

нозные расчеты. Такая схема может быть названа контролируемым старением кладки реактора, если за процессом осуществляется контроль и критерии предельного состояния выбраны консервативно.

Заключение. Анализ показал, что препятствий для дальнейшей безопасной эксплуатации кладок с точки зрения прочности графита нет. Были получены прогнозные оценки общего ресурса графитовых кладок по прочностному критерию. Для энергоблоков первых очередей Ленинградской станции он составил 50—52 календарных года, для 1-го энергоблока Курской станции — около 48 календарных лет при работе реакторов на номинальной мощности. Прогноз будет уточняться по мере получения новых данных, но уже сейчас можно сказать, что по критерию прочности планируемое увеличение общего срока службы до 45 лет будет обеспечено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика оценки остаточного ресурса графитовой кладки реактора РБМК-1000. РД ЭО 0362—2005.
2. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
3. Платонов П.А., Штромбах Я.И., Карпунин В.И. и др. Действие излучения на графит высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. — Атомно-водородная энергетика и технология, 1984, вып. 6, с. 22—26.
4. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых реакторов канального типа. НГР-01—90.
5. Platonov P.A. et al. Radiation damage and life-time evaluation of RBMK graphite stack. — In: Specialists Meeting on Graphite Moderator Lifecycle Behaviour. Bath (United Kingdom), 24—27 Sept. 1995. IAEA-TECDOC-901. Vienna: IAEA, 1996, p. 79—90.
6. Shtrombakh Ya.I., Gurovich B.A., Platonov P.A., Alekseev V.M. Radiation damage of graphite and carbon-graphite materials. — J. Nucl. Mater., 1995, v. 225, p. 273—301.
7. Платонов П.А., Чугунов О.К., Новобратская И.Ф. и др. Механизм старения графита под облучением. Критический флюенс нейтронного облучения. — Прикладная физика и математика, 2014, № 3, с. 8—16.
8. Платонов П.А., Кулешов Д.А., Новобратская И.Ф., Дудинов В.Ф. Радиационная деградация графита реакторов типа РБМК. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 5, с. 105—117.
9. Кулешов Д.А., Новобратская И.Ф., Платонов П.А., Чугунов О.К. Влияние степени совершенства реакторного графита на эксплуатационные свойства. — Атомная энергия, 2015, т. 118, № 1, с. 19—23.
10. Платонов П.А., Чугунов О.К., Новобратская И.Ф. и др. Критерии деградации графита кладок реакторов РБМК. История исследований. — История науки и техники, 2013, № 8, с. 94—105.
11. Штромбах Я.И., Чугунов О.К. Исследование свойств графита, оценка технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов РУ РБМК, выполненных из графита. — В сб.: МНТК-2012 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М., Концерн «Росэнергоатом», 2012, с. 93—101.
12. Manevski V.N. et al. The calculations of the stress-strain state of graphite bricks of the uranium-graphite reactors and the prognosis of the destruction of the graphite stack RBMK-reactors. — In: Structural Mechanics in Reactor Technology: Transactions of the 12th Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology. Germany, 15—20 August 1993, v. F. Pressure Components, Design Technologies and Research for Regulatory Needs. Amsterdam: Elsevier, 1993, p. 121—127.
13. Программа РГБ.2. Программа расчета НДС и оценки времени до разрушения (появления продольных трещин) элементов активных зон уран-графитовых реакторов — графитовых блоков кладок, изготовленных на основе графитов ГР-280 и ГР-220, в условиях терморadiационного нагружения активных зон ядерных реакторов. Регистрационный номер паспорта программного средства № 245 от 18.12.2008.

УДК 621.039.531

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РБМК-1000

Тутнов А.А., Киселев А.С., Киселев А.С., Крутько Е.С.
(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Для моделирования формоизменения кладки РБМК-1000 при эксплуатации до останова реакторного блока на ремонт и в послеремонтный период необходимо создание моделей и развитие расчетных кодов для прогнозирования гарантированного времени работы до достижения критического прогиба колонн. Основной

механизм накопления прогибов обусловлен тем, что при увеличении накопленного флюенса нейтронов графит переходит от стадии усадки к набуханию, что приводит к появлению продольных трещин вследствие неравномерности распределения температуры и флюенса по объему кладки в целом и локальной неравномер-

ности по объему блоков. При последующем облучении треснувшие блоки раскрываются, что приводит к росту их габаритов, из-за которого соседние колонны получают дополнительный прогиб, накапливающийся по мере удаления от центра активной зоны к периферии.

Для моделирования деформирования кладки РБМК разработаны инженерная модель для экспресс-анализа деформированного состояния кладки в рассматриваемый период эксплуатации эффективности схем ремонта и скорости накопления прогиба графитовых колонн в послеремонтный период и трехмерная модель графитовой кладки для уточненного анализа перечисленных параметров.

Конечно-элементная модель кладки активной зоны РБМК для исследования ее формоизменения имеет три уровня [1]. Первый уровень — модель блока для изучения термомодеформационных процессов в блоках, напряженно-деформированного состояния с учетом изменяющейся геометрии и размера блоков, воздействия неравномерно распределенных по объему флюенса нейтронов и температуры, анизотропии физико-механических свойств графита, изменения физико-механических свойств графита в результате воздействия эксплуатационных факторов: температуры, облучения, радиационной ползучести, растрескивания. Основные соотношения конечно-элементного алгоритма и особенностей его применения для анализа элементов конструкций из графита приведены в [1] и руководящих документах эксплуатирующей организации, например, РД ЭО 1.1.2.05.0788—2009.

Второй уровень — состоящая из блоков разной высоты модель колонны, позволяющая моделировать взаимодействие торцевых поверхностей блоков, блоков и труб технологических каналов при значительном прогибе колонн, а также условия закрепления труб.

Третий уровень — модель кладки активной зоны РБМК из колонн, которая позволяет моделировать взаимодействие между ними при прогибе, превышающем исходные конструктивные зазоры. При этом возникающие в результате взаимодействия силовые факторы учитываются в моделях первого и второго уровней для уточненного анализа напряженно-деформированного состояния и моделирования растрескивания блоков.

Трехмерная модель кладки по сравнению с инженерной дает возможность дополнительно учитывать следующие процессы:

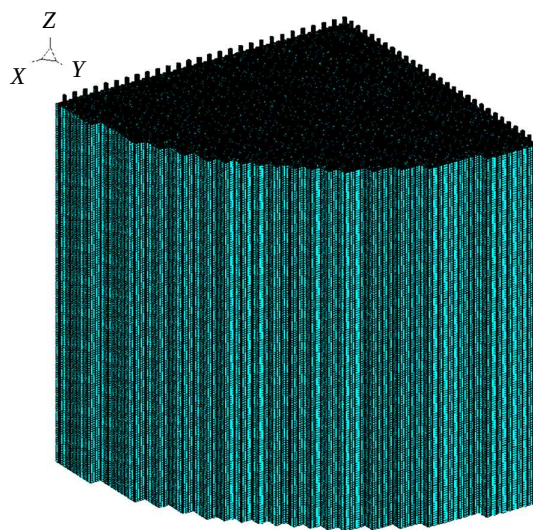
взаимодействие горизонтальных слоев, обусловленное сборкой колонн из блоков разной высоты;

контакт колонн, торцов блоков и труб технологических каналов с блоками в процессе деформирования формы поперечного сечения блоков при образовании продольных трещин;

неравномерное по высоте зоны распределение флюенса и температуры;

возможность образования зазоров между блоками при определенном относительном положении трещин в соседних по высоте слоях кладки. При этом максимальный прогиб может реализовываться не в слое блоков с максимальным флюенсом, а ближе к срединной по высоте части кладки. Учет образовавшихся на стадии эксплуатации зазоров позволяет снизить консерватизм расчетных оценок инженерной методики при моделировании ремонта кладки.

Модель включает 26 362 848 восьмиузловых конечных элементов и стержневых контактных конечных элементов, 33 526 048 узлов (рис. 1). Модели колонн содержат до 1760 узлов в зонах возможного контакта, что позволяет более точно моделировать их взаимодействие с соседними колоннами. Поскольку модель имеет более 100 млн степеней свободы, применение в расчетной методике традиционного алгоритма не позволяет получить результат за приемлемое время. Для решения подобных задач эффективным является применение суперэлементного алгоритма. В методе суперэлементов [2] расчетная схема и исходная конечно-элементная модель разбиваются на фрагменты (суперэлементы) нескольких уровней, причем описание конечного элемента и физические модели его



Р и с. 1. Детальная 3D-модель 1/4 части графитовой кладки РБМК

деформирования выполняются на самом нижнем уровне. Такое построение схемы позволяет независимо рассчитывать матрицы суперэлементов, представляющих в рассматриваемой модели отдельные колонны, что позволяет использовать эффективные параллельные алгоритмы на многопроцессорных системах. Любое изменение местных параметров, связанных, например, с образованием контактных зон и появлением трещин, не требует полного пересчета матриц для всей модели.

В связи с необходимостью решения многошаговых нелинейных задач для моделирования кинетики деформирования графитовой кладки активной зоны РБМК и размерности модели особое внимание уделено повышению эффективности расчетных алгоритмов за счет применения оптимальных схем и параллельных методов вычислений. В настоящее время разработаны две версии программы на основе комплекса UZOR 1.0 для установки на кластере и вычислительных системах, которые состоят из рабочих станций с многоядерными центральными процессорами и мощными графическими картами, объединенных локальной сетью [3]. Одновременное использование мощностей центральных процессоров и вычислительных ресурсов графических карт позволило в 10—15 раз сократить время решения задач.

Для повышения эффективности вычислительного ядра системы в программе UZOR в настоящее время реализовано трехуровневое распараллеливание алгоритма метода суперэлементов и конечных элементов:

1-й уровень — распределенные вычисления на рабочих станциях локальных вычислительных сетей;

2-й уровень — многопоточная обработка данных на отдельной рабочей станции с использованием нескольких процессоров и нескольких ядер каждого из процессоров;

3-й уровень — применение в математических расчетах графических процессоров.

Для реализации параллельного алгоритма первого уровня в UZOR 1.0 применяется технология клиент-сервер. Сервер — это управляющая программа, которая, не проводя вычислений, организует вычислительный процесс, обмен данными и синхронизацию между программами-клиентами, которые запускаются на компьютерах сети. Собственно алгоритмы решения физической задачи — расчета матриц

жесткости стержневого элемента, решения системы уравнений и определения вектора перемещений, расчета параметров напряженно-деформированного состояния осуществляются клиентскими приложениями. В настоящее время вычислительный комплекс включает 16 рабочих станций. В составе каждой рабочей станции 6-ядерный центральный процессор Core I7 3930 K, работающий на частоте 3,2 ГГц и выполняющий до 12 вычислительных потоков одновременно, 64 Гб оперативной памяти, два жестких диска емкостью 2 Тб, видеокарта последнего поколения NVIDIA GeForce GTX 780 с 3 Гб памяти.

Напряженно-деформированное состояние и формоизменение блоков активной зоны РБМК рассчитываются с учетом зависимости механических свойств графита от температуры и флюенса в соответствии с требованиями и методическими рекомендациями, содержащимися в документах эксплуатирующей организации, — Руководстве по расчету на прочность типовых узлов и деталей из графита реактора РБМК первого поколения. Основными характеристиками механических свойств материала блоков кладки при расчете напряженно-деформированного состояния являются нормальный модуль упругости (модуль Юнга) и модуль упругости при сдвиге, предел прочности на растяжение и сжатие с учетом анизотропии свойств продольного и поперечного направлений, коэффициенты Пуассона и термического расширения, характеристики радиационного формоизменения с учетом анизотропии свойств продольного и поперечного направлений, радиационная ползучесть.

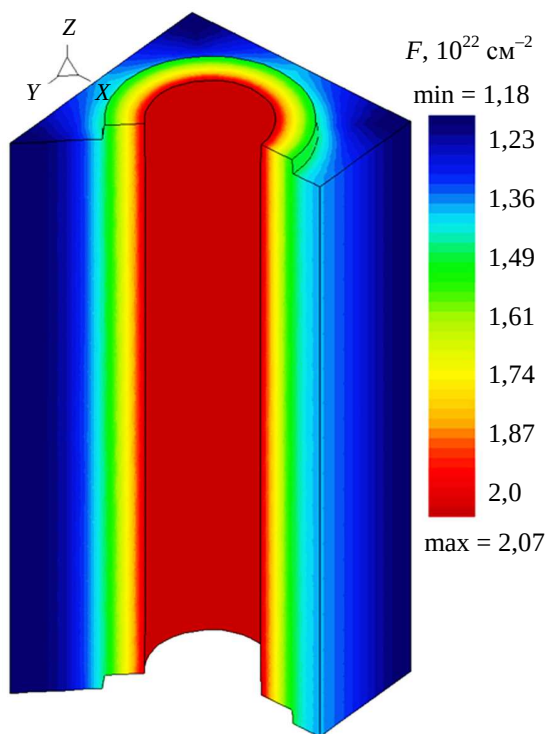
Распределение флюенса в объеме кладки имеет макро- и микроскопические составляющие неравномерности. Макроскопическая неравномерность распределения флюенса связана с разным взаимным расположением колонн в активной зоне и заключается в пространственном распределении флюенса внутри каждого блока. Флюенс оказывается максимальным на поверхности отверстия под трубу технологического канала и убывает к наружной поверхности. Распределение флюенса и температуры, а также средние флюенс нейтронов и температура задаются в качестве исходных данных для каждого блока. Распределение температурных полей и флюенса нейтронов по объему блока задаются на основании нейтронных и теплофизических

расчетов. Например, для реактора 1-го энергоблока Ленинградской АЭС после 37-летней эксплуатации средний по активной зоне флюенс нейтронов перед остановом на ремонт составил $1,24 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ при максимальном (т.е. среднем по графитовому блоку в максимально нагруженном блоке) $1,84 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Поскольку в детальной модели кладки РБМК моделируются все блоки, для каждого из них вводится информация о среднем по объему флюенсе и температуре с учетом высотного и азимутального распределения. На рис. 2 часть графитового блока не показана для наглядного представления распределения флюенса в сечениях, проходящих по короткой перемычке перпендикулярно грани и по диагонали.

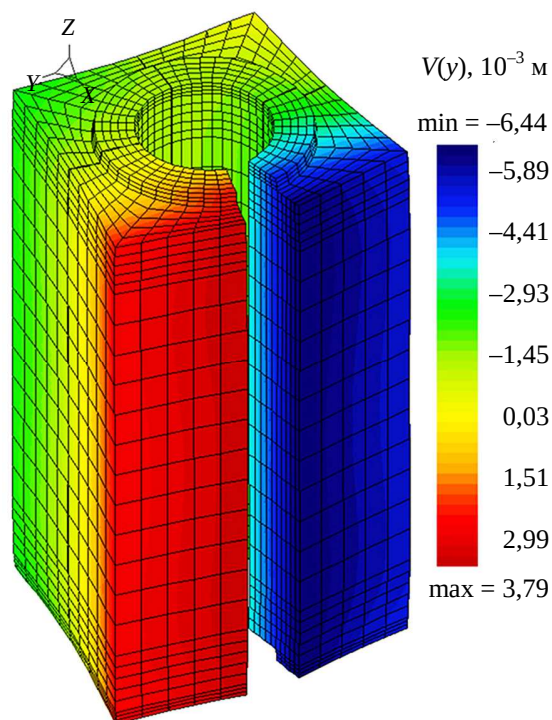
Состояние графитовой кладки активной зоны и ее формоизменение определяются характером деформирования блоков, из которых составлены колонны. Вследствие радиационного роста и усадки графита, неравномерности флюенса по объему графитового блока, градиентов температуры, анизотропии свойств графита в продольном и поперечном направлениях при увеличении времени эксплуатации существенно возрастает уровень напряжений, приводящий к образованию продольных трещин. После образования продольной трещины блок раскрывается, его габариты быстро увеличива-

ются даже при небольшом росте флюенса (рис. 3). В результате появления продольных трещин в большом числе блоков с наибольшим флюенсом и изменения их габаритов, которое при текущем состоянии кладки реактора может составлять 12—20 мм, исходные зазоры между колоннами уменьшаются. Соседние колонны вступают в контакт, испытывая прогиб в поперечном направлении, который увеличивается (накапливается из-за суммирования изменений габаритов блоков) по мере удаления от центра активной зоны к периферии. Торцевые участки графитовых блоков контактируют, если продольная ось технологического канала прямая. При изгибе колонны контактирующие торцевые поверхности блоков могут размыкаться, что требует введения в модель колонны контактных конечных элементов. Модель графитовой колонны содержит 56 184 узла, 168 552 степени свободы, 40 428 линейных объемных конечных элементов.

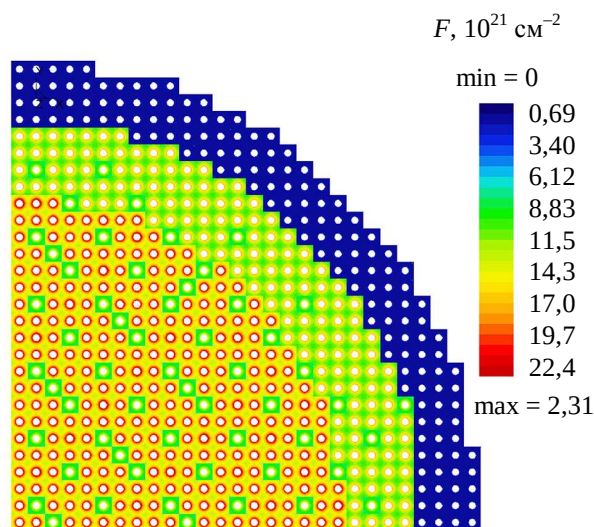
Детальная модель графитовой кладки РБМК-1000 позволяет прогнозировать прогиб колонн на разных стадиях эксплуатации. Распределение флюенса и температуры в графитовых колоннах имеет значительные локальные градиенты. На рис. 4 показано распределение флюенса в среднем по высоте сечении графитовой кладки.



Р и с. 2. Распределение флюенса по объему графитового блока РБМК-1000

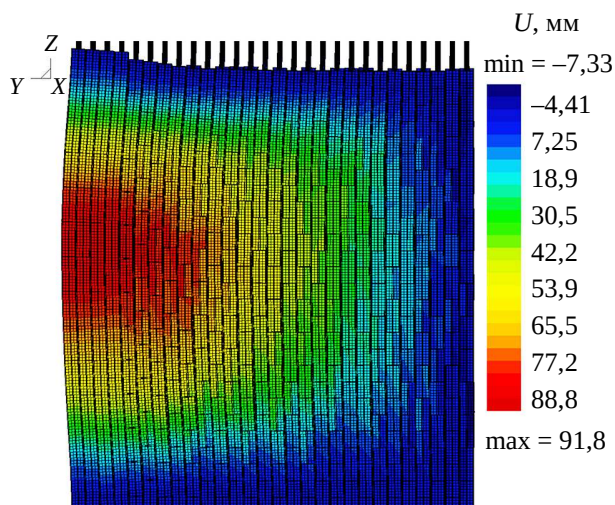


Р и с. 3. Деформированное состояние и распределение одного из компонентов перемещений по объему блока для варианта с высокими флюенсами нейтронов и температурой (появляется сквозная продольная трещина)

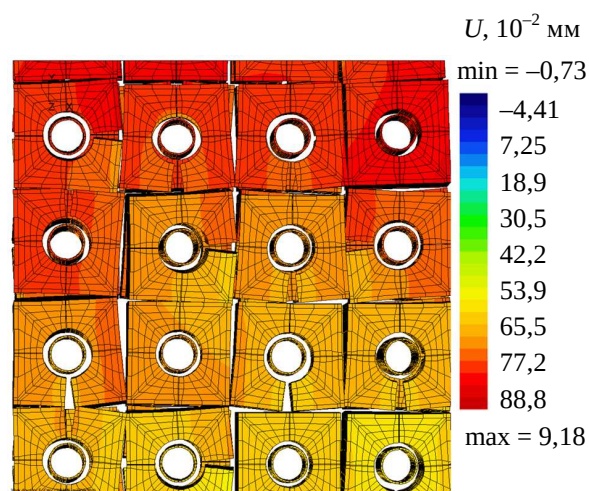


Р и с. 4. Распределение флюенса нейтронов в сечении модели графитовой кладки $Z = 5,5$ м

На рис. 5 показаны результаты моделирования кинетики деформирования графитовой кладки вследствие растрескивания графитовых блоков. Видно, что наряду с радиальным смещением колонн в средней по высоте кладки зоне отмечается неравномерное уменьшение высоты из-за усадки графита в осевом направлении. На периферии вертикальное смещение графитовых блоков значительно меньше, поскольку флюенс и температура оказываются значительно более низкими, чем на плато активной зоны. Можно также отметить, что и на плато активной зоны изменение высоты колонн различно, так как различен флюенс нейтронов на рабочие каналы, которые расположены относительно колонн с СУЗ по диагонали, контактирующих с ними по грани или окруженных другими рабочими каналами.



Р и с. 5. Распределение радиальных смещений модели графитовой кладки перед остановом блока на ремонт (холодное состояние)



Р и с. 6. Фрагмент графитовой кладки с раскрывшимися продольными трещинами в блоках, приводящими к искривлению колонн

Для наглядного представления характера деформирования кладки и образования трещин в отдельных графитовых блоках на рис. 6 показано деформированное состояние увеличенного фрагмента модели кладки РБМК 1-го энергоблока Ленинградской АЭС (масштаб смещений 3) перед остановом на ремонт, где показаны раскрывшиеся продольные трещины в графитовых блоках в соответствии с заданным случайным распределением их ориентации.

Согласно расчетным исследованиям максимальный прогиб колонн составляет 91,8 мм и реализуется на уровне по высоте активной зоны $Z = 4,6$ м, что близко к измеренному перед ремонтом 95,6 мм (см. таблицу).

Таким образом, разработанные модели и алгоритмы позволяют рассчитывать формоизменение графитовой кладки до и после ремонта за счет резки блоков с учетом проектных геометрии и размера, особенностей компоновки колонн и зоны в целом, воздействия неравномерных полей потока нейтронов и температуры по объему блоков, анизотропии, изменения физико-механических свойств графита в результате воздействия эксплуатационных факторов: температуры, облучения, радиационной ползучести, процессов образования и раскрытия продольных трещин в блоках, контактного взаимодействия соседних колонн.

Поскольку после ремонта графитовой кладки ни в одной колонне прогиб не превысил 50 мм, было подготовлено заключение о дополнительном сроке эксплуатации 1-го энергоблока Ленинградской АЭС в течение не менее 3 лет. Измеренный прогиб колонн через 1 и 2 года

Максимальный прогиб колонн активной зоны 1-го энергоблока Ленинградской АЭС (горячее состояние)

Время	Максимальный прогиб сразу после ремонта < 61,1 мм		Максимальный прогиб сразу после ремонта < 50 мм	
	80% мощности	100% мощности	80% мощности	100% мощности
Перед ремонтом	95,6	95,6	95,6	95,6
Через 1 год эксплуатации	73	75,8	63,1	65,1
Через 2 года эксплуатации	85,8	93,1	75,1	83,2
Через 3 года эксплуатации	99,6	116	91,7	105

эксплуатации на 100%-ной мощности оказался ниже усредненных прогнозных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
2. **Постнов В.А., Дмитриев С.П.** Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. Л.: Судостроение, 1979. 287 с.
3. **Киселев А.С., Киселев А.С., Киселев И.А., Крутько Е.С.** Повышение эффективности численных алгоритмов, реализованных в ПК UZOR-1. — В сб.: Методы и программное обеспечение расчетов на прочность. М., ОАО «НИКИЭТ», 2009, с. 72—83.

УДК 621.039.003

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РБМК

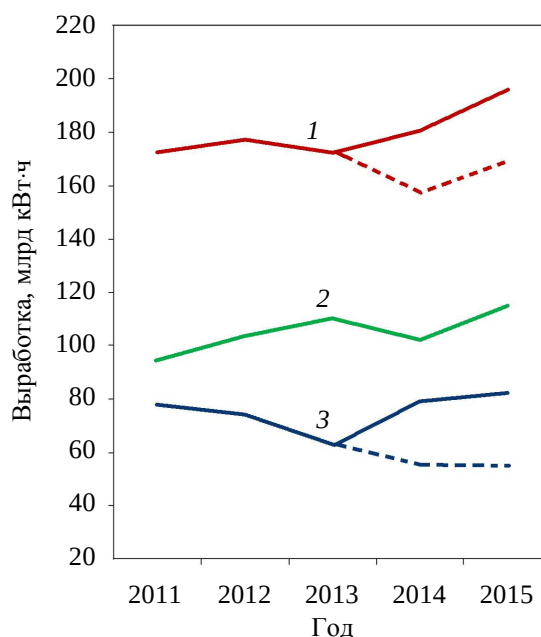
Гольцов А.Е., Молоканов Н.А. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)

В 2016 г. на АЭС России выработано самое большое за всю историю существования отечественной ядерной энергетики количество электроэнергии 196,1 млрд кВт·ч [1]. Этот показатель на 0,6% превышает результат 2015 г., который также был рекордным по выработке электроэнергии. Столь высокие результаты не могли бы быть достигнуты без успешной реализации комплекса НИОКР в обеспечение эксплуатации РБМК в условиях формоизменения графита, разработки и внедрения технологии восстановления ресурсных характеристик графитовой кладки энергоблоков РБМК [2, 3].

Согласно пессимистическому сценарию вывода из эксплуатации энергоблоков РБМК, разработанному в начале 2013 г., когда на остановленном 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС проводился этап обоснования и опытной отработки технологических процессов восстановления графитовой кладки, в 2013—2014 гг. предполагался останов четырех энергоблоков с РБМК — первых двух Ленинградской и Курской АЭС с последующим досрочным выводом из эксплуатации остальных (рис. 1).

Технико-экономический анализ работы АЭС с РБМК показал важность восстановления ресурсных характеристик графитовой кладки для ядерной энергетики и энергетической от-

расли страны в целом. Общая установленная мощность электростанций ЕЭС России на начало 2016 г. составила 235,4 ГВт [4]. Установленная мощность 35 энергоблоков на 10 АЭС на 31 декабря 2016 г. составила 28 ГВт, из них, МВт: 11 000 РБМК-1000 (11 энергоблоков),



Р и с. 1. Выработка электроэнергии на АЭС России в 2011—2015 гг. фактическая (—) и по сценарию досрочного вывода АЭС с РБМК из эксплуатации (---): 1 — всего; 2 — на прочих АЭС (не РБМК); 3 — на АЭС с РБМК