

УДК 621.039.546.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-29-36

Моделирование реакторного графита РБМК-1000 с учетом некоторых особенностей микроструктуры

А.Т. Алексеев, Л.В. Сергеева, А.А. Тутнов

В Российской Федерации эксплуатируются 11 реакторов РБМК-1000 (реактор большой мощности канальный, мощность 1000 МВт). Когда они только вводились в эксплуатацию, был назначен срок службы в 30 лет, однако замещающие мощности не были введены в эксплуатацию, а исследования состояния элементов реакторов выявили, что они далеко не исчерпали свой ресурс. Было принято решение о продлении эксплуатации сверх установленной. Одной из мер по обоснованию этого решения стало численное моделирование поведения графитовой кладки, поскольку данный элемент является ресурсопределяющим, его невозможно отремонтировать, отжигать и т.п. В свою очередь, для точности расчетов графитовой кладки, следует реалистично рассчитывать состояние отдельных графитовых блоков, из которых она набрана. Это довольно сложная задача, поскольку объединяет в себе тепловые, нейтронные и прочностные расчеты, а также учитывает то, что графит, используемый в реакторе РБМК, является анизотропным материалом. Кроме того, возникла необходимость решить очень сложную задачу по учету двухфазности графита, поскольку он состоит из связующего элемента и наполнителя.

Исследовано влияние масштабного фактора на поведение реакторного графита, которое учитывается с помощью феноменологической модели. Предполагается, что влияние микронапряжений, возникающих в графитовом изделии, существенно. Расчеты проведены на примере графитового блока РБМК с помощью трехмерной конечно-элементной методики и программы, принимающей во внимание анизотропию термо-радиационного поведения реакторного графита, его ползучесть, а также возможное возникновение трещин.

Ключевые слова: графитовый блок, реактор большой мощности канальный, трещины, микроструктура, компьютерное моделирование.

Для цитирования: Алексеев А.Т., Сергеева Л.В., Тутнов А.А. Моделирование реакторного графита РБМК-1000 с учетом некоторых особенностей микроструктуры // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 29—36. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-29-36.

Modeling the Graphite Stack of RBMK-1000 Reactors Taking into Account Certain Features of Graphite Microstructure

А.Т. Alekseev, L.V. Sergeeva, A.A. Tutnov

Eleven RBMK-1000 reactors (the RBMK-1000 denotes a large-capacity pressure tube nuclear reactor for a power unit with a 1000 MW electric power output) are presently in operation in the Russian Federation. At the time when these reactors were only commissioned, their service life was assigned to be 30 years. However, the replacement capacities had not been commissioned, and studies of the state of reactor elements revealed that the reactor service life was far from having been exhausted. Therefore, it was decided to extend the operation of these reactors beyond their initially assigned lifecycle. One of the measures used to justify that decision was numerical simulation of the graphite stack behavior, because this element determines the reactor service life in view of impossibility to repair, anneal it, etc. In turn, to achieve the required accuracy of graphite stack numerical analysis, it is necessary to realistically calculate the state of individual graphite blocks from which it is assembled. This is a rather intricate problem because it involves the need to carry out combined thermal, neutronic, and strength calculations. In addition, the analysis must take into account that the graphite used in the RBMK reactor is an anisotropic material. In addition, there was a need to solve a very complicated problem of taking into account the two-phase structure of the graphite, because it consists of a binder and filler.

The article presents a study of the effect the scale factor has on the reactor graphite behavior, which is taken into account by means of a phenomenological model. It is assumed that the microstresses arising in a graphite item have a significant influence on its behavior. The calculations were carried out, taking the RBMK reactor graphite block as an example, using a 3D finite element technique and a computer program that takes into account the anisotropy of the reactor graphite behavior under the effect of thermal and radiation factors, its creep, and possible occurrence of cracks.

Key words: graphite block, RBMK, cracks, microstructure, computer modeling.

For citation: Alekseev A.T., Sergeeva L.V., Tutnov A.A. Modeling the Graphite Stack of RBMK-1000 Reactors Taking into Account Certain Features of Graphite Microstructure. MPEI Vestnik. 2018;3:29—36. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-29-36.

Повышение надежности прогнозирования деформационно-прочностного поведения графитовых конструкций является одним из путей оптимизации и уточнения их срока эксплуатации. На микроуровне графит марки ГР-280, используемый в реакторах РБМК-1000, имеет структурные особенности, учет которых мог бы уточнить модель поведения графитовых блоков под облучением, а также точнее оценить оптимальные сроки эксплуатации реактора такого типа, поскольку срок эксплуатации этих реакторов напрямую зависит от степени формоизменения и прочности графитовой кладки.

Графит состоит из двух составляющих: связующего и наполнителя. Производство графитов базируется на применении коксов различной микроструктуры в качестве наполнителей и как связующих веществ пеков, получаемых из каменноугольных смол. Наполнителями для графитов атомных реакторов могут служить коксы, полученные из нефти или из конденсированных продуктов коксования углей, которые по своей микроструктуре близки к изотропным. Их оценка по 10-балльной системе равна 1,9...2,3 балла в соответствии с [1].

Технология получения указанного графита для кладки реакторов и колец твердого контакта заключается в подготовке наполнителя (стадии прокаливания, измельчения и разделения на фракции), смешивании подготовленной шихты с пеком и прессовании полученной массы в заготовки требуемых габаритов. Затем «зеленые» заготовки обжигаются, пропитываются каменноугольным пеком до достижения необходимой плотности и после операции последнего обжига графитируются. При этом графит стремятся получить максимально «чистым», без примесей различных элементов (особенно бора), что принципиально для обеспечения требуемых нейтронно-физических характеристик [2]. Этим объясняется, что при изготовлении, под воздействием высоких температур кристаллы графита, выделяющиеся из нефтепродуктов, получают изначальную ориентацию в пространстве, вследствие чего наблюдаются существенный разброс и анизотропия физических свойств, отличие микроструктуры у разных графитовых блоков. Таким образом, желательно учитывать микропараметры графитового блока при расчетах, поскольку анизотропия микроструктуры и, следовательно, свойства при облучении играют ключевую роль в формоизменении, процессах деградации и разрушения графитовой кладки.

В работе [3] сделана попытка описания модели поведения графита, которая могла бы объяснить различия между свойствами исследуемых графитовых образцов и графита в составе блоков кладки реактора РБМК.

Авторы постулируют несколько гипотез:

- на величину радиационного формоизменения графита влияет массивность образцов, на которых были исследованы свойства графита, необходимые для расчетов;

- основными факторами, существенно влияющими на радиационное формоизменение образцов, могут выступить градиенты температуры и потока нейтронов в массивных графитовых изделиях.

- вследствие возникновения крупных дислокаций в графите возникают локальные максимумы температурных полей, приводящие к дополнительным температурным деформациям, причем такой эффект вырождается при одномерном напряженном состоянии, так что не виден на облучаемых образцах.

Одним из механизмов образования релаксирующей компоненты деформаций, возникающей в материале в процессе облучения высокоэнергетическими частицами, может быть взаимодействие дислокационной сетки с образующимися вокруг тепловых пиков зонами повышенной по сравнению со средней по макрообъему температурой. Если при определенных напряжениях и температуре дислокационная структура устойчива, а именно, не происходит регулярных процессов переползания и скольжения, или они носят стационарный характер и, следовательно, пластическое деформирование отсутствует или происходит с постоянной скоростью, то спонтанно возникающие и короткоживущие горячие области при благоприятном расположении относительно соответствующих участков ближайших дислокационных линий могут привести к потере устойчивости этих участков и искривлению дислокационных линий.

Общий вид дополнительных пластических деформаций, согласно этой работе примет вид:

$$\varepsilon_{ij}^p = \delta_{ij} \int A_{ij} \frac{d\varphi}{dS} T^m \sin(\arctg \frac{\sigma_{mn}}{\sigma_{kl}} + \xi_0) dF,$$

где δ_{ij} — символ Кронекера; A_{ij} — анизотропные функционалы, зависящие от флюенса, температуры и др.; $d\varphi/dS$ — кривизна траекторий формоизменения; T — интенсивность напряжений; σ_{mn} — компоненты напряженного состояния; m — постоянная; ξ_0 — параметр, определяемый из экспериментальных данных.

После преобразований был сделан вывод о том, что качественно градиенты температурных полей и потока нейтронов оказывают влияние на модуль сдвига кристаллитов графита G_p :

$$G_p = \frac{\tau}{\tau / G + \varepsilon_p},$$

где τ — касательные напряжения; ε_p — деформация, созданная обратимыми дислокационными сегментами; G — модуль сдвига.

Итоговое соотношение для вычисления модуля сдвига G_p может быть получено из формулы

$$\frac{G}{G_p} = \begin{cases} 1 + \frac{0,72\pi\tau(1-\nu)D^2}{\ln 10^7 / \sqrt{n}}, & \text{при } \tau < \tau_{FR}; \\ 1 + \frac{0,36Gn\sqrt{nb}D^2}{\tau}, & \text{при } \tau > \tau_{FR}, \end{cases}$$

где ν — коэффициент Пуассона; τ_{FR} — касательное напряжение в графите, при котором дислокация превращается в источник Франка-Рида; b — вектор Бюргера; D — хорда в сегменте, где происходит сдвиг; n — плотность дислокационной сетки.

С учетом сделанных замечаний уместно называть описанные выше феноменологические зависимости по корректровке модуля сдвига — нелокальной деформационной моделью графита.

Поскольку модуль сдвига связан с модулем упругости соотношением $E = 2G(1 + \nu)$, то можно найти эффект использования соотношений данной феноменологической модели на напряженно-деформированное состояние графита и, таким образом, смоделировать влияние градиента температур, потока нейтронов, а также нелокального формоизменения графита на изменение габаритов графитового блока в процессе эксплуатации.

Размер области теплового пика оценен в 10^2 межатомных расстояний, а температура в нем на порядок выше средней температуры. Размер горячей области принят равным $\sqrt{10} \cdot 10^2$ постоянных решетки или 10^{-5} см. Если считать, что точками закрепления сегментов являются узлы дислокационной сетки, то $D = 10^{-5}$ см при $\sqrt{n} \geq 10^5$ см $^{-1}$; $D = 1/\sqrt{n}$ при $\sqrt{n} < 10^5$ см $^{-1}$.

Из приведенных зависимостей следует, что эффект снижения модуля сдвига в процессе облучения может

быть существенным при средних и высоких плотностях дислокаций и тем более заметным, чем меньше напряжение. Наличие обратимых изменений механических свойств в облученном материале может сказаться при больших флюенсах и наличии градиентов напряжений, например, при растрескивании графитовых блоков.

Основные моменты трехмерной конечно-элементной методики, учитывающей анизотропию терморadiационного поведения реакторного графита при длительном тепловом и нейтронном облучениях, его ползучесть, а также возможное возникновение трещин, изложены в [4].

С помощью данной методики, программы [5], после их переработки и модернизации с учетом модели [3], были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния в графитовом блоке РБМК-1000. В результате чего достигнуты следующие результаты (рис. 1 — 7).

Напряжения на внутреннем диаметре, полученные с учетом нелокальной деформационной модели, значительно меньше напряжений, полученных с использованием классической модели. Однако, рядом с трещиной этого не наблюдается. На верхней грани рост компоненты напряжений по классической модели наблюдается только в конце кампании. В остальные моменты времени максимумы напряжений, полученные

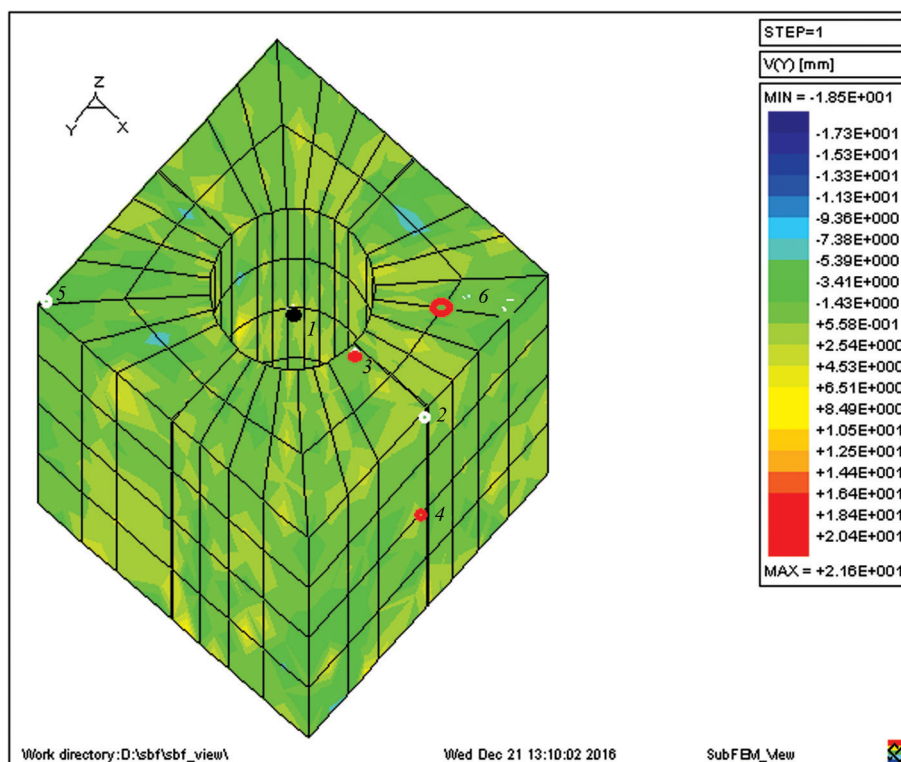


Рис. 1. Классическая модель напряженно-деформированного состояния в графитовом блоке РБМК-1000:

1 — точка, находящаяся на середине (по высоте) на внутренней поверхности отверстия; 2 — точка, находящаяся под верхним ребром графитового блока, рядом с трещиной; 3 — точка на верхней грани около отверстия рядом с трещиной; 4 — точка рядом с трещиной на середине по высоте боковой грани; 5 — угловая точка на верхней грани; 6 — точка на верхней грани

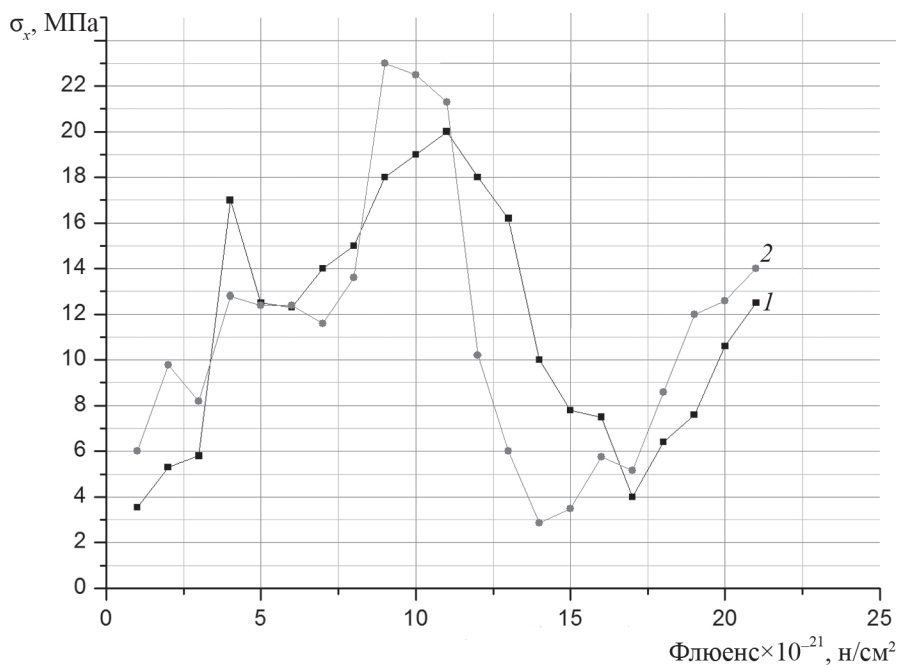


Рис. 2. Распределение компоненты напряжений σ_x для точки, находящейся на середине по высоте боковой грани рядом с трещиной, в зависимости от флюенса нейтронов (точка 4):

1 – нелокальная деформационная модель; 2 — классическая модель

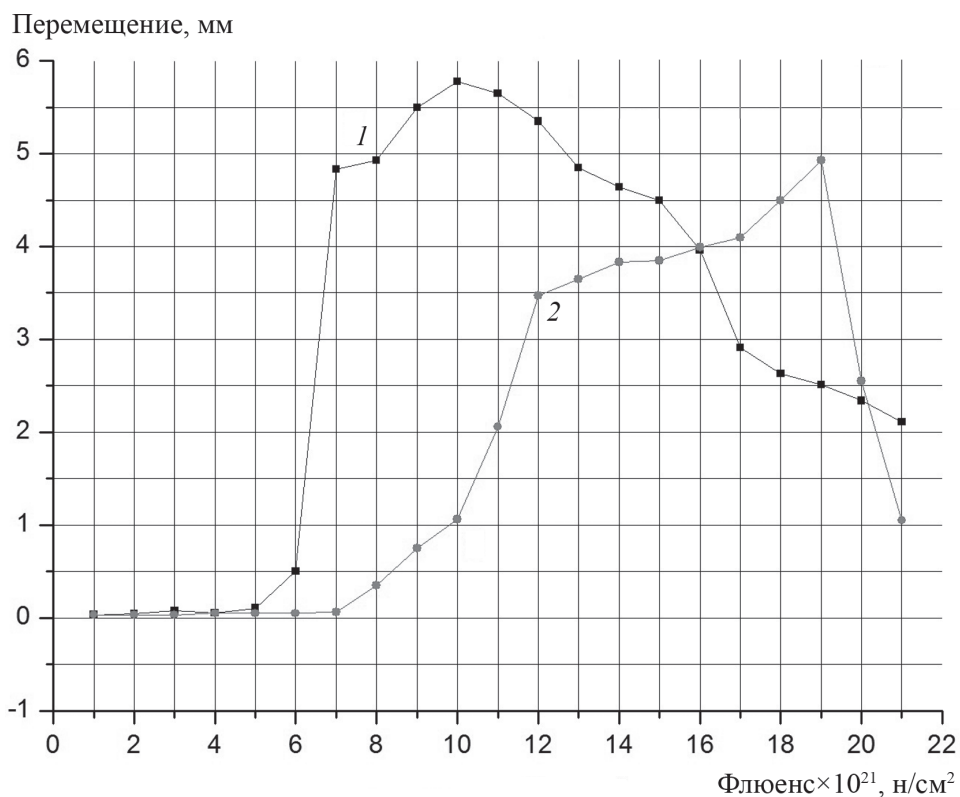


Рис. 3. Наружное перемещение левого берега трещины, полученное по нелокальной деформационной модели для задней поверхности графитового блока (точка 4) и полученное по классической модели (точка 2):

обозначения те же, что на рис. 2

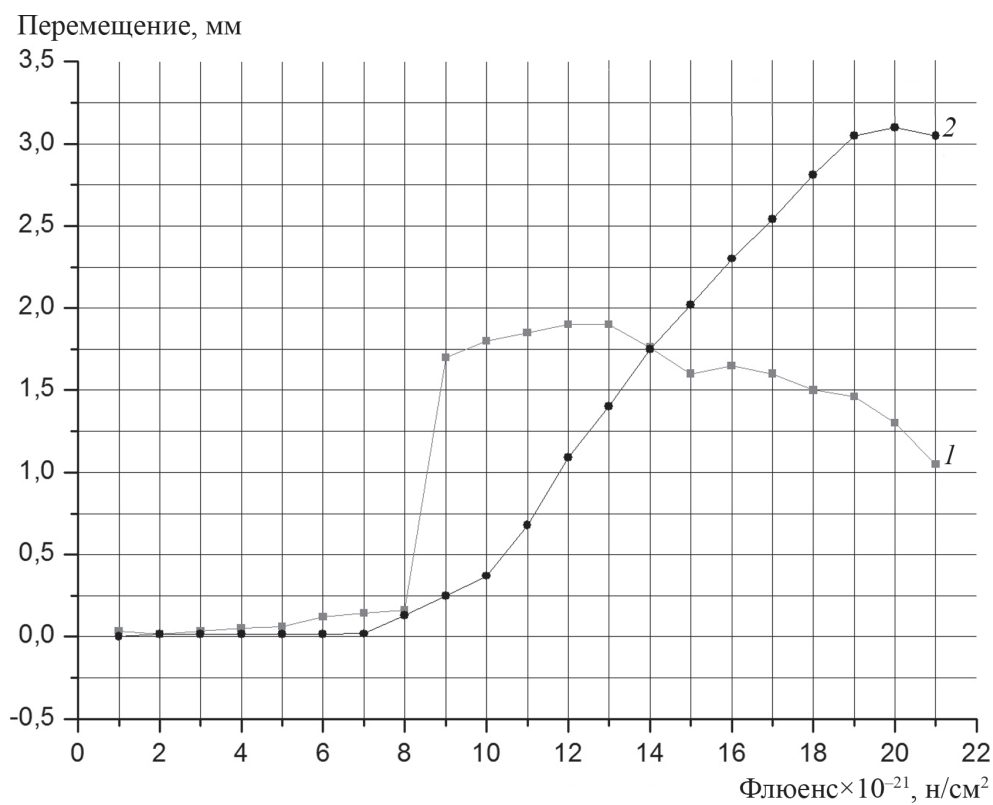


Рис. 4. Перемещение левого берега трещины около отверстия (точка 3):

1 – классическая модель; 2 — нелокальная деформационная модель

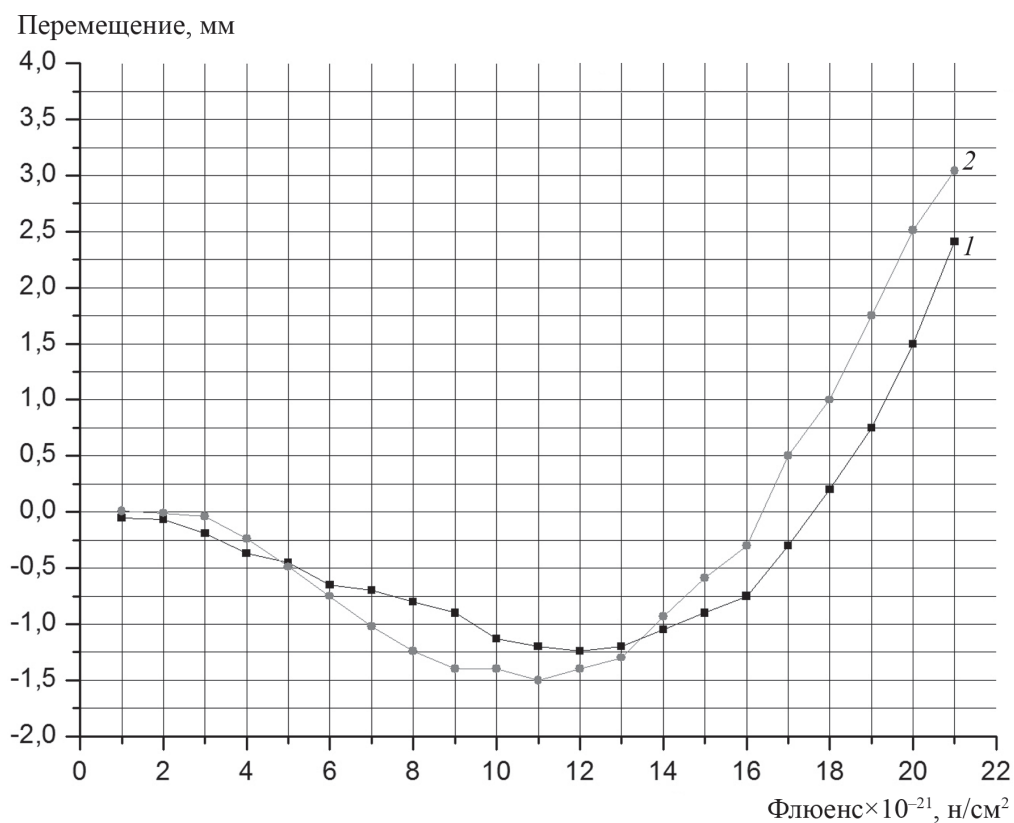


Рис. 5. Перемещение внутренней поверхности отверстия (точка 1):

1 – нелокальная деформационная модель; 2 — классическая модель

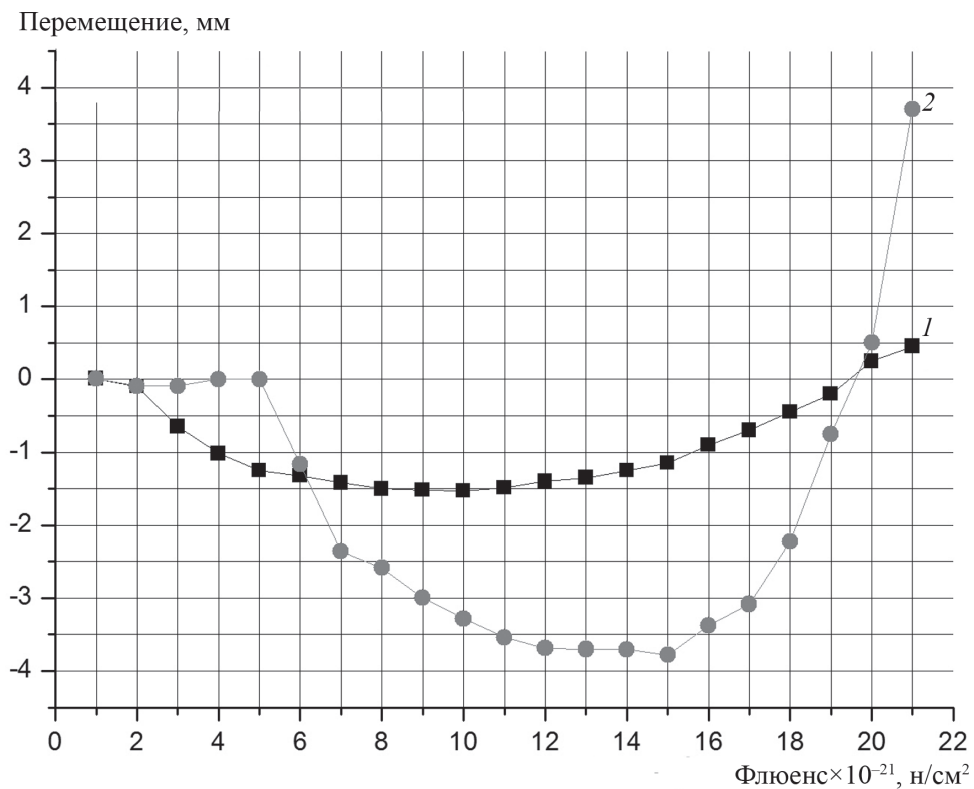


Рис. 6. Перемещение вдоль оси X левого верхнего угла графитового блока (точка 5):
1 – классическая модель; 2 — нелокальная деформационная модель

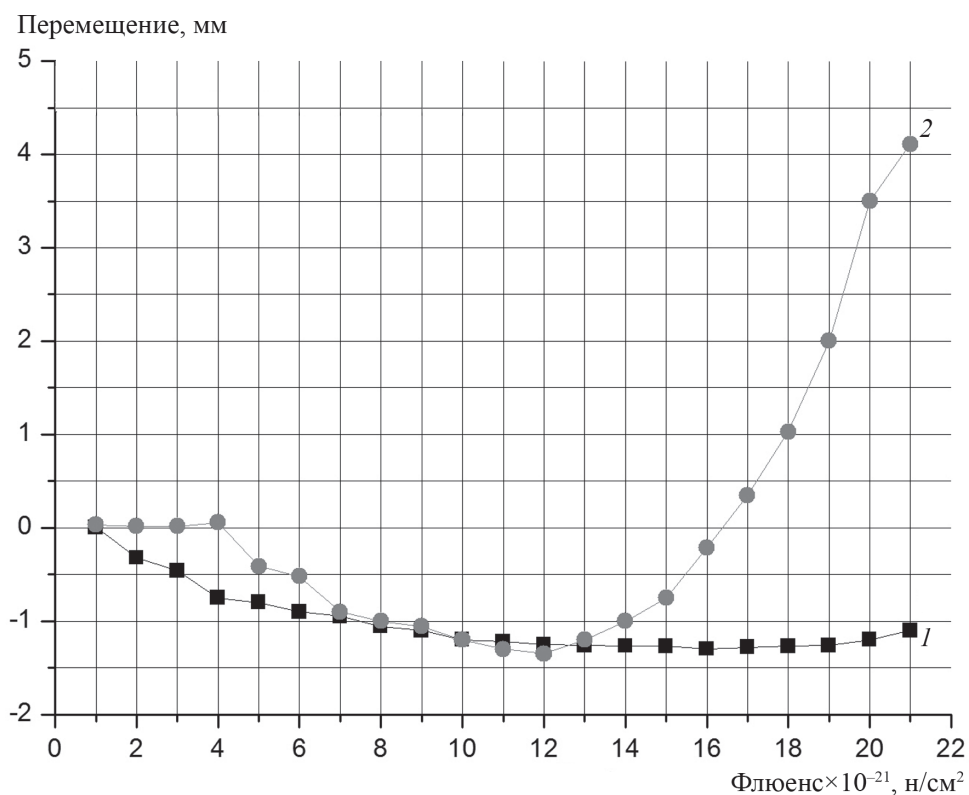


Рис. 7. Перемещение вдоль оси Y левого верхнего угла графитового блока (точка 5):
1 – классическая модель; 2 — нелокальная деформационная модель

по разным моделям, смещены друг относительно друга (см. рис. 2).

Возникновение трещины процесс во многом случайный. В расчетах по классической модели трещины возникали на фронтальной (см. рис. 1), а по нелокальной деформационной модели на диаметрально противоположной (задней) поверхностях.

Как показывают результаты расчета, раскрытие берегов продольной трещины непостоянно по высоте, как того и следовало ожидать. Максимальные величины перемещений берега трещины представлены на рис. 3 и соответствуют нелокальной деформационной модели. Учитывая асимметрию раскрытия трещины, можно констатировать, что расхождение берегов трещины едва ли превысит 10...12 мм.

Перемещения берегов трещины на наружной поверхности блока (раскрытия), определенные по двум моделям, сопоставимы, однако их характер получился разным (рис. 3). Перемещения вдоль оси x , полученные с помощью традиционной модели, достигают максимума раньше, чем вычисленные по нелокальной деформационной, однако сами они при этом меньше. Перемещения вдоль оси y (традиционная модель) достигают максимума позже, чем полученные с помощью нелокальной деформационной модели. Сами они при этом сопоставимы. На рисунке 5 изображено перемещение точки, лежащей на внутреннем отверстии графитового блока в середине по высоте. На графиках рис. 5 продемонстрированы расчеты перемещений с учетом нелокальной деформационной модели и без нее. Эта точка является ключевой при расчетах вероятности заклинивания тепловыделяющих сборок (ТВС) в топливном канале и прохождения системы управления и защиты реактора (СУЗ).

На рис. 6, 7 изображены перемещения точки, лежащей на углу графитового блока. Следует обратить внимание на то, что в двух разных моделях растрескивание происходит в диаметрально противоположных местах. При этом напряжения перераспределяются по-разному. Вследствие этого, перемещения в конкретно взятом углу (точка 5, рис. 1) сравнивать между собой некорректно.

Скачки и изломы на графиках связаны в первую очередь с возникновением трещиноподобных дефектов, превращением их в магистральные трещины, проращиванием последних, растрескиванием графитовых блоков и расхождением берегов трещины. При этом в рамках рассматриваемой схемы дискретизации графитового блока скачки трещины не могут быть меньше части размера конечного элемента (расстояния между узловыми точками) в направлении развития трещины.

Таким образом, перемещения, определенные с помощью нелокальной деформационной модели, несколько выше полученных по классической. Это обстоятельство говорит о предпочтительности использования нелокальной модели деформирования графита,

так как расчеты с использованием классической модели дают заниженную по сравнению с экспериментальными данными оценку изменения внутреннего диаметра графитового блока [2, 6]. Однако по напряжениям в целом классическая модель дает более консервативные результаты (более высокие напряжения).

Использование нелокальной деформационной модели, учитывающей масштабный фактор, позволяет несколько отсрочить появление трещин и даже уменьшить количество треснувших блоков, но при этом потребуются большее внимание к изменению диаметра кладки, которое будет немного больше.

Прделанная работа позволяет более адекватно оценить прочность и целостность отдельного графитового блока и может быть использована для расчета графитовой кладки в целом.

Литература

1. ГОСТ 26132—84. Коксы нефтяные и пековые. Метод определения микроструктуры.
2. РД ЭО 1.1.2.05.0788—2009. Руководство по расчету на прочность типовых узлов и деталей из графита реактора РБМК первого поколения.
3. Лоскутов О.Д., Маневский В.Н., Тутнов И.А. Феноменологическая модель формоизменения графита при воздействии облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы». 1990. Вып. 1 (35).
4. Алексеев А.Т., Сергеева Л.В. О выборе критерия прочности при математическом моделировании поведения реакторного графита // Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 20—26.
5. Сергеева Л.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618428 «GRA3D». 2011.
6. Платонов П.А. и др. Радиационная деградация графита реакторов типа РБМК // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов». 2016. Вып. 5. С. 105—118.

References

1. GOST 26132—84. Koksyy Neftyanye i Pekovyye. Metod Opredeleniya Mikrostruktury. (in Russian).
2. RD EO 1.1.2.05.0788—2009. Rukovodstvo po Raschetu na Prochnost' Tipovykh Uzlov i Detaley iz Grafita Reaktora RBMK Pervogo Pokoleniya. (in Russian).
3. Loskutov O.D., Manevskiy V.N., Tutnov I.A. Fenomenologicheskaya Model' Formoizmeneniya Grafita pri Vozdeystvii Oblucheniya. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Materialovedenie i Novye Materialy». 1990;1 (35).
4. Alekseev A.T., Sergeeva L.V. O Vyboire Kriteriya Prochnosti pri Matematicheskom Modelirovanii Povedeniya Reaktornogo Grafita. Vestnik MPEI. 2017;2: 20—26. (in Russian).

5. **Sergeeva L.V.** Svidetel'stvo o Gosudarstvennoy Registratsii Programmy dlya EVM № 2011618428 «GRA3D». 2011. (in Russian).

6. **Platonov P.A. i dr.** Radiatsionnaya Degradatsiya Grafita Reaktorov Tipa RBMK. Voprosy Atomnoy Nau-ki i Tekhniki. Seriya «Fizika Yadernyh Reaktorov». 2016;5: 105—118. (in Russian).

Сведения об авторах

Алексеев Андрей Тарасович — аспирант, младший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», e-mail: andtaraleks@gmail.com

Сергеева Людмила Васильевна — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Тутнов Александр Александрович — доктор технических наук, профессор, начальник отдела Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Information about authors

Alekseev Andrey T. — Ph.D.-student, Junior Researcher of National Research Center «Kurchatov Institute», e-mail: andtaraleks@gmail.com

Sergeeva Lyudmila V. — Dr.Sci. (Techn.), Leading Researcher of National Research Center «Kurchatov Institute»

Tutnov Aleksandr A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Head of Department of National Research Center «Kurchatov Institute»

Статья поступила в редакцию 11.09.2017