

УДК 539.376:621

Е.В. Чумаков

ПРИВЕДЕННЫЙ ПАРАМЕТР ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АЭС

E.V. Chumakov

THE RESULTED PARAMETER TO ASSESS STRENGTH OF COMPLEX STRESSED PRODUCTS OF A NUCLEAR POWER STATION

В статье на примере чехла тепловыделяющей сборки реактора БН-350 показан способ решения задачи по определению критического сечения металлоизделия для случая, когда рабочие условия по его объему непостоянны. Установлено, что тепловыделяющая сборка атомного реактора на быстрых нейтронах БН-350 характеризуется сложными условиями эксплуатации, когда каждый элементарный объем изделия подвергается отличающимся по величине воздействиям температуры, напряжения и плотности потока нейтронов. Предложено использовать для анализа надежности оборудования приведенный параметр. Этот параметр выявил критическое сечение чехла тепловыделяющей сборки, которое располагается ниже центра активной зоны и в котором в наибольшей степени вероятно его разрушение.

ПРОЧНОСТЬ; ПРИВЕДЕННЫЙ ПАРАМЕТР; ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ; НАПРЯЖЕНИЕ; ПОЛЗУЧЕСТЬ.

The article shows the solution to the problem of defining the critical section of the hardware with inconstant volume operating conditions. The sample for the solution is nuclear reactor BN-350 assemblages. It is established, that the assembly of the BN-350 fast-neutrons nuclear reactor is characterized by complex operating conditions when each elementary volume of a product is influenced by variable temperature, pressure and density of a neutron flow. The author offers to use the resulted parameter to analyze reliability of the equipment. This parameter has revealed the critical section of an assembly cover which is located below the center of the active zone and where the cover is likely to be destroyed.

DURABILITY; RESULTED PARAMETER; FLUIDITY LIMIT; PRESSURE; CREEP.

Длительность эксплуатации машин и механизмов определяется способностью их деталей сохранять форму и размеры под воздействием таких внешних факторов, как нагрузка, температура, облучение, наличие агрессивных сред [1]. Считается, что доминирующий процесс в этом случае — ползучесть. Именно скорость ползучести определяет длительность эксплуатации нагруженных деталей [2–4]. Эта характеристика является функцией напряжения и температуры. Обычно при проектировании их считают величинами постоянными. Но в ряде случаев металлоизделия работают в условиях, когда эти параметры не стабильны или не оди-

наковы по объему детали. Примером может служить оборудование литейных и термических цехов, где на одном и том же элементе конструкции имеет место значительный градиент температур. Стрела грузоподъемного механизма подвергается переменному по длине изгибающему моменту и, следовательно, переменным напряжениям. Когда переменна одна характеристика, это особых трудностей не вызывает. Но есть случаи, когда переменными являются две и три эксплуатационных характеристики. Тогда возникают трудности при определении сечений, в которых в первую очередь следует ожидать разрушения детали. По этой причине поиск методов

выявления критических сечений актуален с практической и научной точек зрения. В особо сложных условиях работают тепловыделяющие сборки (ТВС) атомных реакторов. Как будет показано ниже, по высоте чехла ТВС переменными величинами являются температура, напряжение и плотность нейтронного потока. Это приводит к тому, что каждый элементарный объем изделия работает при разных температурно-силовых условиях. Отсюда следует, что обеспечение безопасности эксплуатации промышленных атомных реакторов требует поиска методов исследования, наиболее полно отражающих условия и состояние конструкционного материала в процессе его эксплуатации.

Цель работы — оценка возможности использования приведенного параметра в анализе напряженного состояния ТВС реактора на быстрых нейтронах БН-350 для определения критического сечения.

Объект исследования: чехол ТВС из стали 12Х18Н10Т, который представляет собой шестигранную трубу с шириной грани 50 мм и высотой ~ 2500 мм. Активная зона атомного реактора — это набор ТВС, которые устанавливаются рядом друг с другом при зазоре в 2 мм. Следовательно, деформация чехла ТВС не должна превышать это величину. Для предотвращения контакта поверхностей сборок служат дистанционирующие проволочки. Рабочий чертеж тепловыделяющей сборки реактора БН-350 показан на рис. 1.

Теплоноситель подается с нижнего торца ТВС, и здесь избыточное удельное давление максимально (0,55 МПа). В верхней части оно практически не отличается от нуля. Отметим, что чехол несимметричен относительно центра активной зоны из-за наличия в нижней части газовой полости.

В верхней части сборки имеется устройство для транспортировки при выполнении технологических операций, а в нижней — цилиндрический хвостовик для фиксации ТВС в активной зоне реактора.

Тепловыделяющую сборку в процессе эксплуатации перегружают из одного канала в другой в соответствии с регламентом. Этого требует специфика производства. Срок службы ТВС невелик, около 1,5 лет. За это время выгорание уранового топлива достигает в реакторах на быстрых

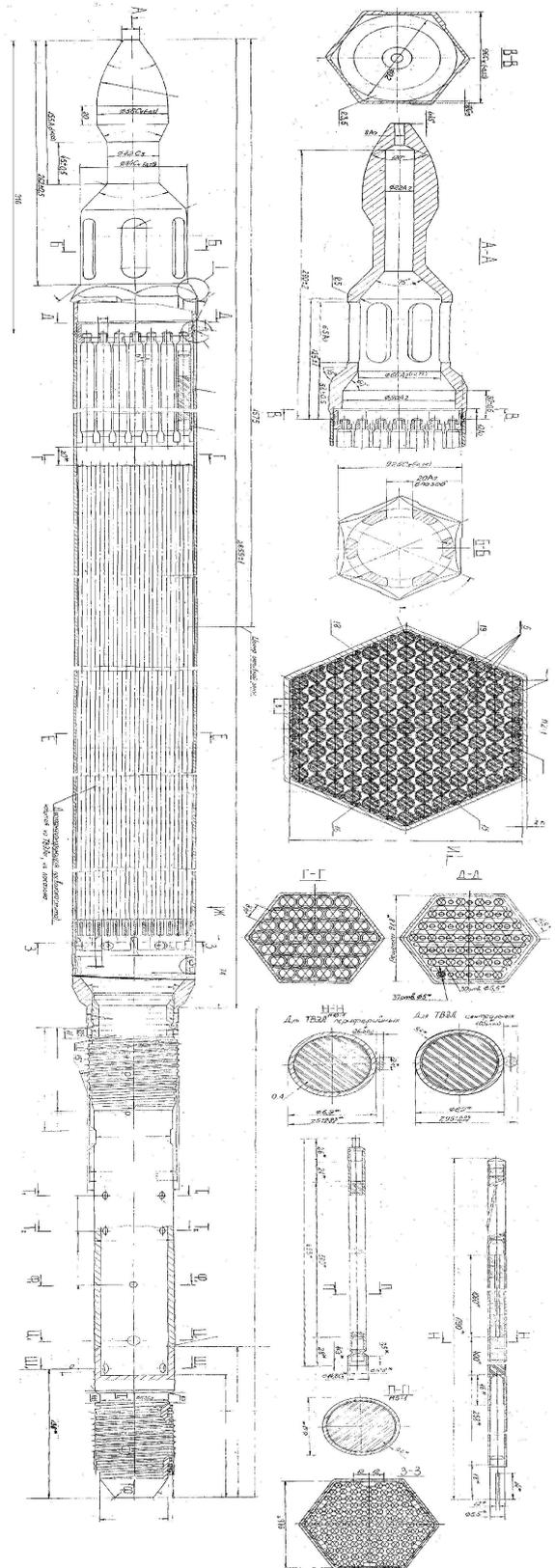


Рис. 1. Сборочный чертеж ТВС

нейтронах 12–18 %. Следовательно, коэффициент использования назвать удовлетворительным нельзя. Причина кроется в радиационных эффектах, из которых основные — это реакторная ползучесть и распухание. Ситуация осложняется тем, что рабочие условия по высоте активной зоны реактора не остаются постоянными. Имеющиеся градиенты температур, напряжений, плотностей потока нейтронов делают трудно решаемой задачу по прогнозированию сроков безопасной эксплуатации. Как будет показано ниже, использование приведенного параметра, который подробно описан в работах [5–7], позволяет достаточно просто и корректно решить эту задачу.

Методы исследования. В работе использованы экспериментальные методы исследования кратковременных механических свойств для определения предела текучести и расчетные методы установления действующих напряжений и величины приведенного параметра. Испытания проводились при одноосном растяжении с последующим построением диаграмм в координатах «напряжение — время». Инженерные диаграммы растяжения были получены при постоянной скорости растяжения 0,5 мм/мин.

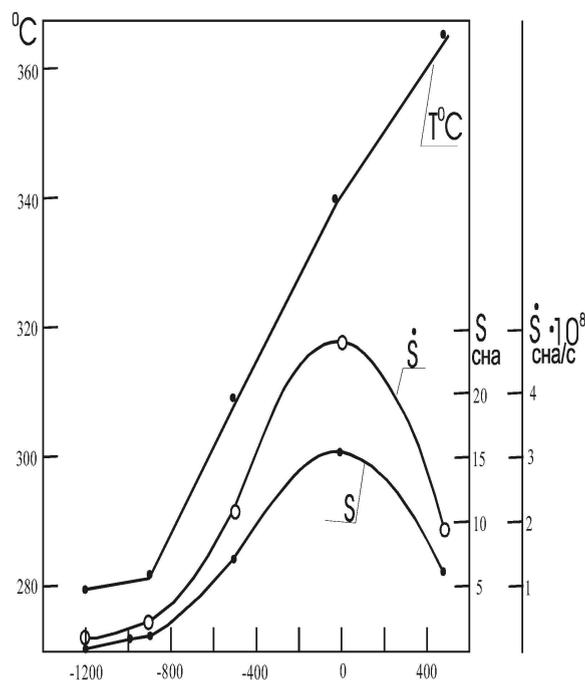


Рис. 2. Распределение температур, доз и их скоростей набора по высоте чехла ТВС реактора БН-350

Результаты исследований

Для проведения анализа необходимо рассмотреть рабочие условия чехла. В графическом виде они представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 следует, что температура на входе на отметке –1200 мм от центра активной зоны (ЦАЗ) составляет ~ 280 °С и слабо изменяется до отметки –900 мм, затем растет до до ~ 70 °С на отметке +500 мм. Графики, отражающие дозовую зависимость и скорость ее накопления, нелинейны. Они имеют максимум в центре активной зоны. Изменение давления теплоносителя на внутреннюю стенку шестигранного чехла демонстрирует рис. 3. Рабочие условия чехла ТВС можно охарактеризовать следующим образом. Давление в гранях чехла постепенно убывает при движении от нижнего торца к верхнему. Температура возрастает, но плотность потока нейтронов, от которого зависит интегральная доза облучения и скорость ее набора, сначала возрастает, достигает максимального значения в центре активной зоны, а затем убывает. Говоря о рабочих условиях каждой конкретной тепловыделяющей сборки, следует иметь в виду, что режимы эксплуатации для каждой из них не яв-

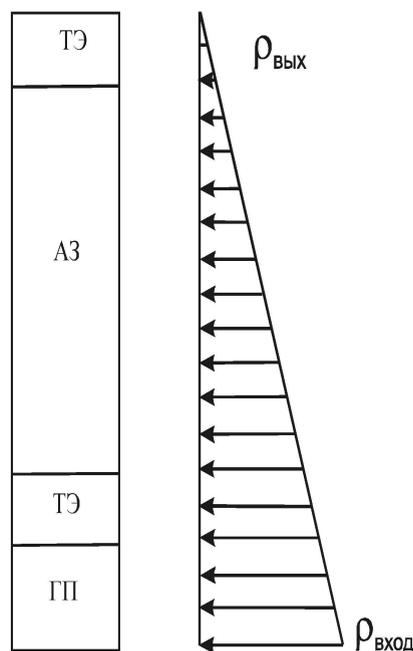


Рис. 3. Схема давления в ТВС (ТЭ — торцевой экран, ГП — газовая полость)

ляются постоянными. Каждая сборка ТВС перемещалась по каналам активной зоны с целью обеспечения устойчивой работы всего комплекса атомной станции.

Для упрощения анализа выделим две зоны: части чехла, расположенные ниже (зона I) и выше (зона II) центра активной зоны. В зоне I рабочие условия характеризуются ростом температуры и плотности потока нейтронов, но снижением давления теплоносителя. В зоне II температура по-прежнему растет, но снижаются уже два параметра: давление теплоносителя и плотность потока нейтронов. При проведении стандартных расчетов для определения рабочего ресурса металлоизделия температура считается одинаковой и постоянной по всему его объему, а расчет сводится к поиску наибольших напряжений. В нашем случае картина иная. Здесь мы имеем три переменных величины, что делает задачу трудно решаемой.

Приведенный параметр Θ позволяет учесть влияние всех трех рабочих характеристик. Для дальнейшего анализа рассмотрим напряженное состояние чехла во время работы. Выделим элементарную балку и для удобства рассмотрения представим ее так, как показано на рис. 4.

Точка A соответствует входу теплоносителя, и в ней распределенная нагрузка — максимальная, а точка B — выход теплоносителя, в котором распределенную нагрузку примем равной 0. Для определения напряжений построим эпюры нагрузки Q и изгибающих моментов M . Их расчет проводился на базе теории сопротивления материалов в соответствии с [8].

Для определения нормальных напряжений по высоте сечения, соответствующего этой точке, воспользуемся уравнением

$$\sigma = \frac{Mz}{J}, \quad (1)$$

где σ — нормальное напряжение; M — момент сил; z — расстояние от нейтральной оси; J — момент инерции сечения относительно нейтральной оси.

$$J = \int_F z^2 dF, \quad (2)$$

где dF — элементарная площадь исследуемого сечения. Для прямоугольного сечения решением интеграла будет уравнение

$$J = \frac{bh^3}{12}, \quad (3)$$

где b и h — соответственно ширина и высота сечения.

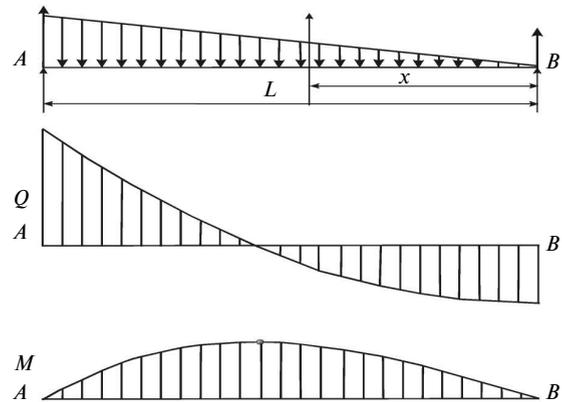


Рис. 4. Распределение давления по высоте чехла и эпюры нагрузок Q и моментов M

Размеры элементарной балки примем следующими: длина чехла — 2500 мм, сечение — шириной 1 мм и высотой 2 мм (толщина стенки чехла). Подставляя принятые значения в полученные уравнения, рассчитаем величины нормальных напряжений по всей длине балки. В графическом виде они представлены на рис. 5.

В простых координатах график нелинеен, имеет максимум. Важно, что он смещен относительно центра активной зоны, где плотность нейтронного потока наибольшая и, следовательно, наибольшая скорость набора дозы. Кроме того, график несимметричен относительно точки максимума. Возможной причиной является несимметричность ТВС, о которой говорилось выше.

Необходимо отметить, что полученные таким образом величины напряжений должны быть отнесены к элементарной балке, вырезанной из середины грани. Расчеты изменения напряжений по ширине грани были проведены согласно [6] с учетом формы шестигранника. Качественный вид эпюры моментов показан на рис. 6.

График нелинеен, имеет особые точки. В точках M и L изгибающие моменты принимают максимальные значения с разными знаками, а в точках N величина изгибающих моментов равна нулю. Эта эпюра моментов использовалась для определения растягивающих напряжений по ширине грани. Распределение напряжений по ширине чехла в соответствии с уравнением (1) отражает рис. 7.

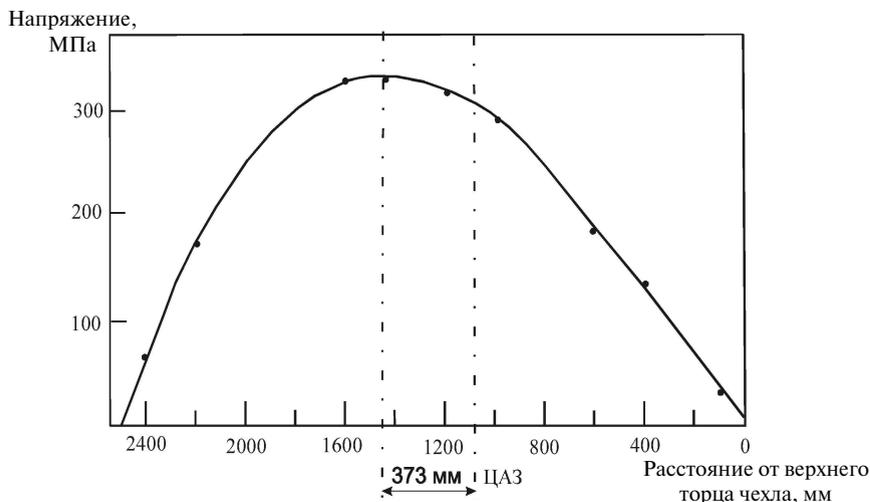


Рис. 5. Распределение максимальных растягивающих напряжений в чехле по высоте. Отметка 0 соответствует верхнему торцу чехла

Рассмотрим его подробнее. Важно отметить, что максимальные напряжения по ширине чехла имеют место непосредственно по центру грани. По центру грани напряжения — растягивающие и остаются такими в интервале между точками *N*. Напряжения левее и правее точек *N* — сжимающие. Приведенный график характеризует величину напряжений по ширине грани на отметке -373 мм от центра активной зоны. На других отметках график имеет качественно такой же вид, но численные значения максимальных напряжений уменьшаются по мере удаления от отметки -373 мм. Существует мнение, что в формировании радиационных эффектов плотность $\dot{\epsilon} = B' \exp(-Q / RT)$ нейтронного потока является

доминирующей. Выявленное смещение максимума говорит о некорректности данного утверждения. Следует учитывать воздействие всех рабочих параметров (температура, напряжение, плотность нейтронного потока, доза облучения).

Из проведенного расчета напряжений следует, что критическим из исследованных сечений следует считать на отметке -373 мм от центра активной зоны. Это было бы верным при условии постоянства других рабочих параметров. В случае, когда переменными являются три характеристики, необходимо ввести в рассмотрение приведенный параметр Θ , который был получен в результате анализа экспериментальных и теоретических данных:

$$\dot{\epsilon} = B' \exp(-Q / RT), \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}$ — скорость ползучести; B' — предэкспоненциальный коэффициент; Q — энергия активации; R — постоянная Больцмана; T — температура испытания.

Для проведения количественных расчетов по формуле (4) необходимо знать энергию активации Q . Весьма важно установление вида зависимости энергии активации от параметров испытания. Этот вопрос обсуждался в научной литературе с давних времен [9–11], но к окончательному мнению исследователи еще не пришли. В некоторых случаях предлагалось считать полученные экспериментально значения энергии активации условными. В настоящее время считается наиболее точным уравнение вида

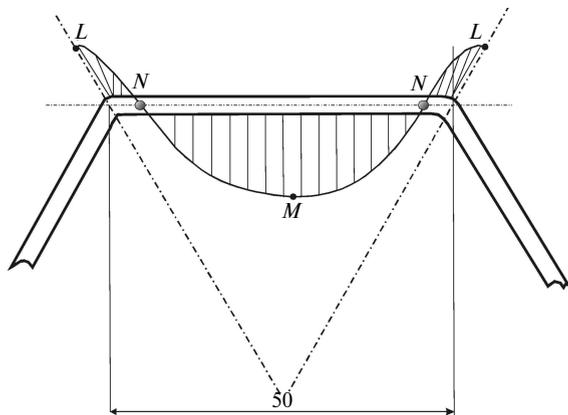


Рис. 6. Распределение изгибающего момента по ширине грани чехла

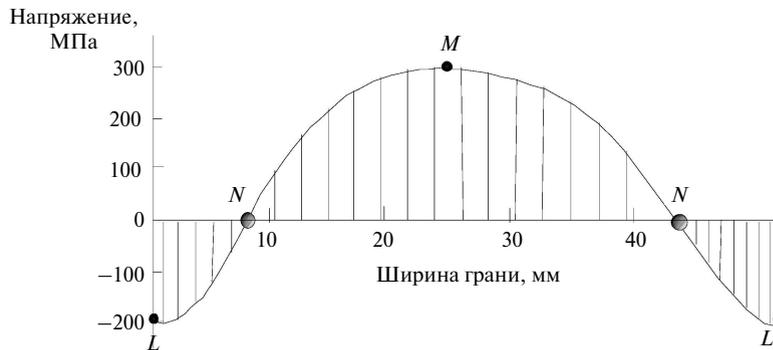


Рис. 7. Распределение напряжений по ширине грани чехла ТВС реактора на быстрых нейтронах БН-350

$$Q = Q_0 \left[1 - (\tau / \tau_0)^p \right]^q, \quad (5)$$

где τ_0 — критическое напряжение сдвига при $T = K$; p и q — показатели степени (для ГЦК-металлов они примерно равны единице).

Но уравнение (5) может быть изменено. Поскольку в данном случае речь идет о растягивающих напряжениях, то касательные напряжения τ целесообразно заменить на нормальные (растягивающие) напряжения σ , а τ_0 — на предел текучести $\sigma_{0,2}$. Корректность такой замены обоснована теорией сопротивления материалов, из которой следует, что и нормальные (σ), и касательные (τ) напряжения являются производной одних и тех же приложенных к образцу сил (или силы).

Тогда выражение Журкова для Q преобразуется к виду

$$Q = Q_0 \left(1 - \eta \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right), \quad (6)$$

где η — числовой коэффициент.

Для продолжения анализа деформационного поведения исследованных материалов обратимся еще раз к уравнению (4), из которого следует, что скорость ползучести на установившейся стадии является функцией температуры. Но очевидно, что одни и те же по величине температуры и их градиенты, а также напряжения оказывают разное воздействие на разные материалы. Для одного материала они могут оказаться столь большими, что приведут к его мгновенному разрушению, а для другого столь малыми, что не вызовут сколь-либо заметной пластической деформации. Поэтому зачастую для сравнения деформационного поведения разных материалов используют гомологическую тем-

пературу, $T/T_{пл}$. Исходя из этого введем в анализ температуру плавления, умножив числитель и знаменатель выражения в скобках уравнения (4) на $T_{пл}$. При этом получим

$$\dot{\epsilon} = B' \exp \left(- \frac{Q}{R} \frac{1}{T_{пл}} \frac{T_{пл}}{T} \right). \quad (7)$$

С учетом (6)

$$\dot{\epsilon} = B' \exp \left[\left(- \frac{Q_0}{R} \frac{1}{T_{пл}} \left(1 - \eta \frac{\sigma_d}{\sigma_{0,2}} \right) \frac{T_{пл}}{T} \right) \right]. \quad (8)$$

Для упрощения выражения (8) примем $Q_0/T_{пл} = W$. Тогда

$$\dot{\epsilon} = B' \exp \left[\left(- \frac{W}{R} \left(1 - \eta \frac{\sigma_d}{\sigma_{0,2}} \right) \frac{T_{пл}}{T} \right) \right]. \quad (9)$$

Таким образом, в уравнении (9) мы имеем дело уже с приведенной, или нормированной, температурой. Далее наряду с обратной гомологической температурой, $T_{пл}/T$, для упрощения сравнительного анализа деформационного поведения разных металлических материалов и поиска взаимосвязи между длительными и кратковременными механическими свойствами введем нормированное напряжение, равное отношению рабочего напряжения к пределу текучести, $\sigma_d/\sigma_{0,2}$. Эта величина также входит в уравнение (9). Видно, что в него в явном виде входят скорость ползучести, температура испытания и плавления, напряжение и предел текучести.

Далее рассмотрим два случая. Будем считать напряженность постоянной, т. е. $\sigma_d/\sigma_{0,2} = \text{const}$. Тогда величиной постоянной будет и

$$\beta = \frac{W}{R} \left(1 - \eta \frac{\sigma_d}{\sigma_{0,2}} \right). \quad (10)$$

С учетом этого выражение (9) запишется в виде

$$\dot{\epsilon} = B' \exp\left(\left[-\beta \frac{T_{\text{пл}}}{T}\right]\right). \quad (11)$$

Уравнение (11) отражает зависимость скорости ползучести от температуры при постоянном нормированном напряжении.

Далее рассмотрим случай, когда постоянной является температура испытания и, следовательно, $T_{\text{пл}}/T = \text{const}$. Тогда

$$\varphi = \frac{W}{R} \frac{T_{\text{пл}}}{T} \quad (12)$$

будет также величиной постоянной. С учетом этого запишем

$$\dot{\epsilon} = B' \exp(-\varphi) \exp\left(\varphi \eta \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{0,2}}\right). \quad (13)$$

Принимая для упрощения выражения (13)

$$B^* = B' \exp(-\varphi), \quad (14)$$

$$\gamma = \varphi \eta, \quad (15)$$

получим

$$\dot{\epsilon} = B^* \exp\left(\gamma \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{0,2}}\right). \quad (16)$$

Это уравнение описывает зависимость скорости ползучести на установившейся стадии от приведенного напряжения при постоянной нормированной температуре.

Совместное решение уравнений (11) и (16) после ряда несложных преобразований дает следующее выражение:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon'_0 \exp\left[-\alpha \left(\frac{T_{\text{пл}}}{T} \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{0,2}}\right)\right]. \quad (17)$$

Выражение включает в себя скорость ползучести на установившейся стадии, температуры плавления и испытания, напряжение и предел текучести и указывает на явную взаимосвязь между перечисленными характеристиками. Для упрощения примем

$$\left(\frac{T_{\text{пл}}}{T} \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{0,2}}\right) = \theta, \quad (18)$$

где θ — приведенный параметр. Этот параметр использовался для определения наиболее опасного сечения ТВС.

За исходные данные примем: предел текучести $\sigma_{0,2} = 520$ МПа, температуру плавления $T_{\text{пл}} = 1800$ К. Зависимость приведенного параметра от высоты активной зоны показана на рис. 8. На ней имеется минимум, который не совпадает с критическим сечением. Он приходится на отметку около -150 мм от центра активной зоны. Минимальное значение приведенного параметра означает, что в этом сечении скорость ползучести имеет наибольшее значение.

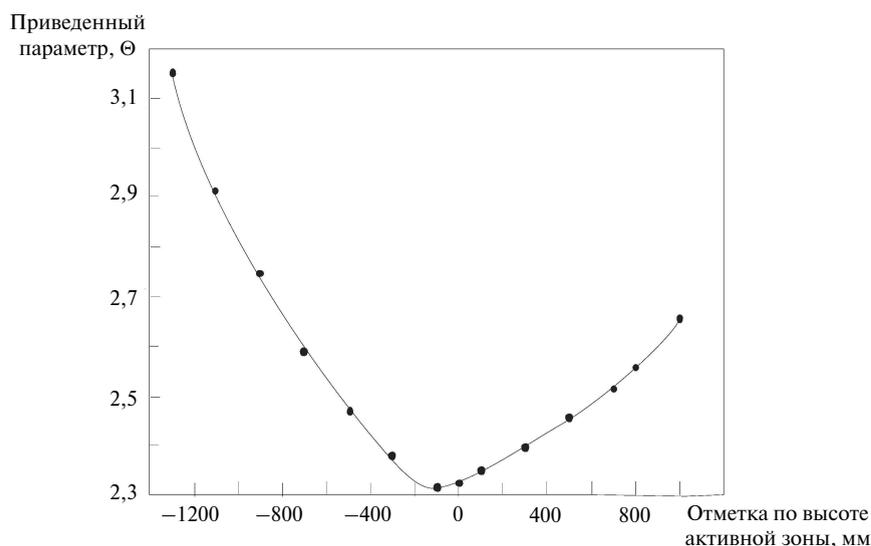


Рис. 8. Зависимость приведенного параметра Θ от высоты активной зоны атомного реактора

Длительность безопасной эксплуатации может быть легко рассчитана по уравнению

$$\tau = \varepsilon / \dot{\varepsilon}_{\text{ср}}, \quad (19)$$

где τ — расчетный рабочий ресурс металлоизделия; ε — допустимая деформация; $\dot{\varepsilon}_{\text{ср}}$ — средняя скорость ползучести.

Таким образом, график на рис. 8 дает наглядное представление о том, что использование приведенного параметра позволяет достаточно просто решить сложную задачу по определению критического сечения изделия, для случая, когда рабочие условия неодинаковы.

Проведенные исследования показали, что тепловыделяющая сборка атомного реактора на быстрых нейтронах БН-350 характеризуется слож-

ными условиями эксплуатации, когда каждый элементарный объем изделия подвергается отличающимся по величине воздействиям температуры, напряжения и плотности потока нейтронов.

Использование приведенного параметра при анализе выявило критическое сечение чехла ТВС, которое располагается ниже центра активной зоны и в котором в наибольшей степени вероятно его разрушение.

В работе получен график, отражающий изменение приведенного параметра по высоте чехла. Нелинейный вид полученной зависимости позволяет сделать обоснованное предположение, что причиной неравномерного изменения формы и размеров ТВС являются различия в условиях эксплуатации каждого элементарного объема изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. 128 с.
2. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб: Наука, 2006. 363 с.
3. **Колбасников Н.Г., Шукин С.В., Кондратьев С.Ю.** Образование новых границ механизм релаксации внутренних напряжений // Известия АН СССР. Металлы. 1990. № 5. С. 86–91.
4. **Фукус М.Д., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П.** Длительная прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2012. № 4 (159). С. 92–96.
5. **Чумаков Е.В.** Приведенные параметры ползучести металлов и сплавов // Материалы Международной научной конференции «Состояние и перспективы развития механики и машиностроения в Казахстане», Т. II, Алматы, 2007, Т. II. С. 202–207.
6. **Чумаков Е.В.** Применимость приведенных параметров к оценке скорости ползучести при переменных рабочих условиях // Вестник КазАТК. 2008. № 1. С. 114–119.
7. **Чумаков Е.В.** Реакторная и термическая ползучесть металлов и сплавов. Теория и эксперимент // Материалы III-й Межд. конф. «Ядерная и радиационная физика», Т. II, Алматы, 2001. С. 510–522.
8. **Забудько Л.М., Лихачёв Ю.И., Прошкин А.А.** Работоспособность ТВС быстрых реакторов // Физика и техника ядерных реакторов. Вып. 35. М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.
9. **Регель В.Р., Слущкер А.И., Томашевский Э.В.** Кинетическая природа прочности твердых тел. М: Наука, 1974. С. 560–566.
10. **Журков С.Н.** Проблема прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1957. № 11. С. 78–82.
11. **Фрост Г.Дж., Эшби М.Ф.** Карты механизмов деформации. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1989. 328 с.

REFERENCES

1. **Kondratiev S.Iu.** Mekhanicheskiye svoystva metall-ov: uchebnoye posobiye. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2011. 128 s. (rus.)
2. **Kolbasnikov N.G., Kondratiev S.Iu.** Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov. SPb: Nauka, 2006. 363 s. (rus.)
3. **Kolbasnikov N.G., Shchukin S.V., Kondratiev S.Iu.** Obrazovaniye novykh granits mekhanizm relaksatsii vnutrennikh napryazheniy // Izvestiya AN SSSR. Metally. 1990. № 5. S. 86–91. (rus.)
4. **Fuks M.D., Oryshchenko A.S., Kondratiev S.Iu., Anastasiadi G.P.** Dlitelnaya prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2 // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 4 (159). S. 92–96. (rus.)
5. **Chumakov Ie.V.** Privedennyye parametry polzuchesti metallov i splavov // Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya mekhaniki i mashinostroyeniya v Kazakhstane», Т. II, Almaty, 2007, Т. II. S. 202–207. (rus.)

6. **Chumakov Ie.V.** Primenimost privedennykh parametrov k otsenke skorosti polzuchesti pri peremennykh rabochikh usloviyakh // Vestnik KazATK. 2008. № 1. S. 114–119. (rus.)

7. **Chumakov Ie.V.** Reaktornaya i termicheskaya polzuchest metallov i splavov. Teoriya i eksperiment // Materialy III-y Mezhd. konf. «Yadernaya i radiatsionnaya fizika», T. II, Almaty, 2001. S. 510–522. (rus.)

8. **Zabudko L.M., Likhachev Iu.I., Proshkin A.A.** Rabotosposobnost TVS bystrykh reaktorov // Fizika i

tekhnika yadernykh reaktorov. Vyp. 35. M.: Energoatomizdat, 1988. 168 s.

9. **Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevskiy E.V.** Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel. M: Nauka, 1974. S. 560–566. (rus.)

10. **Zhurkov S.N.** Problema prochnosti tverdykh tel // Vestnik AN SSSR. 1957. № 11. S. 78–82. (rus.)

11. **Frost G.Dzh., Eshbi M.F.** Karty mekhanizmov deformatsii. Chelyabinsk: Metallurgiya, Chelyabinskoye otdeleniye, 1989. 328. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЧУМАКОВ Евгений Васильевич — кандидат физико-математических наук доцент кафедры материаловедения Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: chumakov.ev@mail.ru

AUTHOR

CHUMAKOV Evgenii V. — Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev. 22. Satpayev Str. Almaty. 050013. Kazakhstan. E-mail: chumakov.ev@mail.ru