электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

**УДК 621.039**

# Моделирование и анализ аварийных процессов в быстром реакторе малой мощности со свинцово-висмутовым теплоносителем

***Коноваленко Ф.Д., студент***
*кафедра «Ядерные реакторы и установки»,*
*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Окунев В.С.,к.т.н., доцент*
*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*
*bauman@bmstu.ru*

В настоящее время развитие ядерных энергетических установок имеет 2 основных направления: совершенствование конструкции корпусных водо-водяных реакторов и разработка принципиально новых проектов реакторов на быстрых нейтронах (РБН).

В конструкции РБН также можно выделить два различных пути. Это опробованная на примере энергоблоков БН-350 и БН-600 технология строительства и эксплуатации реакторов с натриевым теплоносителем и перспективные проекты реакторов с тяжёлым теплоносителем, таким как свинец или эвтектический сплав свинец-висмут. Рассмотренный проект имеет моноблочную компоновку, при которой всё оборудование первого контура размещается в прочноплотном корпусе. Благодаря такой компоновке снижается вероятность возникновения течи теплоносителя. Кроме того, в реакторах данного типа полностью исключены аварии с возгоранием теплоносителя, в отличие от РБН с натриевым теплоносителем. Всё вышеперечисленное позволяет говорить о ещё большем повышении самозащищённости реакторной установки и приближении к идеалам концепции естественной безопасности. Общий вид моноблочной реакторной установки представлен на рис. 1.

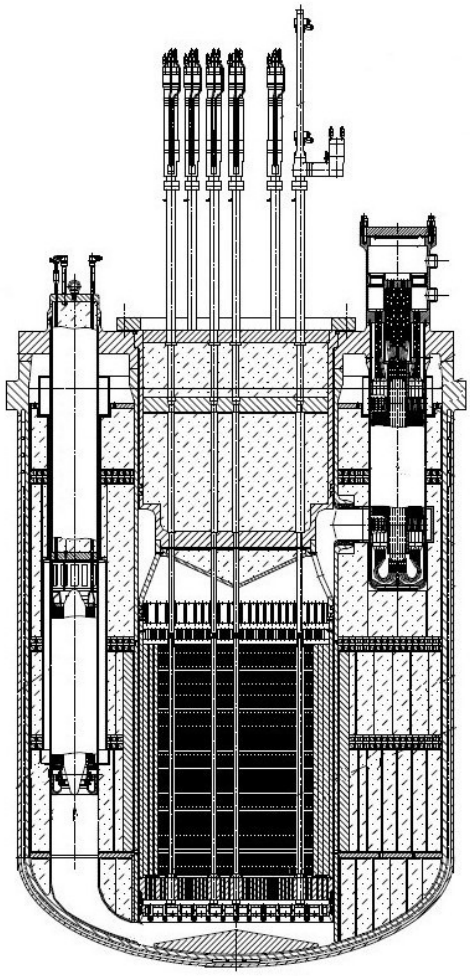

Рис. 1. Общий вид реакторной установки: разрез по оси теплообменника и циркуляционного насоса.

Целью данной работы является анализ переходных процессов в РБН при различных сценариях развития аварии с использованием программного комплекса FRISS (Fast Reactor Inherent Safety Study). ПК FRISS был разработан в США и способен анализировать выполнение тех или иных функционалов безопасности в стационарном состоянии, переходном режиме и новом стационарном состоянии, учитывая присущие реакторной установке свойства естественной безопасности. Расчёт можно провести для 4-х основных аварийных режимов типа ATWS (Anticipated Transient Without Scram) – переходные процессы в предположении отказа аварийной защиты. Это режимы TOP WS (Transient Overpower), LOF WS (Loss of Flow), LOCA WS (Loss of Coolant Accident), OVC WS (Overcooling Accident). ПК FRISS рассчитывает цилиндрическую активную зону реактора, с переменным обогащением по радиусу, что позволяет учесть наличие активной зоны и боковой зоны воспроизводства. При расчёте решается 3 группы уравнений:

- уравнения точечной кинетики в многогрупповом приближении

- нестационарное уравнение теплопроводности
- уравнение баланса реактивности, связывающее изменение температур с реактивностью.

При этом принимается допущение, что коэффициенты реактивности не зависят от температуры. Рассматривается 3 группы коэффициентов реактивности: допплеровский, связанный с изменением температуры топлива, температурный коэффициент по теплоносителю и геометрический, связанный с расширением опорной плиты и изменением геометрии активной зоны. Для расчёта в среде ПК FRISS-1D необходимо задать геометрические размеры активной зоны и элементарных ячеек, теплофизические свойства топлива, теплоносителя и элементов конструкции, скорости теплоносителя, групповые константы для нейтронно-физического расчёта и коэффициенты реактивности. В результате расчёта программный комплекс создаёт файл с табличным описанием температур топлива, теплоносителя, относительной мощности и характеристик, свойственных данному аварийному режиму. Вид окна результатов приведён на рис. 2.

Вариант: svbr_top
Дата: 27. 2.2013;
Время: 14 час. 18 мин.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОГО РЕАКТОРА
С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ
В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ "ATWS"

FRISS

Fast Reactor Inherent Safety Study

Р Е З У Л Ь Т А Т Ы  Р А С Ч Е Т А:

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА:

```
TOP WS:  введенная реактивность.............:  .1088E-02;
         ..————————//————————...............:  .3000E+00 $;
         время ввода реактивности...........:  .1000E+02 с;
         время начала процесса "TOP WS".....:  .1000E+02 с;
```

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА
РАБОТЫ РЕАКТОРА

Временная зависимость параметров реактора:

1-я зона:

| время, с | расход, отн. ед. | мощность отн. ед. | т е м п е р а т у р а, К т/н | топлива | макс.топл | введен. реакт,$ | темпер вх., К | темпер вых.,К |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .000 | 1.0000 | 1.0000 | 625.2 | 933.14 | 1310.46 | .000 | 593.2 | 657.2 |
| 1.000 | 1.0000 | 1.0000 | 625.2 | 933.14 | 1310.46 | .000 | 593.2 | 657.2 |
| 2.000 | 1.0000 | 1.0000 | 625.2 | 933.14 | 1310.46 | .000 | 593.2 | 657.2 |
| 3.000 | 1.0000 | 1.0000 | 625.2 | 933.14 | 1310.46 | .000 | 593.2 | 657.2 |
| 4.000 | 1.0000 | 1.0000 | 625.2 | 933.14 | 1310.46 | .000 | 593.2 | 657.2 |

Рис. 2. Файл результатов ПК FRISS-1D: режим TOP WS

В данной работе было проведено моделирование переходных процессов типа TOP WS и LOF WS. Перед началом моделирования была проведена проверка корректности модели реакторной установки на примере элементарной задачи с мгновенным вводом положительной реактивности величиной 0.3 $. Переходный процесс плавный, без

http://sntbul.bmstu.ru/doc/605310.html

перерегулирования, мощность постепенно стабилизируется на новом стационарном уровне. Полученный вид переходного процесса согласуется с ранее полученными данными [1]. Это позволяет говорить о корректности составленной расчётной модели. Были заданы ограничения по температуре теплоносителя, температуре топлива на оси твэла и отношению мощности в новом стационарном состоянии к номинальной мощности. Ограничения по температуре теплоносителя обусловлены недопущением вскипания, поэтому температура теплоносителя должна быть ниже 2027 $^{o}$C. Температура топлива не должна приводить к повреждениям топливной матрицы, поэтому она не превышает 2300 $^{o}$C в переходном режиме и 1800 $^{o}$C в стационарном состоянии. Отношение новой мощности к номинальной не более 1.2, что обусловлено ядерной безопасностью.

Аварийный режим TOP WS может реализоваться при следующих исходных событиях:

1) Несанкционированный ввод положительной реактивности вследствие перемещения органа регулирования
2) Падение свежей ТВС в активную зону при перегрузке. Последнее, впрочем, исключено детерменистически [4].

Рассматривался ввод положительной реактивности величиной 0.3 $ за 10 секунд, начиная с 10-й секунды времени моделирования. Вид переходных процессов приведён на рис. 3-5.

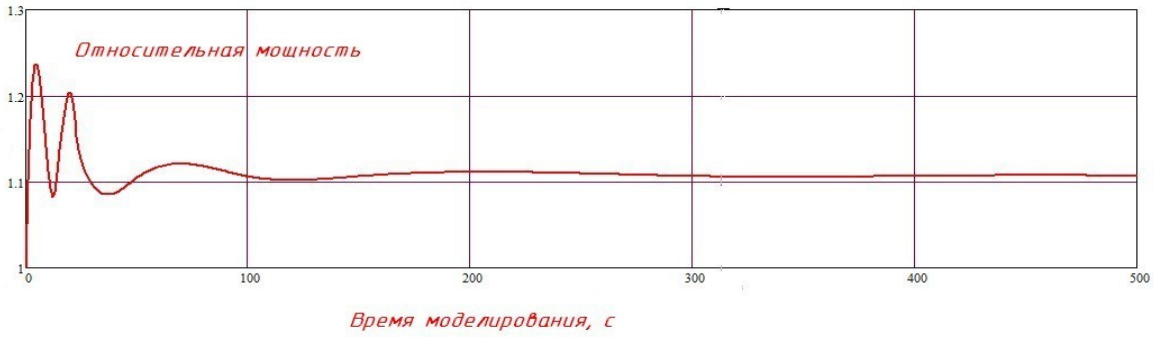


Рис. 3. График изменения относительной мощности: на примере центральной зоны с обогащением по $^{235}$U 18%

Легко видеть, что после непродолжительных колебаний мощности, внутренние обратные связи переводят реактор в новое стационарное состояние.

Рис. 4. Средняя температура теплоносителя: на примере центральной зоны с обогащением по $^{235}U$ 18%

По графику на рис. 4 также можно видеть, что неограниченного роста температуры теплоносителя нет, и имеется значительный запас до вскипания.

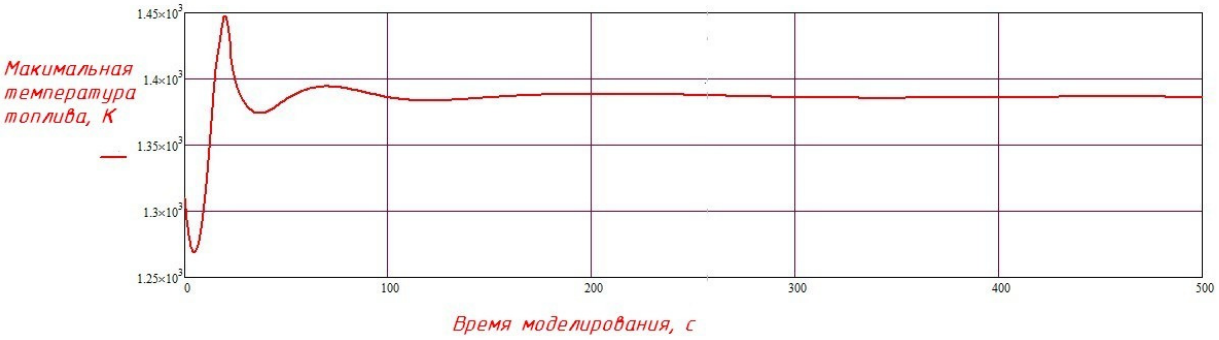


Рис. 5. Максимальная температура топлива в центре твэла на примере центральной зоны с обогащением по $^{235}U$ 18%

Максимальная температура топлива не превышает предельно допустимую. Следует отметить, что при использовании нитридного топлива, вместо диоксидного, температура топлива была бы ещё ниже по причине более высокой теплопроводности нитридного топлива. В настоящем же примере рассматривалась активная зона с диоксидным топливом с теплопроводностью 3.2 Вт/м*К при температуре 800-1000 $^{o}$C.

В радиальных зонах с другим обогащением качественный вид переходных процессов останется таким же.

В результате анализа данного аварийного режима можно сказать, что при несанкционированном перемещении регулирующего органа (а именно это и было описано: внесено не более 0.3 $ со скоростью не более 0.07 $/с согласно ПБЯ), внутренние обратные связи обеспечивают самозащищённость реакторной установки без вмешательства оператора или системы автоматического управления. В данном случае,

главным образом, снижение температуры топлива и мощности происходит за счёт допплеровского эффекта.

Режим LOF WS может быть реализован при следующих исходных событиях:

1) Обесточивание привода ГЦН
2) Заклинивание ротора ГЦН. Данный вариант не рассматривался, поскольку ПК FRISS-1D не позволяет описать несколько ГЦН, а модель одного ГЦН с нулевым выбегом даёт нефизичный результат.

Большое значение имеют следующие конструктивные особенности: время выбега насоса – 100 С, высота контура естественной циркуляции (расстояние между геометрическими центрами активной зоны и теплообменника) 2.5 м. При анализе переходных процессов оценивались температуры теплоносителя и топлива, а также, доля тепловой мощности, отводимая естественной циркуляцией. Графики переходных процессов представлены на рис. 6-8.

Рис. 6. График относительного расхода ГЦН: на примере центральной зоны с обогащением по $^{235}$U 18%

Через 100 секунд после обесточивания привода ГЦН ротор полностью остановился и произошёл переход к теплоотводу в режиме естественной циркуляции.

Рис. 6. График средней температуры теплоносителя: на примере центральной зоны с обогащением по $^{235}$U 18%

Наблюдается значительный рост температуры теплоносителя, что объясняется сильным снижением расхода.

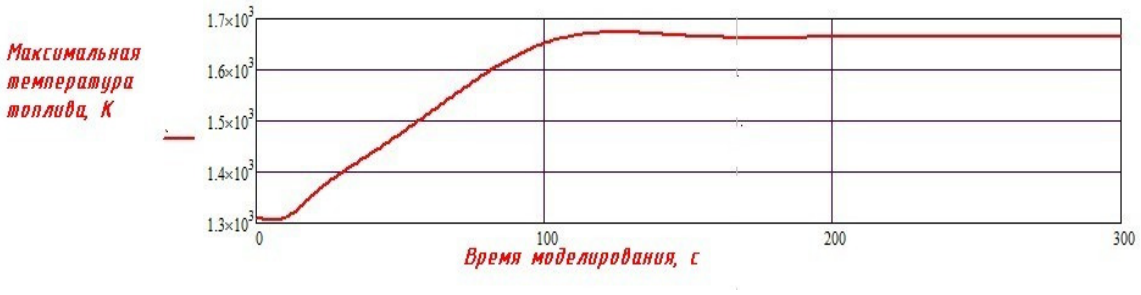


Рис. 6. График максимальной температуры топлива на оси твэла: на примере центральной зоны с обогащением по $^{235}U$ 18%

Температура топлива на оси твэла не превышает предельно допустимую. Как и в предыдущем случае, при использовании нитридного топлива, температура была бы ниже. Видно, что в режиме установившейся естественной циркуляции отводится до 7% номинальной тепловой мощности. Во 2-ой и 3-ей зонах эта величина составит 9% и 11% соответственно. Качественный вид графиков температур не изменится.

То есть в данном аварийном режиме функционалы безопасности не нарушаются без вмешательства оператора или САУ.

Исследуя изменения температур свинцово-висмутового теплоносителя, нельзя не сказать о пустотном эффекте реактивности (ПЭР). Пустотный эффект реактивности может возникнуть при снижении плотности теплоносителя из-за увеличения его температуры или закипания, при потере теплоносителя вследствие течи или при попадании пароводяных пузырей из теплообменника при повреждении поверхности теплообмена. Знак и величина коэффициента ПЭР были оценены с помощью программного комплекса WIMS/D-4. ПЭР имеет положительный знак, и при увеличении температуры теплоносителя на 500 $^{o}$C, изменение реактивности составит + 0.2% (+0.3 $). При потере теплоносителя или уменьшении его плотности значение имеют два конкурентных процесса: с одной стороны, увеличивается утечка нейтронов, что должно снижать реактивность, а с другой стороны, уменьшается количество поглотителя, что приводит к смещению спектра нейтронов в более высокоэнергетическую область, и это должно увеличивать реактивность. В сумме же, при снижении плотности теплоносителя по всему сечению активной зоны, реактивность увеличивается (в отличие от реакторов с водой под давлением).

В итоге проделанной работы получены результаты, подтверждающие большие возможности по самозащищённости реакторных установок со свинцово-висмутовым

http://sntbul.bmstu.ru/doc/605310.html

теплоносителем. В сочетании с прочими технико-экономическими показателями это может говорить о перспективности ядерных реакторов такого типа, как энергоисточников будущего.

## Список литературы


1. Кузьмин А. М., Окунев В. С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. М.: МИФИ, 1999. 250 с.
2. Окунев В. С., Лисицын И. С. Нейтронно-физический расчёт решётки ядерного реактора на основе газокинетической теории переноса. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 145 с.
3. Уолтер А, Рейнольдс А. Реакторы - размножители на быстрых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 624 с.
4. Кузьмин А. М., Окунев В. С. Моделирование и анализ аварийных ситуаций в реакторах на быстрых нейтронах М.: МИФИ, 1997. 64 с.
5. Кесслер Г. Ядерная энергетика М.: Энергоатомиздат, 1986. 264 с.
6. Усынин Г. Б., Кусмарцев Е. В. Реакторы на быстрых нейтронах М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.