачи питательной воды в ПГ.

По сигналу «Потеря системного электроснабжения» реализуется алгоритм «АЗ с подключением системы аварийного отвода тепла», в соответствии с которым:

- сбрасываются все стержни аварийной защиты, вводятся в активную зону компенсирующие и регулирующие стержни (КС и РС);
- запускаются дизель-генераторные установки, осуществляется последовательное подключение потребителей системы аварийного электроснабжения;
- обороты ГЦН-1 снижаются до «0» в соответствии с кривой естественного механического выбега, что приводит к вводу в активную зону гидравлически взвешенных стержней пассивной аварийной защиты (ПАЗ-Г);
- обороты ГЦН-2 снижаются до «0» в соответствии с кривой естественного механического выбега;

– подключается система аварийного отвода тепла (САОТ): открываются полностью входные и выходные шиберы на каждом воздушном теплообменнике (ВТО);

– ПГ отсекаются по третьему контуру и заполняются азотом;

Отвод остаточных тепловыделений реактора будет осуществляться через ВТО САОТ при естественной циркуляции теплоносителя в первом контуре и естественной циркуляции теплоносителя в промежуточном контуре САОТ.

Сравнение результатов расчетов приводится на рис. 4, где представлена температура натрия на выходе из активной зоны. Из рис. 4 видно, что результаты расчета с использованием СО совпадают с независимым расчетом на ПК без использования СО. Максимальное отклонение результатов расчетов с использованием СО от независимых расчетов на ПК составляет менее 1 %.

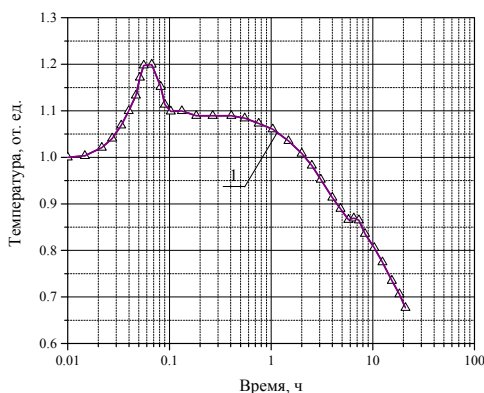


Рис. 4. Сравнение результатов расчета режима с потерей системного электроснабжения реактора БН большой мощности:  $\Delta$  – отношение температуры натрия на выходе из а.з. к исходному значению (независимый от СО расчет на ПК), 1 – отношение температуры натрия на выходе из а.з. к исходному значению (расчет с использованием СО)

### Начальная стадия тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности

Локальный расчет начальной стадии тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности с использованием СО, а также независимый от СО расчет на ПК выполнялись кодом ЕВКЛИД/V1.

В качестве исходных данных использовалась нодализационная схема реактора БН большой мощности, подробно описанная в [5].

В качестве исходного состояния при анализе аварии рассматривается работа энергоблока на четырех теплоотводящих петлях, уровень мощности составляет 100 % от номинального значения.

В качестве исходного события аварии принимается потеря системного и надежного электроснабжения на станции.

Исходное событие приводит к потере функционирования систем и потребителей нормального и надежного электроснабжения. ГЦН-1 и ГЦН-2 от-

ключаются. Обороты насосов снижаются в соответствии с кривой естественного механического выбега до нуля. Прекращается расход питательной воды в парогенераторы. Постулируется отказ управляющей системы безопасности аварийной защиты, вследствие чего отсутствует сброс стержней АЗ, КС и РС, автоматический ввод в работу САОТ. Постулируется также отказ всех пассивных систем останковки реактора (стержней ПА3-Г и ПА3-Т).

Сравнение результатов расчетов приводится на рис. 5, где представлена температура натрия на выходе из а.з. Из рис. 5 видно, что результаты расчета с использованием СО совпадают с независимым расчетом на ПК без использования СО. Максимальное отклонение результатов расчетов с использованием СО от независимых расчетов на ПК составляет менее 1 %.

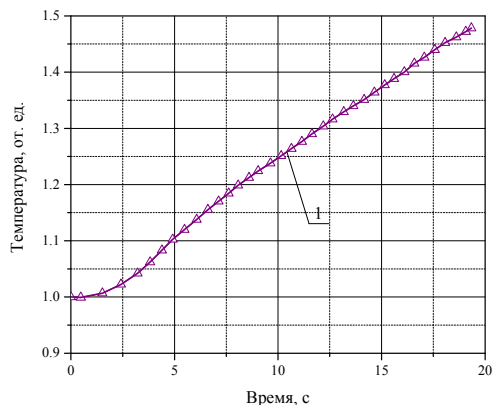


Рис. 5. Сравнение результатов расчета начальной стадии тяжелой аварии типа ULOF на реакторе БН большой мощности:  $\Delta$  – отношение температуры натрия на выходе из а.з. к исходному значению (независимый от СО расчет на ПК), 1 – отношение температуры натрия на выходе из а.з. к исходному значению (расчет с использованием СО)

### Заключение

Для организации и проведения проектных расчетов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в условиях нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и при авариях специалистами ИБРАЭ РАН совместно с АО «ОКБМ Африкантов» и РФЯЦ ВНИИЭФ разработана системная оболочка.

Системная оболочка обеспечивает централизованное хранение и управление всеми расчетными данными предприятия, запуск и управление расчетами, как на ПК, так и на централизованных вычислительных ресурсах. Обеспечивается единый интерфейс управления всеми расчетными данными и расчетными кодами, интегрированными в состав системной оболочки.

Использование системной оболочки позволяет уменьшить время поиска данных повысить степень доверия к хранимым результатам расчетов, сократить время на подготовку и запуск расчетов.

В АО «ОКБМ Африкантов» была проведена ее опытная эксплуатация, которая заключалась главным образом в проведении практических расчетов и их сравнении с имеющимися проектными данными.

В виду того, что для проведения локальных и удаленных расчетов с использованием СО используются различные адаптированные версии расчетных кодов, было проведено сравнение результатов расчетов с целью подтверждения их соответствия.

В результате проделанной работы была подтверждена работоспособность и правильность функционирования СО.

### Литература

1. Расчетная платформа для обоснования проекта РУ БН-1200 / Е. В. Марова, С. Л. Осипов, С. Ф. Шепелев и др. // Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2016) – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2016. – Т. 2 – С.: 47–53.

2. Гусев М. В., Кечков А. А., Арутюнян А. Р. Система поддержки процессов проведения расчет-

ных обоснований в атомной энергетике // Информационные технологии в проектировании и производстве 2015. № 1. С.21–27

3. Гусев М. В., Кечков А. А., Олисов А. П. Управление процессами расчетных обоснований и их интеграция в единую информационную среду предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве 2016. №1. С.23-29

4. Rtishchev N. A., Chalyy R. V., Semenov V. N., Fokin A. M., Tarasov A. E., Shepelev S. F., Osipov S. L., Gorbunov V. S., Anfimov A. M. «Validation of SOCRAT-BN Code on the Base of Reactor Experiments». Proceedings of the «10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS10)», Okinawa, Japan, 14-18 Dec. 2014.

5. Осипов С. Л., Горбунов В. С., Анфимов А. М., Ртищев Н. А., Чалый Р. В., Тарасов А. Е., Семёнов В. Н. Применение интегрального расчетного кода СО-КРАТ-БН для обоснования безопасности РУ БН-1200 / «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», третья международная научно-техническая конференция: сборник докладов. – М.: ОАО «НИКИЭТ». 2014. – Т. 2. – С. 245–250.