

## Особенности моделирования заклинивания главного циркуляционного насоса и учет закризисного теплообмена при анализе проектных аварий для реакторов типа ВВЭР-1000

Проведен анализ возможности моделирования закризисного теплообмена для тепловыделяющей сборки реакторов типа ВВЭР-1000 с помощью компьютерного кода RELAP5/MOD3.2 путем внесения корректировок в опции моделирования тепловых структур. Предложенные корректировки позволяют привести значения критического теплового потока, полученные при расчете с использованием компьютерного кода RELAP5/MOD3.2, в соответствие с экспериментально установленной зависимостью. Расчетный анализ исходного события с мгновенным заклиниванием ГЦН показал адекватность данного подхода и его консервативность, что является необходимым при анализе проектных аварий. Приведены рекомендации по гидравлическому и тепловому моделированию горячего канала активной зоны с целью корректного определения закризисного теплообмена.

**Ключевые слова:** компьютерный код; закризисный теплообмен; тепловыделяющая сборка; тепловой поток; анализ проектных аварий.

**Ю. Ю. Воробйов, О. І. Жабін, І. А. Терещенко**

**Особливості моделювання заклинювання головного циркуляційного насоса та врахування закризового теплообміну при аналізі проектних аварій для реакторів типу ВВЕР-1000**

Проведено аналіз можливості моделювання закризового теплообміну для тепловидільної збірки реакторів типу ВВЕР-1000 за допомогою комп'ютерного коду RELAP5/MOD3.2 шляхом внесенням коригувань в опції моделювання теплових структур. Запропоновані коригування дають змогу привести значення критичного теплового потоку, які отримано розрахунком з використанням комп'ютерного коду RELAP5/MOD3.2, у відповідність до експериментально встановленої залежності. Розрахунковий аналіз вихідної події з миттєвим заклинюванням ГЦН показав адекватність даного підходу та його консервативність, що є необхідним для аналізу проектних аварій. Наведено рекомендації з гідралічного та теплового моделювання гарячого каналу активної зони з метою коректного визначення закризового теплообміну.

**Ключові слова:** комп'ютерний код; закризовий теплообмін; тепловидільна збірка; тепловий потік; аналіз проектних аварій.

© Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин, И. А. Терещенко, 2014

Заклинивание главного циркуляционного насоса (ГЦН) приводит к мгновенному останову вращения ротора насоса, вследствие чего происходит резкое снижение расхода теплоносителя через активную зону. В результате внезапного уменьшения расхода теплоносителя через реактор при высоких энерговыделениях активной зоны (при работе реактора на номинальном уровне мощности) возникает дисбаланс отвода тепла от первого контура и его генерирования. Соответственно, моделирование данного процесса должно учитывать возможность возникновения кризиса в горячем подканале активной зоны и закризисного теплообмена. В данной работе исследуются теплогидравлические аспекты моделирования заклинивания при анализе проектных аварий (АПА) для реакторных установок типа ВВЭР-1000 с использованием расчетного кода RELAP5/MOD3.2. Приводятся рекомендации по моделированию горячего канала активной зоны с целью корректного определения закризисного теплообмена.

**Особенность моделирования заклинивания ГЦН для АПА.** Анализ результатов, полученных в рамках АПА, например для энергоблока № 3 Ривненской АЭС, указывает на упрощенный подход к моделированию горячего канала [1]. Как правило, в расчетной модели для кода RELAP5/MOD3.2 тепловыделяющая сборка (ТВС) моделируется вертикальным гидравлическим каналом, обогреваемым одним тепловыделяющим элементом (ТВЭЛ) с максимальным энерговыделением («горячий» ТВЭЛ) и ТВЭлами со средним энерговыделением. Применение одного гидравлического канала для «горячих» и «средних» ТВЭлов приводит к недооценке локального подогрева теплоносителя около «горячих» ТВЭлов. В совокупности с особенностями моделирования в расчетном коде RELAP5/MOD3.2 это приводит к получению заниженных оценок максимальной температуры оболочек ТВЭлов при заклинивании ГЦН. Для сравнения, максимальная температура оболочек ТВЭлов, полученная для энергоблока № 3 РАЭС при традиционном подходе к моделированию ТВС, составила 361,6 °С (рис. 1). При этом проектный расчет, проведенный ОКБ «Гидропресс» с целью обоснования безопасной эксплуатации реакторной установки В-320 с активной зоной с тепловыделяющими сборками альтернативными, со специально выделенным подканалом в области «горячих» ТВЭла дает существенно более высокое значение максимальной температуры оболочки ТВЭла — 591 °С (рис. 2).

Анализ модели реакторной установки для АПА энергоблока № 3 РАЭС [1] показал, что в ней применяется оптимистичная корреляция по критическому тепловому потоку, обусловленная использованием опций влияния дистанционирующих решеток в тепловых структурах активной зоны [3]. Это происходит путем учета коэффициента влияния дистанционирующей решетки  $k_3$  (grid spacer factor):

$$k_3 = 1 + A \cdot \exp(-B \cdot L_{sp}/D_h), \quad (1)$$

где  $A = 1,5 (K_{loss})^{0,5} \cdot (G \cdot 0,001)^{0,2}$ ;  $B = 0,1$ ;  $L_{sp}$  — расстояние от дистанционирующей решетки;  $K_{loss}$  — коэффициент потерь давления сетки;  $D_h$  — гидравлический диаметр.

Учет коэффициента  $k_3$ , в соответствии с рекомендациями к расчетному коду [3], приводит к нералистичному завышению критического теплового потока.

Версия расчетного кода RELAP5/MOD3.2 не позволяет произвольно менять корреляции по критическому тепловому потоку. В ней используются корреляции для трубок,

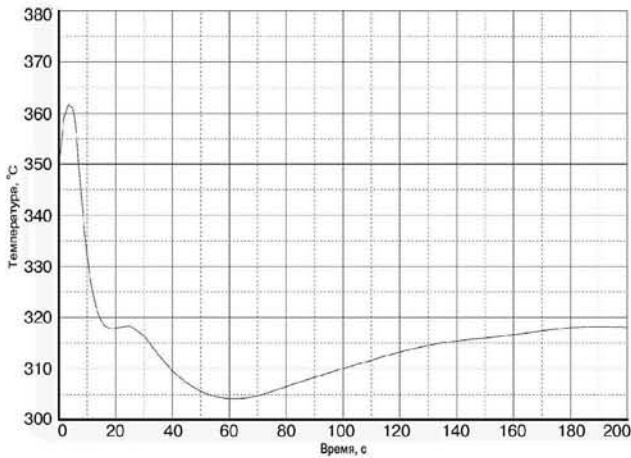


Рис. 1. Максимальная температура оболочки твэла, АПА для энергоблока № 3 Ривненской АЭС [1]

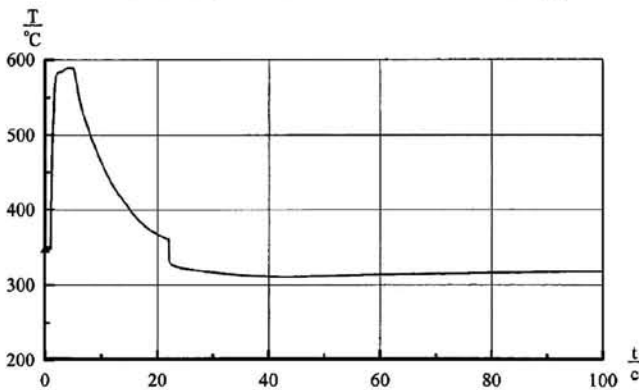


Рис. 2. Максимальная температура оболочки твэла, ОКБ «Гидропресс» [2]

которые в случае их применения для пучка твэлов корректируются при помощи коэффициента Мак-Адамса

$$C = 0,023 \cdot \left( \frac{P_1 \cdot P_2}{D^2} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — расстояние между трубками в пучке;  $D$  — диаметр трубки.

Если пучок трубок имеет коридорное либо шахматное расположение с одинаковым расстоянием между трубками  $P$ , то коэффициент Мак-Адамса

$$C = 0,023 \cdot \frac{P}{D}. \quad (3)$$

Однако для приближения к реальным значениям для ТВС ВВЭР-1000 существует возможность корректировки начальных значений критического теплового потока изменением влияния дистанционирующих решеток (коэффициент  $k_3$ ), варьируя их гидравлическое сопротивление  $K_{loss}$  и расстояние  $L_{sp}$ . При этом критерием корректности выбранных настроечных значений будет являться совмещение значений критического теплового потока, полученных с использованием корреляции ОКБ «Гидропресс», и корреляции, заложенной в расчетном коде. Поскольку

данное совмещение возможно только в начальный момент времени, то в ходе проведения расчетного анализа совпадение величин не гарантируется, хотя, как показывают результаты расчетов, их поведение остается достаточно близким.

Как показал проведенный анализ, принятые предположения позволяют выполнить оценку температуры оболочек твэлов при переходе теплообмена в закризисную область при заклинивании ГЦН.

**Корреляция критического теплового потока ОКБ «Гидропресс».** Для расчета критического теплового потока целесообразно применять формулу ОКБ «Гидропресс» для равномерного аксиального распределения тепловыделения, которая имеет следующий вид [4]:

$$q_{cr} = 0,795 \cdot (1 - x)^{-0,5 + 0,125 \cdot p} \times G^{-0,127 + 0,331(1 - x)} \cdot (1 - 0,0185 \cdot p), \quad (4)$$

где  $q_{cr}$  — критический тепловой поток, МВт/м<sup>2</sup>;  $x$  — относительная энтальпия (равновесное массовое паросодержание) в месте кризиса теплоотдачи;  $G$  — массовая скорость теплоносителя, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $p$  — давление, МПа.

Для возможности учета влияния на критические тепловые нагрузки аксиальной неравномерности тепловыделения, значения  $q_{cr}$  (4) умножаются на фактор формы аксиального профиля (форм-фактор)

$$F = \left[ \frac{\int_{z-0,2}^z q(z') \cdot dz'}{0,72 \cdot q(z)} \right]^n, \quad (5)$$

где  $z$  — продольная координата, м;  $n$  — показатель степени, для которого в соответствии с [4] рекомендовано выражение

$$n = 3,79 - 19,61 \cdot \frac{p}{p_{cr}} + 17,86 \cdot \left( \frac{p}{p_{cr}} \right)^2; \quad (6)$$

$p_{cr} = 22,115$  МПа — критическое давление.

В форм-факторе (5) для возможности наступления кризиса теплоотдачи в определенной аксиальной координате учитывается влияние профиля тепловыделения на предшествующем участке длиной 0,72 м, причем все точки профиля (и в начале, и в конце этого участка) влияют одинаково (не учитывается ослабление влияния по мере удаления точки профиля от рассматриваемой аксиальной координаты). Нефизичность такого допущения сочетается с очень низкой среднеквадратической ошибкой — 6,9 %. Она описывается с помощью данных по кризису теплоотдачи для пучков с учетом аксиальной неравномерности тепловыделения, которые имелись на момент получения выражений (5) и (6). В [5] для  $n$  рекомендовано значение «-1», с которым среднеквадратическая ошибка формулы (4) для расширенного, по сравнению с [4], набора экспериментальных данных получена среднеквадратическая ошибка 13 %.

В модели используется форм-фактор вида (5) с показателем степени  $n = -1$ , что дает среднеквадратическую ошибку около 13 %. Запас до кризиса теплообмена вычисляется по нижней границе критического теплового потока с учетом отклонения  $2\sigma = 26$  %, что составляет 95 % достоверной вероятности.

**Расчетное моделирование заклинивания ГЦН с учетом настройки критического теплового потока и моделирования горячего канала.** Для моделирования заклинивания ГЦН была использована расчетная модель [6], которая адаптировалась с учетом консервативных предположений, применяемых в АПА. При этом брались следующие предположения:

при заклинивании скорость вращения ГЦН-2 снижается до нуля за время  $t = 0,1$  с;

не учитываются действия оперативного персонала;

постулируется потеря электроснабжения собственных нужд в начальный момент времени;

задержка срабатывания сигнала аварийной защиты (АЗ) от начала исходного события равна 1,8 с (время начала движения органов СУЗ; 1,5 с — время формирования сигнала, 0,3 с — время передачи сигнала по цепям).

Моделирование корреляции по критическому потоку ОКБ «Гидропресс» проведено для горячих каналов № 1 и № 2 (элементы 46, 47 расчетной модели [6]), исключены перетоки теплоносителя в соседние элементы активной зоны (каналы «изолированы») (рис. 3).

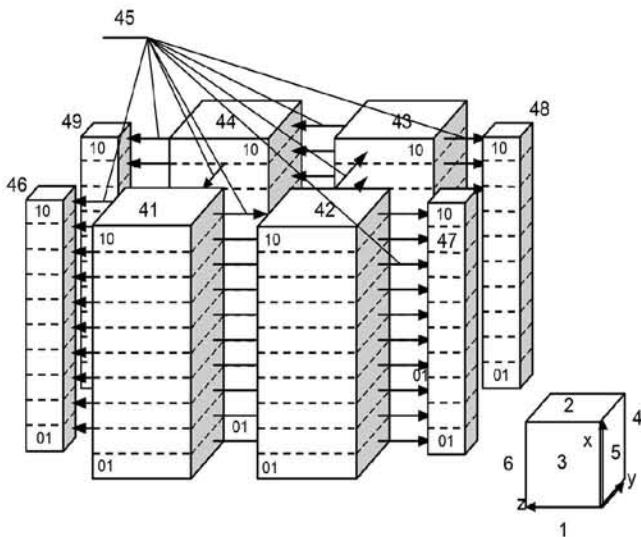


Рис. 3. Пространственное расположение элементов модели активной зоны

Поскольку рассматривается влияние на пиковое значение температуры сразу после заклинивания ГЦН, расчетный анализ ограничен временем 50 с.

Энерговыведение в горячем канале № 1 изменено с учетом формирования условий локального горячего подканала вокруг «горячего» твэла для элемента 46. При этом, на основании [2], коэффициент неравномерности энерговыведения канала составил  $K_q = 1,5 \cdot 1,16 = 1,74$ . Для канала № 2 энерговыведение оставлено без изменений ( $K_q = 1,35$ ), что соответствует энерговыведению горячей ТВС.

В опциях тепловых структур каналов № 1 и № 2 используемые корреляции критического теплового потока приведены в соответствие с корреляцией ОКБ «Гидропресс» с учетом форм-фактора симметричного поля с максимальным коэффициентом неравномерности по высоте  $K_z = 1,49$  (проведена корректировка опций учета дистанционирующих решеток).

Результаты расчета начального состояния модели таковы:

Параметр	Расчетное значение
Тепловая мощность реактора, МВт	3120 (104 %)
Максимальная мощность ТВС, МВт	27,14
Максимальный линейный тепловой поток, Вт/см	448
Давление теплоносителя на выходе из реактора, кгс/см <sup>2</sup>	159,5
Расход теплоносителя через реактор, м <sup>3</sup> /ч	80000
Расход через горячий канал, м <sup>3</sup> /ч	465
Уровень теплоносителя в компенсаторе давления (КД), м	8,68
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	290,1
Температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	323,0
Давление в парогенераторах, кгс/см <sup>2</sup>	63,1-63,2

Согласно результатам расчёта, теплообмен около «горячего» твэла (при  $K_q = 1,74$ ) временно переходит в закризисную область. При этом максимальная температура оболочек твэлов составила 621,3 °С (рис. 4), что коррелирует с результатами, приведенными в [2], — 591 °С. Как видно из рис. 4, при моделировании горячего канала № 2 с энерговыведениями, соответствующими горячей ТВС ( $K_q = 1,35$ ), кризис теплоотдачи не возникает и температура остается низкой.

Полученное максимальное значение температуры оболочек твэлов не превышает установленный в [7] проектный предел повреждения твэлов, равный 1200 °С. Следовательно, целостность оболочки ядерного топлива не нарушается.

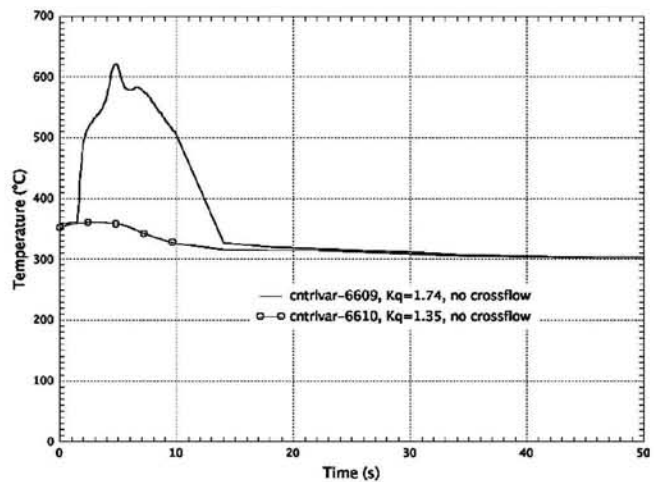


Рис. 4. Максимальная температура оболочек твэлов горячих каналов № 1 и № 2 активной зоны

На рис. 5 представлено изменение значений теплового потока с поверхности твэлов, критического теплового потока, рассчитанного с помощью кода RELAP, и критического теплового потока, рассчитанного с учетом корреляции ОКБ «Гидропресс» (канал № 1, уровень 08), во времени. Момент кризиса теплообмена происходит в точке пересечения теплового потока с поверхности твэлов и критического теплового потока, рассчитанного с помощью RELAP5/MOD3.2 (приблизительно на 1,6 с процесса).

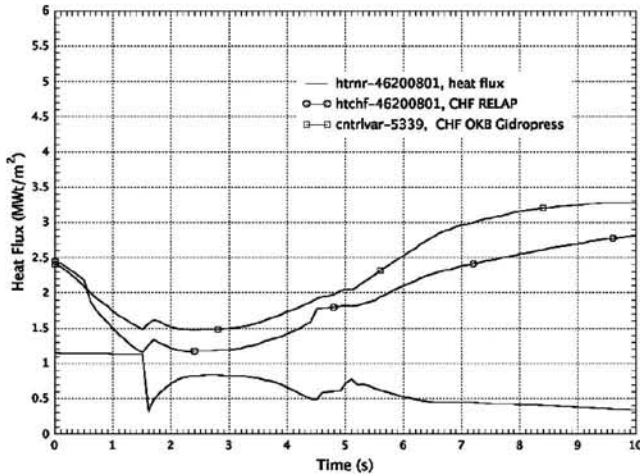


Рис. 5. Изменение значений теплового потока, критического теплового потока (рассчитанного с помощью кода RELAP), критического теплового потока с учетом корреляции ОКБ «Гидропресс» (канал № 1, уровень 08) во времени

Видно, что начальное совпадение критических тепловых потоков достаточно хорошее (обусловлено настройкой), но затем ухудшается вследствие различий в алгоритмах расчета. Тем не менее, вариант, использованный в модели RELAP5/MOD3.2, более консервативен для данной аварии, поскольку предполагает более быстрое наступление кризиса теплообмена.

**Альтернативные подходы к моделированию закризисного теплообмена с использованием компьютерного кода RELAP.** Существует много способов моделирования закризисного теплообмена с помощью компьютерного кода RELAP. Один из них — моделирование, например, горячего гидравлического подканала всего с одним твэлом. В этом случае целесообразна корректировка опции тепловых структур указанным выше способом. Расчет при этом приведет к аналогичным результатам.

Другим возможным вариантом является использование версии кода RELAP, который учитывает корреляции по теплообмену, характерные для топлива реакторов ВВЭР-1000. Например, в версии RELAP5/MOD3.3 имеется возможность использования уточненной корреляции по критическому тепловому потоку PG-CHF [7], которая обобщает данные для пучков стержней, характерных для реакторов ВВЭР. С использованием расчетного кода RELAP5/MOD3.3 для аналогичной модели расчетные значения максимальной температуры оболочек твэлов составляют 680 °С.

Приведенные в статье способы моделирования закризисного теплообмена в горячем канале позволяют получить более высокие значения максимальной температуры оболочек твэлов по сравнению с расчетами канальных кодов, которые используются проектантом ядерного топлива. Причиной данного отличия является невозможность моделирования в коде RELAP5/MOD3.2 турбулентного массообмена между соседними ячейками твэлов, который реализуется именно в канальных расчетных кодах. Тем не менее, для оценок АПА данный подход достаточно эффективен и приемлем.

## Выводы

Особенности моделирования закризисного теплообмена оказывают значительное влияние на значение запаса до максимального проектного предела по температуре оболочек твэлов. Наиболее представительной аварией, в которой реализуется данная ситуация, является мгновенное заклинивание ГЦН. Используемый ранее подход к моделированию аварии с использованием расчетного кода RELAP5/MOD3.2 дает заниженное значение максимальной температуры оболочек твэлов по сравнению с проектным расчетом, что свидетельствует о необходимости доработки расчетной модели.

В данной работе предложены способы корректировки расчета критического теплового потока для ВВЭР-1000 с использованием расчетного кода RELAP5/MOD3.2 путем настройки опций дистанционирующих решеток в тепловых структурах активной зоны. Данный способ позволяет приблизиться к экспериментально определенным корреляциям ОКБ «Гидропресс» для топлива ВВЭР-1000. Полученные расчетные значения максимальной температуры оболочек твэлов показали удовлетворительное соответствие с проектным расчетом. Предложены и другие варианты гидравлического моделирования для учета явления закризисного теплообмена в ТВС ВВЭР-1000.

## Список использованной литературы

1. Ривненская АЭС. Энергоблок № 3. Отчет по анализу безопасности. — Гл. 4 : Анализ проектных аварий. Ч. 1. Результаты анализа проектных аварий. Кн. 2. Анализ исходных событий. Ч. 1. 307-331/ ГП НАЭК «Энергоатом». — К., 2014. — 434 с. — Инв. № 22.3.133.ОБ.01.02.01.
2. Реакторная установка В-320. Техническое описание и информация по безопасности. — Гл. 31: Обоснование безопасной эксплуатации реакторной установки В-320 с активной зоной с тепловыделяющими сборками альтернативными на энергоблоках АЭС Украины и Болгарии (с извещением об изменении № 320.3590) / ОКБ «Гидропресс». — М., 2003. — 260 с. — Инв. № 320.00.00.00.000.Д61.
3. RELAP5/MOD3 Code manual. — Vol. IV: Models and correlations. — Idaho, 1995. — 430p. — NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. (Formerly EGG-2596).
4. Исследование влияния профиля тепловыделения по длине на кризис теплообмена в пучках стержней / В. И. Астахов, Ю. А. Безруков, С. А. Логвинов, В. Г. Брантов // Тр. семинара «Теплофизика-78». — Т. 2. — Budapest, 1978. — С. 589—600.
5. Исследование кризиса теплообмена применительно к реальным аксиальным профилям тепловыделения / Ю. А. Безруков, В. И. Астахов, А. М. Трушин, А. С. Богданов, С. А. Логвинов, А. В. Селезнев // Тр. третьей науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 26-30 мая 2003 г.
6. Воробьев Ю. Ю. Теплогидравлическая модель реактора ВВЭР-1000 для получения граничных условий при оценке сопротивления хрупкому разрушению с использованием компьютерного кода RELAP5/MOD3.2 / Ю. Ю. Воробьев, О. Р. Кочарьянц // Ядерная та радіаційна безпека. — 2011. — № 2 (50). — С. 13—19.
7. НП 306.2.145-2008. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением. — К. : Держ. комітет ядерного регулювання України, 2008. — 28 с.
8. RELAP5 MOD3.3 Code Manual. — Vol. IV: Models and Correlations. — Idaho, 2001. — (NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol. IV).

## References

1. Rivne NPP. Unit 3. Safety Analysis Report. Chapter 4. Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Design-Basis Accident Analysis Results. Book 2. Initial Event Analysis. Part 1. 307-331/ NNEGC "Energoatom" [Rivnenskaia AES. Energoblok No. 3. Otchet po analizu bezopasnosti. Glava 4. Analiz proektnykh avarii. Chast 1. Resultaty analiza proektnykh avarii. Kniga 2. Analiz iskhodnykh sobytii. Chast 1], Kyiv, 2014, 434 p., Inv. No. 22.3.133.0B.01.02.01. (Rus).
2. Reactor V-320. Technical Description and Information on Safety. Chapter 31: Justification of Safe Operation of V-320 Reactor with Core with Alternative Fuel Assemblies for NPPs of Ukraine and Bulgaria (with Notice of Change No. 320.3590) [Reaktornaia ustanovka V-320. Tekhnicheskoe opisanie i informatsiia po bezopasnosti. Glava 31: Obosnovaniie bezopasnoi ekspluatatsii reaktornoï ustanovki V-320 s aktivnoi zonoï s teplovydeliaushchimi sborkami alternativnymi na energoblokakh AES Ukrainy i Bolgarii (s izveshcheniem ob izmenenii No. 320.3590), OKB "Gidropress", Moscow, 2003, 260 p., Inv. No. 320.00.00.00.000.Д61. (Rus).
3. RELAP5/MOD3 Code Manual, Vol. IV: Models and Correlations, Idaho, 1995, 430 p., NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. (Formerly EGG-2596).
4. Astakhov V.I., Bezrukov Yu. A., Logvinov S. A., Brantov V. G. (1978), Study of the Heat Release Profile Impact along the Length on the Critical Heat Transfer in Rod Bundles. [Issledovaniie vliianiia profilia teplovydileniia po dline na krizis teploobmena v puchkakh sterzhnei], Workshop Proceedings "Thermophysics-78", Vol. II, Budapest, pp. 589–600. (Rus).
5. Bezrukov Yu. A., Astakhov V. I., Trushun A. M., Bogdanov A. S., Logvinov S. A., Seleznev A. V. (2003), Study of Critical Heat Transfer in Relation to the Actual Axial Profiles of Heat Release [Issledovaniie krizisa teploobmena primenitelno k realnym aksialnym profiliam teplovydileniia], Proceedings of the third Scientific and Technical Conference "Securing NPPs with VVER", Podolsk, May 26-30, 2003. (Rus).
6. Vorobyov Yu. Yu., Kocharyants O. R. (2011), "WVER-1000 Thermal/Hydraulic Model for Determining Boundary Conditions for Fracture Toughness Assessment with Use of RELAP5/MOD3.2 Computer Code" [Teplogidravlicheskaia model reaktora VVER-1000 dlia polucheniia granichnykh uslovii pri otsenke soprotivleniia khrupkomu razrusheniiu s ispolzovaniem kompiuternogo koda RELAP5/MOD3.2], Yaderna ta radiatsiina bezpeka, No. 2 (50), pp. 13–19. (Rus).
7. NP 306.2.145-2008. Nuclear Safety Rules for Nuclear Power Plants with pressurized water reactor [Pravyla yadernoi bezpeky reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii z reaktoramy z vodoiu pid tyskom], Kyiv, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2008, 28 p. (Ukr).
8. RELAP5 MOD3.3 Code Manual, Vol. IV: Models and Correlations, Idaho, 2001, (NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol IV).

Получено 20.10.2014.

## Шановні передплатники!

Передплатити журнал «Ядерна та радіаційна безпека» можна як по замовленнях зацікавлених організацій на підставі надісланого редакцією рахунку-фактури, так і в поштових відділеннях за «Каталогом видань України» та на сайті УДППЗ «Укрпошта» [www.ukgroshta.ua](http://www.ukgroshta.ua), а також скориставшись послугою «Передплата ON-LINE» на корпоративному сайті ДП «Преса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua).

Передплатний індекс — 37781.

Більш детальну інформацію можна отримати за телефоном (044) 422-49-72 або електронною адресою: [pa\\_bilokrinicka@sstc.kiev.ua](mailto:pa_bilokrinicka@sstc.kiev.ua).

Сподіваємося бачити Вас і Ваших колег серед постійних читачів і авторів журналу.