

УДК 621.039.531, 621.039.586

В.В. Светухин, А.С. Кадочкин, В.Д. Рисованный, Н.С. Крестина

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ВЫХОДА ГЕЛИЯ ИЗ ОБЛУЧЕННОГО ПОРОШКА КАРБИДА БОРА ПОД ОБОЛОЧКУ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА РЕАКТОРА ВВЭР<sup>1</sup>

**Светухин Вячеслав Викторович**, доктор физико-математических наук, окончил физико-технический факультет Ульяновского государственного университета. Директор Научно-исследовательского технологического института Ульяновского государственного университета. Имеет статьи в области физики полупроводников, физического материаловедения. [e-mail: slava@sv.uven.ru].

**Кадочкин Алексей Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, окончил физико-технический факультет Ульяновского государственного университета, доцент кафедры «Радиофизика и электроника» УлГУ. Имеет статьи в области физического материаловедения, оптики, радиационного материаловедения. [e-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru].

**Рисованный Владимир Дмитриевич**, доктор технических наук, окончил металлургический факультет Уральского политехнического института. Заместитель директора ОАО «ГНЦ Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград. Имеет статьи и монографии в области реакторного материаловедения, создания новых перспективных поглощающих материалов и органов регулирования ядерных реакторов с повышенными эксплуатационными характеристиками. [e-mail: ris@niiar.ru].

**Крестина Наталья Сергеевна**, окончила физико-математический факультет Ульяновского государственного педагогического университета, аспирант УлГУ по специальности «Физика конденсированного состояния вещества». Имеет статьи в области физического материаловедения. [e-mail: krestinan@ulsu.ru].

### Аннотация

В работе предложена математическая модель для расчета давления гелия, вышедшего из облученного порошкового карбида бора под оболочку поглощающего элемента (ПЭЛ) водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР). Создан комплекс программ для моделирования поведения гелия в поглощающем элементе в условиях проектной аварии типа LOCA.

Ключевые слова: реактор ВВЭР, поглощающий элемент, карбид бора, авария типа LOCA.

**Viacheslav Viktorovich Svetukhin**, Doctor of Physics and Mathematics, graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; Director of the Research Technological Institute at Ulyanovsk State University; author of articles in the field of semiconductor physics, physical material science. e-mail: slava@sv.uven.ru.

**Alexey Sergeevich Kadochkin**, Candidate of Physics and Mathematics, graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; Associate Professor at the Chair 'Radiophysics and Electronics' of Ulyanovsk State University; author of articles in the field of physical material science, optics, radiative study of materials. e-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru.

**Vladimir Dmitrievich Risovany**, Doctor of Engineering, graduated from the Metallurgical Faculty of Ural Polytechnic Institute; Deputy Director General at JSC 'State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors' in Dimitrovgrad; author of articles and monographs in the field of reactor material science and creation of new absorbing materials and control systems for nuclear reactors of enhanced operation characteristics. e-mail: rvd@niiar.ru.

**Natalia Sergeevna Krestina**, graduated from the Faculty of Physics and Mathematics of Ulyanovsk State Pedagogic University; post-graduate student in the profession 'Physics of Condensed State of Substance'; author of articles in the field of physical material science. e-mail: krestinan@ulsu.ru.

### Abstract

The paper suggests a mathematical model to calculate the pressure of helium released from irradiated boron carbide powder under the shell of absorbing rod in VVER. A software suite to simulate the behavior of helium in absorbing rod in a designed LOCA-type failure has been created.

Key words: VVER, absorbing rod, boron carbide, LOCA-type failure.

<sup>1</sup> Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, проект № 2010-218-01-013.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в реакторах ВВЭР в качестве поглощающего элемента широко используется порошок карбида бора. Карбид бора относят к структурно-чувствительным материалам, поэтому количественные характеристики радиационного повреждения карбида бора зависят от многих технологических факторов, что обуславливает большое разнообразие получаемых экспериментальных результатов при облучении.

Основным фактором, ограничивающим работоспособность ПЭЛ на основе виброуплотненного порошка карбида бора, является повышенное газовое давление под оболочкой вследствие интенсивного выделения гелия из частиц порошка в результате реакций ( $n, \alpha$ ) на изотопе  $^{10}B$ . При больших сроках службы ПЭЛ оно может создавать существенные напряжения в оболочке и при определенных условиях может превысить критическое значение, определяемое прочностью оболочки и внешним давлением со стороны теплоносителя. До недавнего времени отсутствовала методика расчета распределения давления гелия под оболочкой ПЭЛ как в номинальных, так и в аварийных режимах эксплуатации.

Для выбора критериев работоспособности ПЭЛ необходимо знать распределение в нем давления по высоте как в номинальных условиях эксплуатации, так и в условиях проектных аварий. Данная работа посвящена разработке математической модели, позволяющей рассчитывать давление газа в любой точке ПЭЛ. Алгоритм решения задачи приведен на рисунке 1. На основании разработанной модели реализовано программное обеспечение для расчета давления внутри ПЭЛ.

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ**

Выход гелия в газосборник можно разбить на две стадии: термодесорбция гелия из порошка карбида бора и просачивание выделившегося гелия через порошок в газосборник. Для описания просачивания газа через порошок сердечник ПЭЛ использовалось уравнение фильтрации Дарси [1]. При этом газ считался идеальным, коэффициент проницаемости и пористость порошка считались постоянными вдоль ПЭЛ. Кроме того, было сделано предположение о том, что течение газа сквозь порошок карбида бора является вязким. В рамках принятых допущений уравнение Дарси имеет следующий вид:

$$\frac{RT}{M} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K}{\eta} \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \gamma = \phi \frac{\partial p}{\partial t}, \tag{1}$$

- где  $\rho$  – плотность газа;
- $\eta$  – вязкость газа;
- $T$  – температура;
- $M$  – молярная масса газа;
- $R$  – универсальная газовая постоянная;
- $K$  – коэффициент проницаемости;
- $\phi$  – пористость порошка карбида бора;
- $\gamma$  – газовыделение.

В данной работе температура  $T$  считается известной функцией времени и задается в предположении, что температуры газа и порошка равны. В этом случае уравнение состояния газа имеет вид:

$$p(x, t) = \frac{RT(t)}{M} \rho(x, t). \tag{2}$$

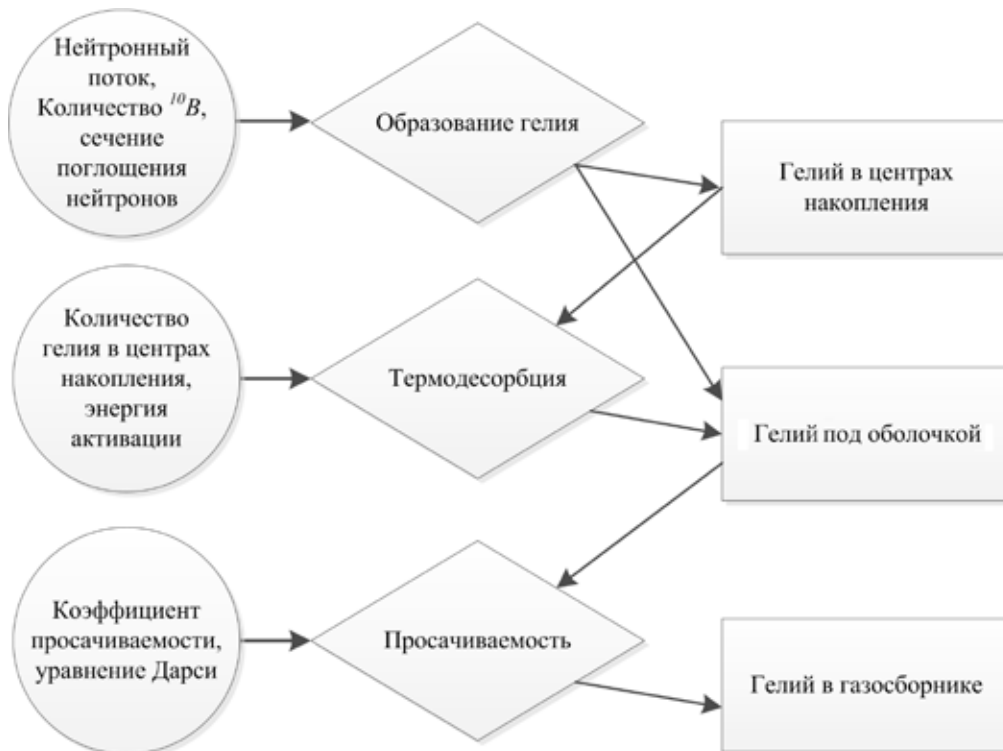


Рис. 1. Алгоритм решения. Левая колонка – входные параметры, средняя – процессы в порошквом наполнителе ПЭЛ, правая – локализация радиогенного гелия

В качестве зависимости вязкости гелия от температуры взято соотношение, наиболее часто применяющееся в технических расчетах [2]:

$$\eta(x, t) = \eta_0 \left( \frac{T(x, t)}{T_0} \right)^\lambda, \quad (3)$$

где  $\eta_0 = 1,86 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  
 $T_0 = 273,15$  К;  
 $\lambda = 0,6722$ .

Поскольку при выгорании 1 г изотопа  $^{10}B$  образуется 0,4 г гелия, то зависимость  $\gamma(x, t)$ , описывающая газовыделение в единице объема порошка в единицу времени, определяется следующим выражением:

$$\gamma(x, t) = 0,4\alpha(1 - \varphi)\rho_B G(x) \frac{dy}{dt}, \quad (4)$$

где  $\alpha = 0,1435$  – естественное содержание изотопа  $^{10}B$ ;

$\rho_B$  – плотность массивного карбида бора;

$G(x)$  – выгорание изотопа  $^{10}B$ ;

$y$  – доля гелия, вышедшего в межзеренное пространство, определяемая уравнением:

$$\frac{dy}{dt} = (1 - y)g(T), \quad (5)$$

где  $g(T) = g_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$ ,

где  $E_a$  – энергия активации;

$g_0$  – кинетический параметр.

Тогда решением уравнения (5) является:

$$y = 1 - \exp\left[-g_0 t \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)\right]. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (2) при использовании решения уравнения (1) и выражений (3)–(6) позволяет определить давление гелия в произвольной точке ПЭЛ в любой момент времени. При этом неопределенными оказываются три параметра: коэффициент проницаемости  $K$ , энергия активации центра накопления гелия  $E_a$  и кинетический параметр  $g_0$ .

Для определения коэффициента проницаемости порошка карбида бора был проведен ряд экспериментов с отработавшими определенное время поглощающими элементами (таблица 1). Исследование параметров просачивания гелия через порошок карбида бора производилось путем прокалывания оболочки ПЭЛ. Измерения объема выделившегося при проколе оболочки гелия проводили для двух ПЭЛ, работавших в режиме аварийной защиты,

Таблица 1

Основные характеристики исследованных ПЭЛ

| Характеристика ПЭЛ и режим эксплуатации                  | ПЭЛ АЗ<br>Калининской<br>АЭС | ПЭЛ АР<br>Балаковской<br>АЭС |
|--|------------------------------|------------------------------|
| Время облучения в реакторе:<br>календ., сут. эффект, сут | 2464<br>1804                 | 680<br>551                   |

и трех ПЭЛ, работавших в режиме автоматического регулирования. На рисунке 2 приведена зависимость объема вышедшего газа от времени. Система уравнений (1)–(6) решалась численно, при этом коэффициент проницаемости  $K$  определялся из условия наилучшего совпадения с экспериментальными зависимостями. Коэффициент проницаемости составил для ПЭЛ, работавших в режиме аварийной защиты величину  $K = 3,5-4,0 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>, а для ПЭЛ, работавших в режиме автоматического регулирования, –  $K = 1,3-2,5 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>.

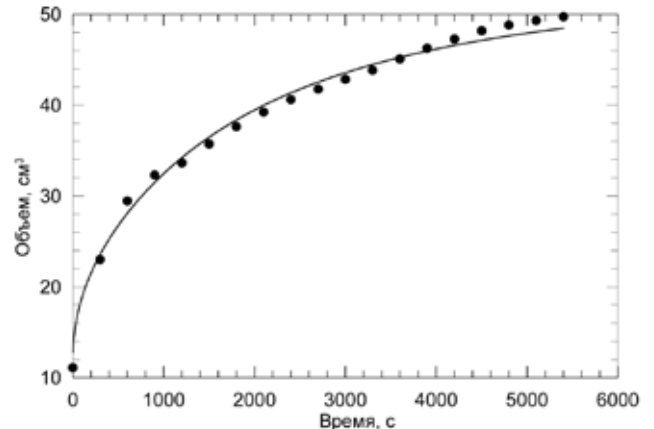


Рис. 2. Эксперимент по проколу ПЭЛ. Зависимость объема вышедшего гелия от времени. ПЭЛ АР № 18.

Точки – экспериментальные данные

При моделировании эксперимента по проколу ПЭЛ после эксплуатации использовались граничные условия следующего вида:

- первое граничное условие  $\frac{\partial p}{\partial x}(0, t) = 0$ , что означает отсутствие течения у нижнего конца ПЭЛ;

и

- второе граничное условие определялось из условия сохранения массы газа в замкнутом объеме:

$$\varphi S \int_0^L p(x) dx + p(L, t) = p_0(\varphi SL + V_g),$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника;

$L$  – длина порошкового сердечника;

$V_0$  и  $V_g$  – объемы измерительной системы и газосборника ПЭЛ.

В данном эксперименте использовались следующие значения этих величин:  $S = 0,38$  см<sup>2</sup>,  $L = 370$  см,  $V_0 = 140,23$  см<sup>3</sup>.

Коэффициент проницаемости  $K$  был оценен нами также теоретически. Из теории проницаемости Козени-Кармана [1] для проницаемости следует соотношение:

$$K = B \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi) S_p^2}, \quad (7)$$

где  $S_p$  – удельная поверхность порошка,

$B$  – константа Козени, принятым значением которой является  $B = 0,2$  [1].

Предполагая в качестве оценки, что частицы порошка имеют сферическую форму и одинаковый размер, удельную поверхность сердечника можно представить в виде:

$$S_p = \frac{6(1-\phi)}{d}, \quad (8)$$

где  $d$  – средний диаметр частиц порошка.

Тогда из (7) и (8) получим для  $K$ :

$$K = B \frac{\phi^3 d^2}{36(1-\phi)^3}. \quad (9)$$

Если для оценки принять использованное значение пористости  $\phi = 0,305$ , а диаметр частиц порошка  $d = 5$  мкм [3, 4], то для проницаемости получим значение  $K = 1,2 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>, что по порядку величины совпадает с экспериментальным значением проницаемости, полученным для ПЭЛ, работавших в режиме аварийной защиты.

Для определения значений  $E_a$  и  $g_0$  в работе [5] был предложен метод, позволяющий получать эти параметры из экспериментальной зависимости скорости термодесорбции от температуры при линейном нагреве [6] (рис. 3). Предложенная в [5] модель дает следующие выражения для скорости термодесорбции  $dN/dT$  и кинетического параметра  $g_0$ :

$$\frac{dN}{dT} = N(T_0) \frac{E_a}{kT_{max}^2} \exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{max}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \times \exp\left\{-\frac{E_a T}{kT_{max}^2} \exp\left(\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{max}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right\} \times \exp\left\{\frac{E_a^2}{k^2 T_{max}^2} Ei\left(1, E_a/kT\right) \exp\left(\frac{E_a}{kT_{max}}\right)\right\}, \quad (10)$$

$$g_0 = \beta \frac{E_a}{kT_{max}} \exp\left(\frac{E_a}{kT_{max}}\right),$$

где  $T_{max}$  – температура максимума;

$Ei(l, x)$  – функция Эйри;

$\beta$  – скорость нагрева.

Выражение (10) наиболее удобно для описания эксперимента, так как температуру максимума несложно определить по экспериментальным данным, даже в случае близко расположенных максимумов, единственным подгоночным параметром при этом будет энергия активации.

Пик, наблюдающийся при более низкой температуре (100–150°C), удовлетворительно описывается формулой (10) с  $E_a = 0,23$  эВ. Высокотемпературный пик (800–1000°C) имеет сложную структуру и удовлетворительно описывается в предположении, что состоит из двух пиков с энергиями активации  $E_a = 0,65$  эВ и  $E_a = 0,75$  эВ. Таким образом, в накоплении гелия участвуют три типа дефектов, пики, им соответствующие, обозначены на рисунке 3 буквами *A*, *B* и *C*. Сплошная линия на рисунке 3 соответствует суммарной скорости выделения гелия из центров

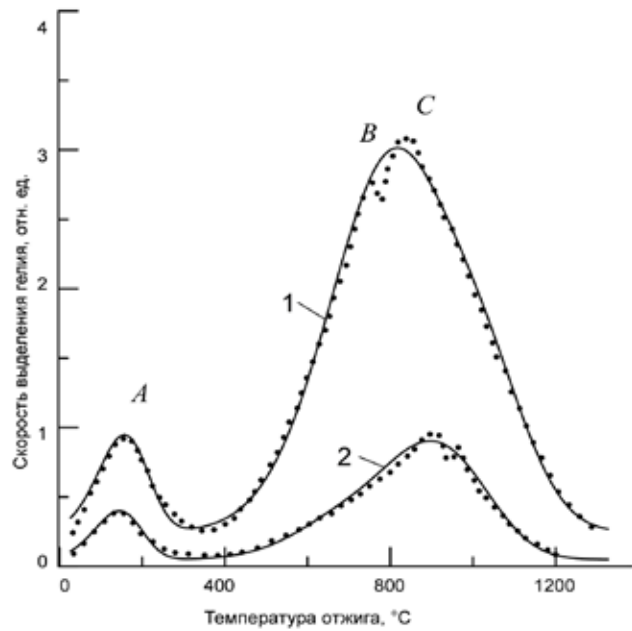


Рис. 3. Спектры термодесорбции гелия из облученного карбида бора при флюенсе  $9 \cdot 10^{19}$  (1) и  $1,2 \cdot 10^{19}$  (2) нейтронов/см<sup>2</sup> [3]. Сплошные линии – расчет

накопления всех трех типов, с указанными выше энергиями активации, расчет скорости выделения для каждого из центров проводился с помощью выражения (10).

Близкие значения энергии активации и близкий температурный интервал разрушения дефектов типа *B* и *C* позволяют сделать предположение об их родственной структуре. Скорее всего, эти центры имеют одинаковый состав, но различаются размером или пространственным расположением. В этом предположении можно не разделять центры накопления гелия *B* и *C* и говорить о дефектах одного типа, характеризующегося энергией активации, лежащей в диапазоне 0,65–0,75 эВ. Значение кинетического параметра  $g_0$  для низкотемпературного центра типа *A* составляет согласно (10)  $1,1 \text{ с}^{-1}$ , а для центров *B* и *C* лежит в диапазоне  $1,5\text{--}2,0 \text{ с}^{-1}$ .

### ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ

Для расчета изменения давления гелия вдоль поглощающего сердечника при аварийном нагреве ПЭЛ, в случае потери теплоносителя (максимальная проектная авария типа LOCA) была создана компьютерная программа, в которой система уравнений (1)–(6) решалась методом конечных элементов.

Для проведения численных расчетов уравнение (1) представлено в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\phi \eta} \frac{\partial}{\partial x} \left( p \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{\phi} \frac{RT}{M} \gamma. \quad (11)$$

Производные по времени и координате имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \rightarrow \frac{p(t + \Delta t) - p(t)}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( p \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \rightarrow \frac{p(i+1) - p(i)}{\Delta x};$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \rightarrow \frac{p(i+1) - 2p(i) + p(i-1)}{\Delta x^2};$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 &\rightarrow \left( \frac{p(i+1) - p(i)}{\Delta x} \right)^2 = \\ &= \frac{p^2(i+1) - 2p(i+1)p(i) + p^2(i)}{\Delta x^2}; \end{aligned}$$

тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( p \frac{\partial p}{\partial x} \right) &\rightarrow \frac{p^2(i+1) - 2p(i+1)p(i) + p^2(i)}{\Delta x^2} + \\ &+ p(i) \frac{p(i+1) - 2p(i) + p(i-1)}{\Delta x^2} = \\ &= \frac{1}{\Delta x^2} \{ p^2(i+1) - p^2(i) - p(i)[p(i+1) - p(i-1)] \}. \end{aligned}$$

Длина ПЭЛ разбивается на  $N$  участков,  $i$  – номер участка разбиения.

Тогда разностная схема для уравнения (11) запишется в виде:

$$\begin{aligned} p(i, t + \Delta t) &= p(i, t) + \frac{K}{\phi \eta} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \times \\ &\times \{ p^2(i+1, t) - p^2(i, t) - p(i, t) \times \\ &\times [p(i+1, t) - p(i-1, t)] \} + \frac{1}{\phi} \frac{RT}{M} \gamma(i, t), \end{aligned}$$

Граничные условия

$$\frac{\partial p}{\partial x}(0, t) = 0,$$

$$\phi S \int_0^L p(x) dx + p(L, t) = p_0(\phi SL + V_g)$$

реализуются в виде:

$$p(2, t) = p(1, t),$$

$$p(N, t) = p(N, 0) +$$

$$+ \phi p(1, 0) \frac{SL}{V} - \phi \frac{S}{V} \sum_j p(j, t) \Delta x.$$

#### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для моделирования поведения гелия под оболочкой ПЭЛ было разработано следующее программное обеспечение:

1) Программа для расчета спектров термодесорбции гелия в облученных материалах по предложенной мето-

дике [5] написана на языке программирования Delphi 5.0 (рис. 4). Расчет выполняется по вышеуказанному алгоритму. Программное обеспечение позволяет определять кинетические параметры спектров и делать предположение о центрах накопления гелия в облученных материалах. С помощью данного программного продукта было обработано большое количество спектров термодесорбции, а также была создана база данных спектров облученных материалов.

2) Программа для моделирования давления выхода гелия из облученных материалов по предложенной методике, представленная в модели выхода газа из ПЭЛ, написана на языке программирования Delphi 5.0 (рис. 5). Расчет выполняется по вышеуказанному алгоритму. Программное обеспечение позволяет дать информацию о поведении выхода газа. Входным параметром модели является зависимость температуры от времени, которая определяется через кинетические показатели и задается полиномом. Данное программное обеспечение позволяет рассчитать давление по длине ПЭЛ при разном времени, а также давление внизу ПЭЛ. С помощью данного программного продукта была смоделирована проектная авария типа LOCA.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ ТИПА LOCA

При моделировании проектной аварии предполагалось, что стержни управления и защиты сброшены и реактор заглушен. Однако топливные сборки разогреваются из-за остаточного энерговыделения, тем самым нагревая ПЭЛ. По имеющимся литературным данным, температура на поверхности тепловыделяющего элемента реактора ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя составляет величину порядка 600 градусов, поэтому при проведении расчетов полагалось, что выделение гелия связано с центрами  $B$  и  $C$ , а низкотемпературный центр типа  $A$  вклада в газовыделение не вносит. Очевидно, что для поверхности ПЭЛ указанная температура является завышенной, и данный режим можно использовать как модельный для достаточно консервативной оценки.

Поскольку максимальное выгорание и, следовательно, газовыделение из порошка соответствует нижней части ПЭЛ, то и максимальное давление также будет внизу ПЭЛ. Полученные в расчетах результаты зависимости максимального давления от времени, прошедшего с начала аварии, приведены на рисунке 6, из которого видно, что при постоянной температуре давление гелия под оболочкой ПЭЛ растет линейно, что обусловлено слабой зависимостью газовыделения  $\gamma$  от времени. При уменьшении температуры давление также резко уменьшается. Это связано с тем, что в данной модели теплопроводность порошка карбида бора считается достаточно большой, и это приводит к тому, что температура меняется одновременно по всему объему ПЭЛ. Со снижением максимальной температуры нагрева облученных ПЭЛ в аварийном режиме величина максимального давления под оболочкой ПЭЛ существенно уменьшается. Это связано с тем, что гелий за время аварии не успевает полностью выйти из гранул порошка.

При нормальных условиях эксплуатации через канальные трубы, в которых находятся ПЭЛ, протекает те-

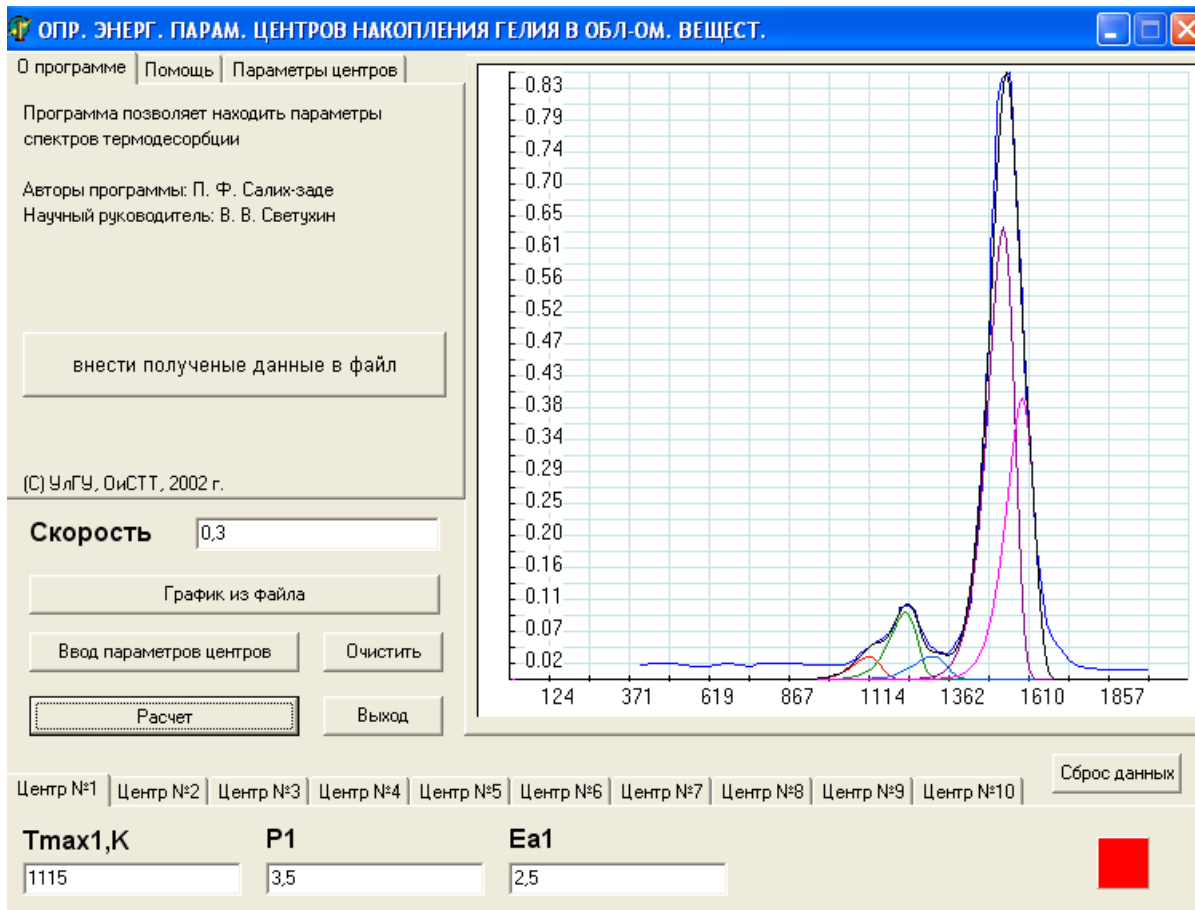


Рис. 4. Программа для исследования термодесорбции гелия из облученных материалов

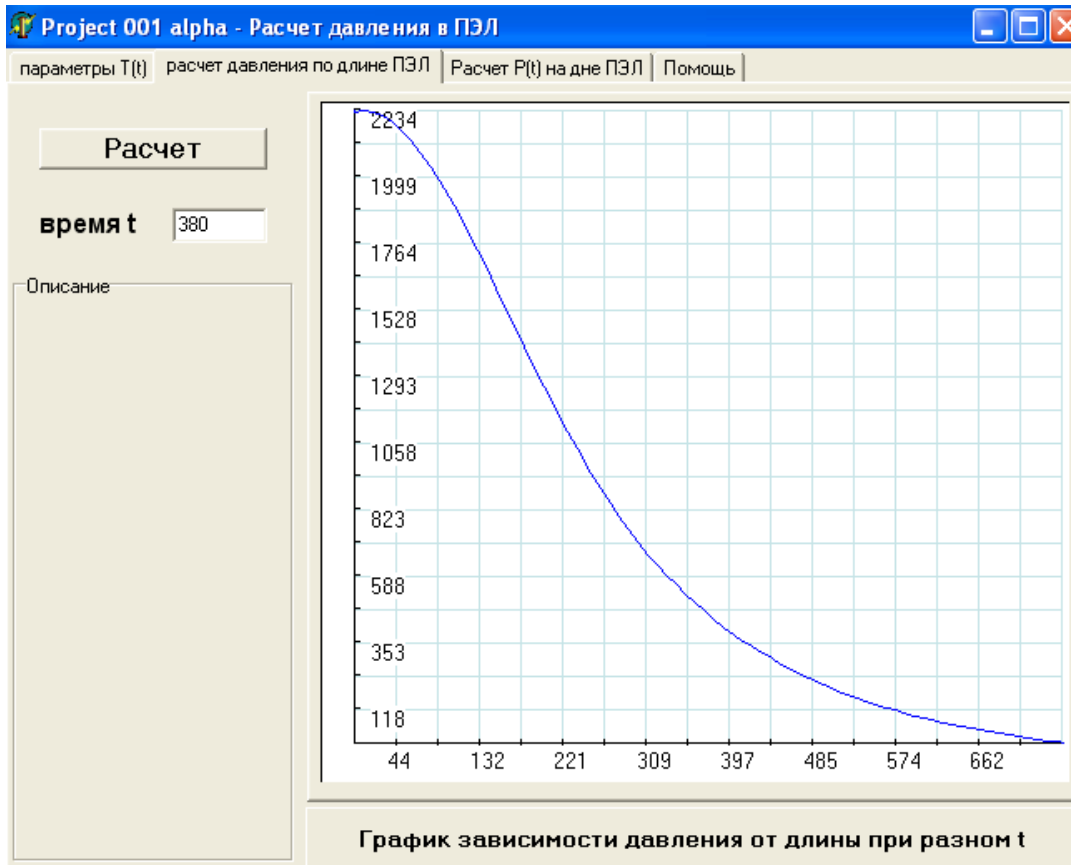


Рис. 5. Программа для моделирования давления выхода гелия из облученных материалов

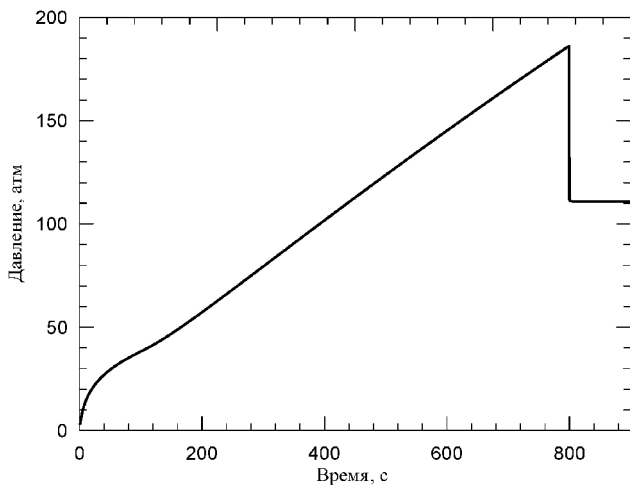


Рис. 6. Зависимость давления гелия на дне ПЭЛ от времени в условиях проектной аварии типа LOCA

плоноситель (вода), давление которого составляет примерно 15 МПа при температуре около 300°C. Поэтому для оценочных расчетов величину 15 МПа можно считать критическим значением давления внутри ПЭЛ. Согласно произведенным расчетам (рис. 6), давление внизу ПЭЛ при достаточно большом времени аварии может существенно превышать 15 МПа. На рисунке 7 представлена диаграмма время – температура, которая показывает, за какое время при данной температуре достигается указанное критическое давление. Данная зависимость позволяет определить безопасное время воздействия высокой температуры на ПЭЛ, которое по расчетам составляет величину от порядка одной минуты при температуре 900°C до получаса при температуре порядка 500°C.

#### Заключение

В данной работе при помощи численного моделирования с использованием экспериментальных данных нами была определена проницаемость порошка карбида бора для ПЭЛ аварийной защиты и автоматического регулирования. Также были определены параметры, характеризующие выход гелия из зерен порошка карбида бора при различных температурах. Кроме того, найдено соот-

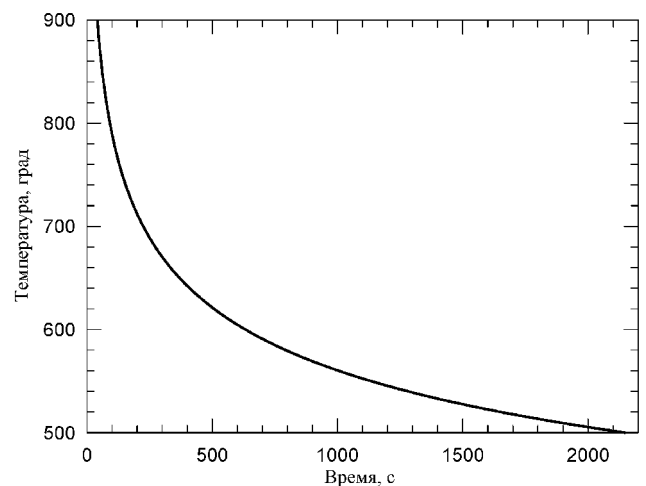


Рис. 7. Безопасное время воздействия высокой температуры на ПЭЛ

ношение критических параметров температура – время воздействия, определяющих безопасный режим эксплуатации ПЭЛ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной лит-ры, 1960. – 255 с.
2. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей. – М.: Физматгиз, 1959.
3. Tanaka K., Suzuki M., Kojima M., Akimoto Y. Preparation of B<sub>4</sub>C compact // Summary Report Meeting of Specialists on Development and Application of Absorber Materials. Dimitrovgrad: RIAR, 1973, pp. 159–176.
4. Уплотнение карбида бора при горячем прессовании / И.Т. Остапенко [и др.] // Порошковая металлургия. – 1979. – № 5. – С. 38–43.
5. Светухин В.В. Определение энергетических параметров центров накопления гелия в облученном карбиде бора по спектрам термодесорбции // Письма в журнал технической физики. – 2002. – Т. 29, вып. 4. – С. 52–57.
6. Ковыршин В.Р. Выделение гелия при нагреве облученного карбида бора // Атомная энергия. – 1982. – Т. 53, вып. 2. – С. 112–113.