

О выборе критерия прочности при математическом моделировании поведения реакторного графита

А.Т. Алексеев, Л.В. Сергеева

В ходе эксплуатации ядерных энергетических реакторов РБМК-1000 было принято решение о продлении срока службы этого типа реакторов сверх установленного. Это экономически более выгодно, чем введение в эксплуатацию новых энергоблоков. Для обеспечения оптимальных условий эксплуатации и безопасной работы реактора помимо проведения технической модернизации необходимо с помощью компьютерного моделирования обосновать прочность и формоизменение графитовых блоков после длительного нейтронного облучения и температурного воздействия.

Графитовые блоки в канальных реакторах большой мощности (РБМК) являются элементами, во многом определяющими срок службы реактора в целом по причине их ограниченной ремонтпригодности. Поэтому поставлена задача разработать компьютерную модель терморadiационного поведения графитовых блоков с учетом как можно большего количества факторов, влияющих на термомеханическое поведение графитового блока.

В уравнениях напряженно-деформированного состояния учтена анизотропия графита. Часть работы посвящена детальному рассмотрению влияния ползучести на поведение графитового блока. Расчет на прочность произведен с учетом возникновения и распространения трещин.

В статье несколько критериев разрушения, используемых для сложного напряженно-деформированного состояния, применены для расчета на прочность графитового блока – элемента графитовой кладки, которая, в свою очередь, является замедлителем и отражателем в реакторе РБМК-1000. Целью исследования служит оценка влияния различных критериев разрушения на результаты моделирования термомеханического поведения графитового блока при длительном нейтронном облучении с помощью метода конечных элементов. В качестве конечного элемента использован двадцатиузельный изопараметрический элемент.

Ключевые слова: графитовый блок, компьютерное моделирование, критерий прочности, РБМК, трещины.

Choosing the Strength Criterion in Mathematics Modeling the Reactor Graphite Behavior

A. T. Alekseev, L. V. Sergeeva

During the operation of Type RBMK-1000 nuclear power-generating reactors (high-power pressure-tube reactors), it was decided to extend the lifetime of this type of reactors beyond the initially assigned one. Such an approach is more economically profitable than the commissioning of new power units. To ensure the optimal operating conditions and safe operation of the reactor, it is necessary, apart from carrying out its technical modernization, to substantiate the acceptable strength and shape distortion of graphite blocks after their having been exposed to long-term neutron irradiation by means of computer modeling.

The graphite blocks used in high-power pressure-tube (RBMK-type) reactors are elements that in many respects determine the reactor's lifetime as a whole due to their limited amenability to repair. In view of this circumstance, a task was set forth to develop a computer model of thermo-irradiation behavior of graphite blocks that would take into account the maximum possible number of parameters affecting the thermomechanical characteristics of the graphite block.

The anisotropy of graphite was taken into account in the stressed-and-strain state equations. Part of the study is devoted to a detailed analysis of creep effect on the graphite block behavior. The strength calculation was carried out taking into consideration the crack incipience and growth phenomena.

A few fracture criteria that are used for the conditions of combined stressed-and-strain state are applied in the article for carrying out a strength calculation of the graphite block as an element of the graphite brickwork, which serves as a moderator and deflector in the RBMK-1000 nuclear reactor. The aim of the investigation is to estimate the influence of different fracture criteria on the results obtained from modeling the thermomechanical behavior of a graphite block subjected to long-term neutron irradiation carried out using the finite element method. A 20-node isoparametric element was used as a single finite element.

Key words: graphite block, computer modeling, strength criterion, RBMK, cracks.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации работает 11 энергоблоков с реактором типа РБМК, обеспечивая при этом до 50 % электроэнергии, приходящейся на ядерную энергетику. В 2003 г. Госкорпорация «Росатом», основываясь на экспериментах, позволяющих отследить состояние реактора, приняла решение продлить срок службы Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС-1) более чем на 10 лет. Аналогичные решения, вероятно, будут приняты и по другим установкам, чей основной срок службы подошел к концу.

Одним из основных элементов реактора, чье состояние определяет срок службы, является замедлитель нейтронов, роль которого в РБМК играет колонна, изготовленная из графита ГР-280. Такая колонна набрана из нескольких графитовых блоков. При длительном нейтронном облучении графитовые блоки начинают растрескиваться. Ввиду ограниченной ремонтпригодности этих блоков необходимо постоянно отслеживать их состояние для оптимизации сроков службы. Отслеживание параметров может производиться с помощью экспериментального микроскопического исследования образцов, вырезанных из облученных графитовых блоков, а также с помощью компьютерного моделирования, которое, тем не менее, обязательно должно сравниваться с экспериментальными результатами.

Данная работа посвящена компьютерному моделированию терморadiационного поведения графитового блока в РБМК с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Такая модель позволяет прогнозировать прочность графитового блока на протяжении всей работы реактора.

Одним из важных аспектов модели, который обязательно должен быть проработан, является выбор критерия разрушения. При сложном напряженно-деформированном состоянии (анизотропия графита, высокие температурные поля, нейтронное облучение) затруднительно применять популярные сейчас в теории разрушения J-интегралы, или более общий случай, представленный в зарубежной литературе, — С-интеграл. Кроме того, от выбора критерия разрушения зависит все поведение модели; в разное время наступает растрескивание, образуется сквозная трещина, перераспределение напряжений вследствие растрескивания в модели происходит с различной интенсивностью. В работе представлены пять критериев разрушения, использованных при моделировании поведения графитовых блоков.

Постановка задачи

В данной работе объектом компьютерного моделирования выступает графитовый блок с характерными размерами 250×250×600 мм. Он изготовлен из графита ГР-280 и применяется в ядерных реакторах типа РБМК-1000 в качестве элементов замедлителя и отра-

жателя нейтронов. Плотность графита равна 1,65 г/см³. В ходе эксплуатации графитовый блок претерпевает термические нагрузки (эксплуатация при температурах в диапазоне 500...600 °С) и существенные радиационные нагрузки.

Существенно анизотропное поведение графита требует решения задачи в трехмерной постановке, поэтому для создания моделей поведения графитового блока во времени, с учетом существенной неоднородности его свойств по объему желательнее опираться на конечно-элементную модель с трехмерным конечным элементом (КЭ).

Использование готовых КЭ-программ нецелесообразно в силу того, что необходима программа, открытая и доступная для развития. Кроме того, зарубежные программы не всегда соответствуют отечественным нормативным документам.

Наилучшим образом для исследования поведения реакторного графита подходит трехмерный изопараметрический квадратичный КЭ с двадцатью узлами, используемый в программе GRA3D [1], разработанной в НИЦ «Курчатовский институт».

Для моделирования терморadiационного поведения используются несколько основных соотношений. Это уравнения равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + X = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + Y = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где X, Y, Z — объемные силы; соотношения Коши (уравнения совместности деформаций)

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где u, v, w — перемещения точки в определенном направлении; обобщенный закон Гука с учетом анизотропии ($\mu_{12} = \mu_{21} \neq \mu_{13}, \mu_{32}$)

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E_1} \sigma_x - \frac{\mu_{21}}{E_2} \sigma_y - \frac{\mu_{31}}{E_3} \sigma_z; \\ \varepsilon_y = \frac{\mu_{12}}{E_1} \sigma_x + \frac{1}{E_2} \sigma_y - \frac{\mu_{32}}{E_3} \sigma_z; \\ \varepsilon_z = \frac{\mu_{13}}{E_1} \sigma_x - \frac{\mu_{23}}{E_2} \sigma_y + \frac{1}{E_3} \sigma_z, \end{cases} \quad (3)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Кроме того, необходимо отметить, что в моделировании учтена деформация ползучести, причем для ее реализации в трехмерной постановке разработана

методика, использующая теорию типа Беляева – Малинина, в рамках которой полный тензор деформаций может быть записан в следующем виде:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{EC} + \varepsilon_{ij(n-1)}^c + \varepsilon_{ij}^v. \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{EC} + \varepsilon_{ij(n-1)}^c + \varepsilon_{ij(n)}^v$ — упругая составляющая деформаций в текущий момент времени плюс приращение составляющей деформаций ползучести на n -м шаге по времени; $\varepsilon_{ij(n-1)}^c = \sum_{k=1}^{n-1} \Delta\varepsilon_{ij}^c$ — накопленная деформация ползучести за период до $(n-1)$ -го шага по времени; ε_{ij}^v — составляющая изменения объема.

Упругая составляющая

$$\varepsilon_{ij}^E = \frac{1}{E_i} \left[\sigma_{ij} - \mu (3\delta_{ij}\sigma - \sigma_{ij}) \right], \quad (5)$$

где E_i — модуль упругости первого рода, в i -м направлении; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; μ — коэффициент Пуассона; σ — шаровый тензор напряжений.

Приращение деформаций ползучести на n -м шаге по времени может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta\varepsilon_{ij(n)}^c = \frac{3}{2} \frac{\Delta\varepsilon_{ij(n)}^c}{\sigma_{i(n)}} (\sigma_{ij(n)} - \delta_{ij}\sigma_{(n)}). \quad (6)$$

Приращение деформаций ползучести $\Delta\varepsilon_i^c$ для графита, как известно из работы [2], составляет

$$\Delta\varepsilon_i^c = \begin{cases} \frac{K_1}{F + F_1} \Delta F \sigma_i & \text{при } F < F_m; \\ \left(\frac{K_1}{F + F_1} + B \right) \Delta F \sigma_i & \text{при } F \geq F_m. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь K_1, B, F_1, F_m — коэффициенты, характеризующие скорость радиационной ползучести графита, зависящую от температуры; F — флюенс нейтронов с энергией больше 0,18 Мэв, нейтр/см²; ΔF — приращение флюенса нейтронов; σ_i — интенсивность напряжений.

Из формулы (7) видно, что приращение деформации ползучести находится в линейной зависимости от интенсивности напряжений. Этот факт позволяет решать задачу по теории типа Беляева – Малинина, в соответствии с которой приращение интенсивности деформаций ползучести можно представить в следующем виде:

$$\Delta\varepsilon_i^c = C(F, \Delta F) \sigma_i. \quad (8)$$

С учетом формул (4) — (8) можно получить выражение для суммы полных упругих деформаций и приращения деформаций ползучести на последнем шаге по времени:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^{EC} &= \frac{1}{E_i} \left[\sigma_{ij(n)} - \mu (3\delta_{ij}\sigma_{(n)} - \sigma_{ij(n)}) \right] + \\ &+ \frac{3}{2} \frac{C(F, \Delta F)}{\sigma_i} \sigma_i (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) = \\ &= \frac{1}{E^*} \left[\sigma_{ij} - \mu^* (3\delta_{ij}\sigma - \sigma_{ij}) \right], \quad E^* = \left[\frac{1}{E_{cp}} + C(F, \Delta F) \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mu^* = \frac{\mu / E_{cp} + C(F, \Delta F) / 2}{1 / E_{cp} + C(F, \Delta F)}$; E_{cp} — среднее значение модуля упругости.

Предложенный алгоритм позволяет решать задачу не в приращениях, а в полных значениях перемещений, деформаций и напряжений, и в целом дает возможность получить более адекватную картину указанных величин, чем при использовании теории течения. Это объясняется тем, что учет ползучести с помощью обычной теории течения выполняется безытерационно, поэтому релаксация напряжений происходит плохо. Если бы графит «вел себя» подобно металлам, т. е. обладал существенной пластичностью, обычной теории течения для исследования его поведения было бы вполне достаточно, но пластичность графита принято учитывать только с помощью динамического модуля упругости, что и делается в последнее время.

Как было отмечено, при длительном нейтронном облучении графитовые блоки начинают растрескиваться, что в конечном итоге приводит к образованию сквозных продольных трещин. В качестве симуляции этого процесса сетка КЭ из относительно равномерной по углу изменена таким образом, что в ней появились полосы с очень малым полярным углом, сформировавшие практически вертикальные плоскости. В ходе моделирования проверялся критерий разрушения, при этом напряжения в узле сравнивались с пределом прочности графита при температуре 500 °С при известном накопленном флюенсе. При выполнении критерия разрушения в узлах этих «плоских» элементов изменялись значения модуля упругости, и напряжения в окрестности узлов перераспределялись, что и наблюдается при реальном растрескивании.

Входные данные для расчетов взяты из работы «Руководство по расчету на прочность типовых узлов и деталей из графита реактора РБМК первого поколения», РД ЭО 1.1.2.05.0788—2009 [2]. При моделировании в программу были заложены изменения таких свойств, как модуль упругости, предел прочности, геометрические размеры в различных направлениях, коэффициент линейного расширения. Кроме того, необходимо знать распределения температуры и флюенса нейтронов по блоку.

Использованные критерии прочности

В данной работе использовано пять различных критериев прочности. Четыре из них являются обще-

известными для сложного напряженно-деформированного состояния.

В соответствии с критерием разрушения Сдобырева [3] эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sigma_i + \sigma_1}{2}, \quad (10)$$

где σ_i — интенсивность напряжений; σ_1 — первое главное напряжение.

В критерии разрушения Трунина [4]

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sigma_i + \sigma_1}{2} a^{1 - \frac{6\sigma_0}{2}(1-v)}, \quad (11)$$

где $a = \sqrt[3]{2v}$; $v = \frac{\sigma_{bp}}{\sigma_{bc}}$; $\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$, σ_{bp} — предел прочности на растяжение; σ_{bc} — предел прочности на сжатие.

Для критерия разрушения Надаи [3]

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sigma_i}{2}(1+v) + \frac{3\sigma_0}{2}(1-v). \quad (12)$$

В соответствии с критерием разрушения Писаренко – Лебедева [4]

$$\sigma_{\text{экв}} = v\sigma_i + (1-v)\sigma_1. \quad (13)$$

Пятый критерий использован по причине сильной анизотропии графита, вследствие чего в РД ЭО 1.1.2.05.0788—2009 пределы прочности приведены отдельно для радиального и вертикального направлений (по отношению к графитовому блоку). Поэтому компоненту напряжения по заданному направлению можно сравнивать с определенным пределом прочности. Поскольку предел прочности на растяжение значительно меньше предела прочности на сжатие, именно он использован в критерии разрушения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_x(\sigma_z); \sigma_{\text{экв}} \leq \sigma_{bp}^{R(Z)}.$$

Тригонометрический метод нахождения главных напряжений

В формулах (10) — (13) использованы значения главных напряжений. Поскольку компьютерное моделирование подразумевает пошаговый метод вычисления, а кроме того, моделируется большое количество точек, необходим алгоритм вычисления главных напряжений, удобный для использования в компьютерной программе, т. е. позволяющий безошибочно, но без дополнительного контроля решать кубические уравнения для каждой исследуемой точки. Таким является тригонометрический метод нахождения главных напряжений Кардано. Он заключается в следующих вычислениях:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}, \quad (14)$$

где $\bar{\sigma}$ — модуль тензора-девиатора напряжений; τ — касательные напряжения.

$$\cos 3\varphi = 3\sqrt{6} \frac{J_3^{(\sigma)}}{(\bar{\sigma})^3}, \quad (15)$$

где φ — фаза девиатора; J_3 — третий инвариант девиатора напряжений.

Тогда главные напряжения можно найти по формулам:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\sigma} \cos \varphi; \sigma_2 = \sigma_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\sigma} \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$\sigma_3 = \sigma_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\sigma} \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right).$$

Сравнение и анализ полученных результатов

В результате моделирования и подстановки результатов расчета в графический модуль получаются модели, изображенные на рис. 1. Для того чтобы оценить выполненный расчет, зачастую наиболее тщательно исследуется точка, лежащая на внутренней поверхности отверстия технологического канала (ТК) (рис. 1). Она весьма важна для оценок, поскольку определяет сразу несколько проблем: заклинивание топливной ячейки внутри канала, невозможность введения стержня управления и защиты (СУЗ) в случае искривления канала. Кроме того, в этой области максимален нейтронный поток.

Как видно из графиков на рис. 2 и 3, при использовании различных критериев разрушения значения перемещений несколько отличаются, однако их «характер» в целом сохраняется. В качестве оценочных суждений в первую очередь обращают внимание на величину максимальной усадки графитового блока и на момент потери прочностных свойств. Таким моментом считается переход зависимости из отрицательной области в положительную во время вторичного распухания. Анализируя графики, можно сделать несколько выводов.

Самый пессимистичный прогноз дает расчет с критерием разрушения Сдобырева. Для него характерно наибольшее изменение диаметра отверстия в графитовом блоке и перемещение в вертикальном направлении. Потеря прочностных свойств, судя по графику, наступает при флюенсе $16 \cdot 10^{-21}$ нейтр/см². Таким образом, моделирование с помощью критерия Сдобырева повторяет результаты, приведенные в [2] (рис. 4).

Критерии Надаи и Писаренко – Лебедева похожи друг на друга как математическими выражениями, так и полученными результатами при моделировании. Результаты, полученные с их использованием, имеют более оптимистичный характер. Скорее всего, это связано с тем, что растрескивание при этих критериях наступает позже, чем, например, в случае использования критерия разрушения Сдобырева.

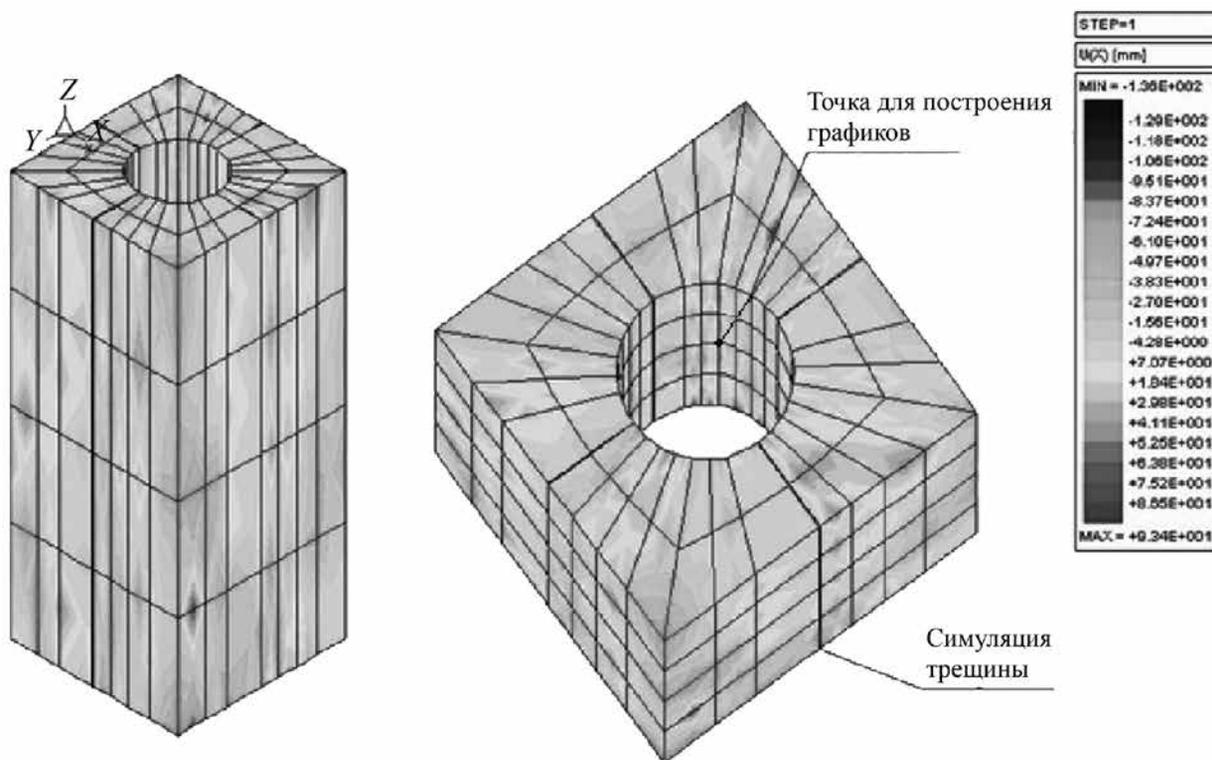


Рис. 1. Пример результатов моделирования с помощью программы GRA3D

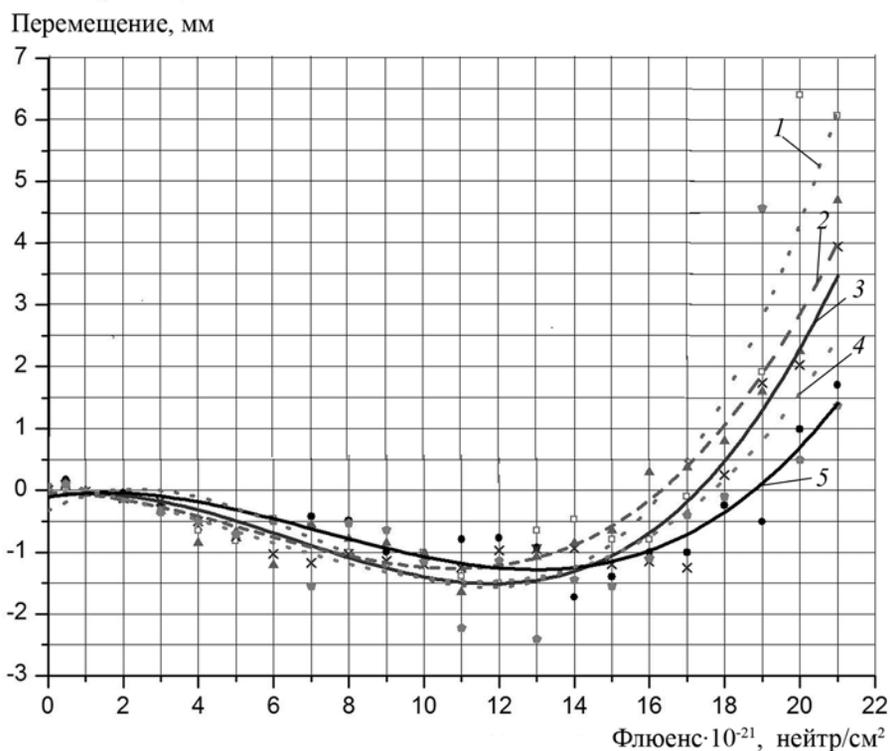


Рис. 2. Перемещение точки, лежащей на внутреннем радиусе в горизонтальной плоскости. Сравнение различных критериев разрушения:

1 — критерий Сдобырева; 2 — то же, Надаи; 3 — Трунина; 4 — Писаренко – Лебедева; 5 — анизотропный критерий; ● — анизотропный критерий; □ — критерий Сдобырева; × — то же, Трунина; ▲ — Надаи; ◆ — Писаренко – Лебедева

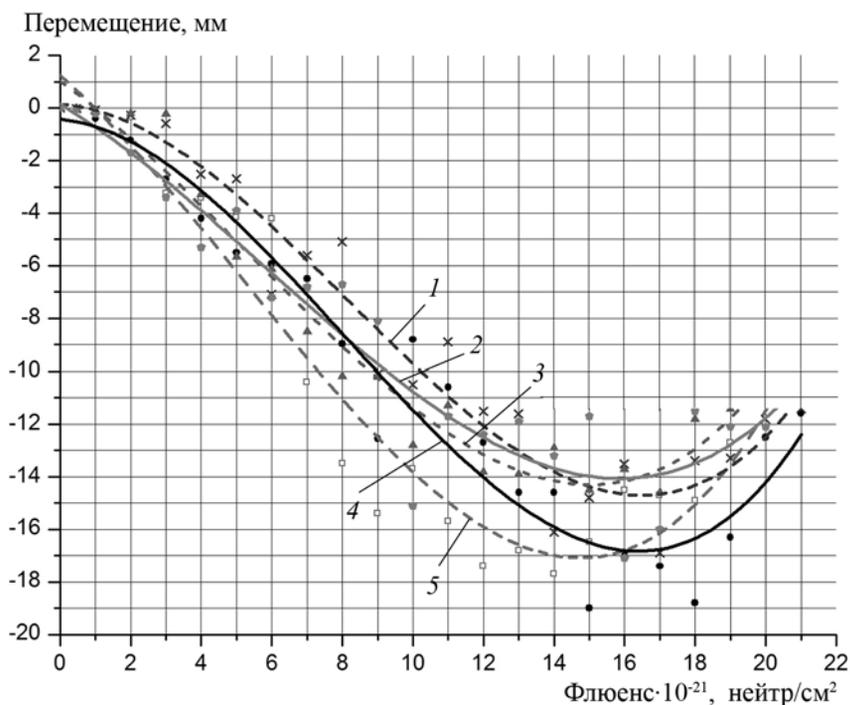


Рис. 3. Перемещение точки, лежащей на внутреннем радиусе в вертикальной плоскости. Сравнение различных критериев разрушения:

1 — критерий Трунина; 2 — то же, Писаренко – Лебедева; 3 — Надаи; 4 — анизотропный критерий; 5 — критерий Сдобырева; ● — анизотропный критерий; □ — то же, Сдобырева; × — Трунина; ▲ — Надаи; ◆ — Писаренко – Лебедева

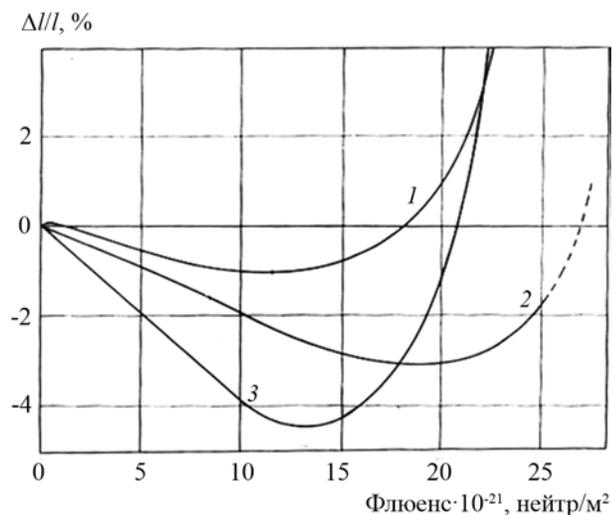


Рис. 4. Относительное изменение линейных размеров графита ($\Delta l/l$) и объема ($\Delta V/V$):

1 — перпендикулярная вырезка; 2 — параллельная вырезка; 3 — изменение объема

Самым оптимистичным из общеизвестных критериев, как видно из рис. 2 и 3, является критерий Трунина. Для него характерны: слабое растрескивание, низкий градиент при вторичном распухании, относительно позднее наступление потери прочностных свойств.

При использовании «анизотропного» критерия изменение диаметра происходит медленнее, чем при использовании критерия Сдобырева или Трунина, а вертикальные перемещения приближаются к результатам, полученным в случае использования критерия разрушения Сдобырева.

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- выбор критерия разрушения, отражающего и учитывающего сложное напряженно-деформированное состояние, в определенной степени влияет на результат компьютерного моделирования поведения графитового блока. Это выражается в различном времени растрескивания, следовательно, разной скорости перераспределения напряжений внутри блока, различной скорости изменения геометрии центрального отверстия;

- использование критериев Сдобырева, Писаренко – Лебедева и Надаи приводит к менее оптимистичным результатам, чем использование критерия Трунина. Кроме известных критериев, использован «анизотропный» критерий, что обусловлено наличием данных по прочности в разных направлениях, результаты моделирования при этом имеют наиболее оптимистичный характер.

Литература

1. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618428 GRA3D. Зарег. в реестре программ для ЭВМ 26.10.2011. Заявка № 2011616688 от 06.09.2011.

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. **Биргер И.А., Шорр Е.Ф., Шнейдерович Р.М.** Расчет на прочность деталей машин. Справочник. М.: Машиностроение, 1993.

4. **Трунин И.И.** Критерий прочности в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии. М.: Прикладная механика. 1965. Т. 1. Вып.7. С. 77—83.

References

1. **Svidetel'stvo** o Gosudarstvennoy Registratsii Programmy dlya EVM № 2011618428 GRA3D. Zareg. v Reestre Programm dlya EVM 26.10.2011. Zayavka № 2011616688 ot 06.09.2011. (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. **Birger I.A., Shorr E.F., Shneyderovich R.M.** Raschet na Prochnost' Detaley Mashin. Spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1993. (in Russian).

4. **Trunin I.I.** Kriteriy Prochnosti v Usloviyakh Polzuchesti pri Slozhnom Napryazhennom Sostoyanii. Prikladnaya Mekhanika. 1965;1;7:77—83. (in Russian).

Сведения об авторах

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

Сергеева Людмила Васильевна — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «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»

Статья поступила в редакцию 06.09.2016