

М.П. Гусев, В.Л. Данилов

**РЕЛАКСАЦИЯ ПРУЖИН ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ**

Разработана математическая модель для расчета релаксации силы сжатия пружины, работающей в условиях высокой температуры и нейтронного потока, которая находится в головной части тепловыделяющей сборки. Проведено сравнение результатов расчета с решением задачи в расчетном комплексе ANSYS. На основе математической модели создан модуль для определения эксцентриситета сжимающей сборку силы.

E-mail: gusev.m.p@yandex.ru; vldanilov@mail.ru

Ключевые слова: релаксация пружины, тепловыделяющая сборка, нейтронное облучение.

Условия работы тепловыделяющей сборки (ТВС) (рис. 1) атомного реактора (высокая температура, нейтронное облучение) таковы, что неизбежно возникает релаксация усилий в нагруженных узлах ТВС: в пружинном блоке и в дистанционирующих решетках, контактирующих с тепловыделяющими элементами (твэлами). Поскольку пружинный блок, расположенный в головной части ТВС, служит для удерживания сборки от всплытия в потоке теплоносителя, то релаксация пружин, находящихся в пружинном блоке, может привести к потере работоспособности ТВС [1]. Целью данной работы является описание математической модели для расчета релаксации пружины, сравнение результатов расчета модели с вычислениями, проведенными в комплексе ANSYS, и расчет эксцентриситета сжимающей сборку силы на основе математической модели.

Математическая модель задачи релаксации пружины основана на конечно-разностной интерпретации феноменологического закона ползучести [2, 3]:

$$\xi_{e,c} = a_c (\sigma_e)^{n_c} \left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_\xi} \exp \frac{Q_\Phi}{R_g T_a} \right), \quad (1)$$

где $\xi_{e,c}$ — интенсивность скорости деформации ползучести; σ_e — интенсивность напряжений; a_c , n_c , Φ_ξ — экспериментальные коэффициенты; Φ — флюкс нейтронов, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; R_g — универсальная газовая постоянная, Дж · К/моль; T_a — температура активной зоны в атомном реакторе, К; Q_Φ — коэффициент, Дж · К/моль.

Релаксация силы сжатия в пружине происходит за счет релаксации напряжений в ее витках. Согласно соотношению (1), определен-

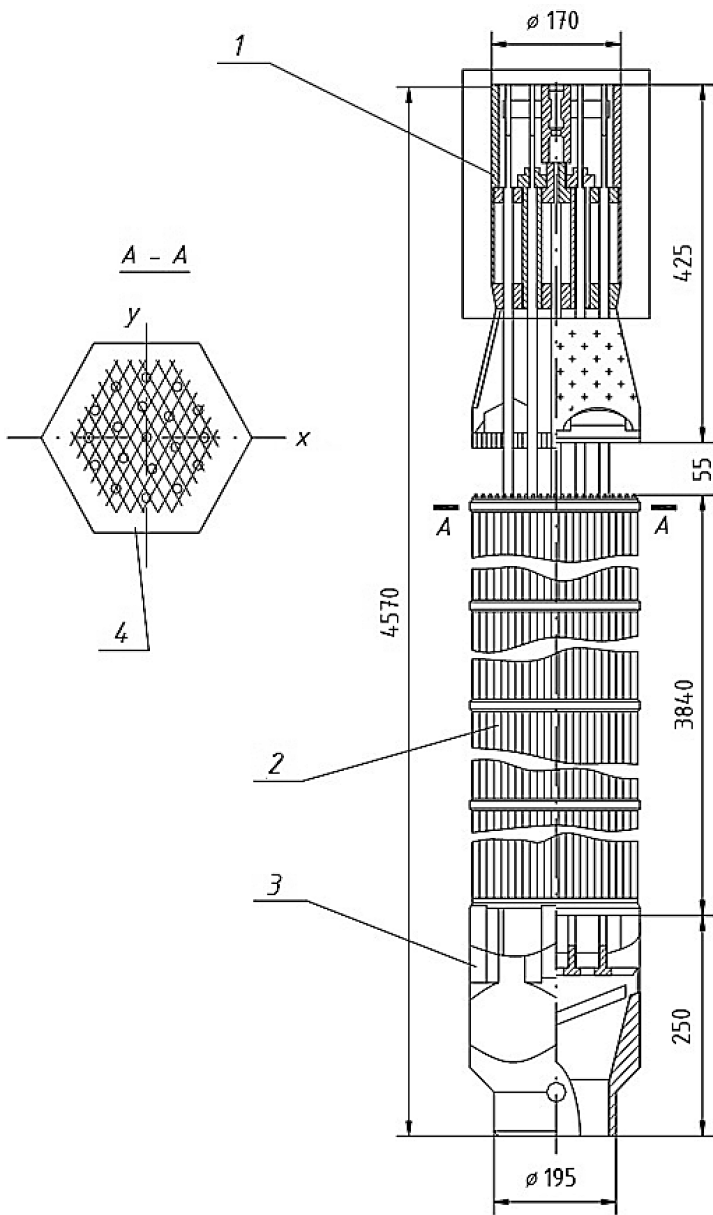


Рис. 1. Общий вид тепловыделяющей сборки:

1 — головка ТВС; 2 — топливная сборка; 3 — хвостовик ТВС; 4 — решетка дистанционирующая

ный уровень напряжений σ_e в витке пружины вызывает накопление деформаций ползучести, характеризующихся интенсивностью скорости деформаций ползучести $\xi_{e,c}$. По мере накопления деформаций ползучести уменьшаются упругие деформации и интенсивность напряжений σ_e снижается.

Начальный уровень напряжений в витках пружины рассчитываем исходя из упругого состояния сжатия пружины (рис. 2). Пружина нагружена по торцам сжимающей силой P . Существует однозначная связь между геометрическими параметрами пружины (углом наклона витков α , диаметром пружины D) и сжимающей силой [1]:

$$P = \frac{4GJ_p \cos \alpha}{D} \left(\frac{\sin \alpha \cos \alpha}{D} - \frac{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0}{D_0} \right) - \frac{4EJ_y \sin \alpha}{D} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{D} - \frac{\cos^2 \alpha_0}{D_0} \right), \quad (2)$$

где индекс 0 соответствует недеформированному состоянию пружины.

Внутренние силовые факторы в пружине определяем методом сечений, они связаны с сжимающей силой P и крутящим моментом m :

$$\begin{aligned} M_z &= m \sin \alpha + \frac{PD}{2} \cos \alpha; \\ M_y &= m \cos \alpha - \frac{PD}{2} \sin \alpha; \\ Q_y &= P \cos \alpha; \\ N_z &= P \sin \alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_z — крутящий момент; M_y — изгибающий момент; Q_y — поперечная сила; N_z — нормальная сила. Здесь также учтен крутящий момент m на торцах пружины, возникающий при запрете их поворота (см. рис. 2).

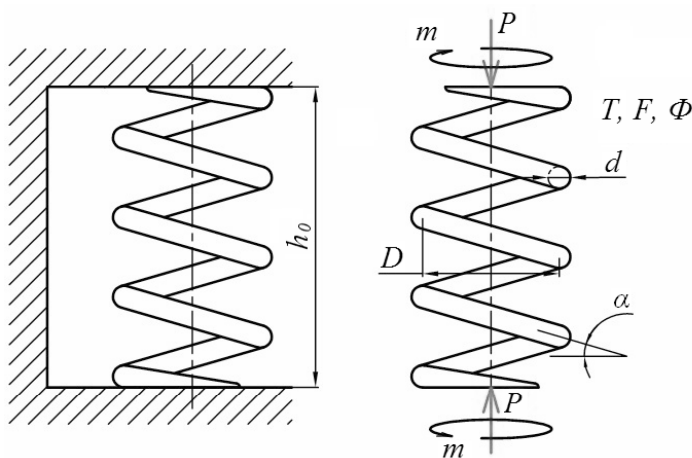


Рис. 2. Схемы закрепления и нагружения пружины

Напряженное состояние пружины определяется касательными τ_{zx} и τ_{zy} и нормальным σ_z напряжениями. Компоненты напряжения τ_{zx} и τ_{zy} находятся в соотношении с полным касательным напряжением τ :

$$\begin{cases} \tau_{zx} = \tau \cos \varphi, \\ \tau_{zy} = \tau \sin \varphi, \end{cases} \quad (4)$$

где угол φ отвечает полярной системе координат, связанной с сечением витка пружины.

Выразим зависимость между напряжениями σ и τ и интенсивностью напряжений для случая совместного кручения и изгиба:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (5)$$

Формулы перехода от интенсивности скорости деформаций ползучести $\xi_{e,c}$ к линейным скоростям ξ^c и η^c , согласно [2], имеют вид

$$\xi^c = \frac{\xi_e^c}{\sigma_e} \sigma; \quad \eta^c = 3 \frac{\xi_e^c}{\sigma_e} \tau. \quad (6)$$

Условием релаксации является равенство скоростей кручения и кривизны винтовой оси пружины нулю. Это условие запишем для деформаций каждой i -й, j -й точки сечения витка пружины (рис. 3):

$$\varepsilon_c^{i,j} + \varepsilon_e^{i,j} = \varepsilon_0^{i,j} = \text{const}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_c^{i,j}$ — деформация ползучести, соответствующая номерам i -й, j -й области сечения; $\varepsilon_e^{i,j}$ — упругая деформация, соответствующая номерам i -й, j -й области сечения; $\varepsilon_0^{i,j}$ — начальная деформация, неизменяемая во времени.

Записывая соотношение (7) в дифференциальной форме и используя конечно-разностное представление по времени, получаем следующие зависимости релаксации:

$$\begin{aligned} \sigma_k^{i,j} &= \sigma_{k-1}^{i,j} - \xi_{k-1}^{i,j} E \Delta t_k; \\ \tau_k^{i,j} &= \tau_{k-1}^{i,j} - \eta_{k-1}^{i,j} G \Delta t_k, \end{aligned} \quad (8)$$

где Δt_k — текущий шаг по времени.

Выражения (8) связывают напряжения на следующем и на предыдущем шагах. Скорости линейной и сдвиговой деформаций ползучести $\xi_{k-1}^{i,j}$ и $\eta_{k-1}^{i,j}$ вычисляем по напряжениям на предыдущем

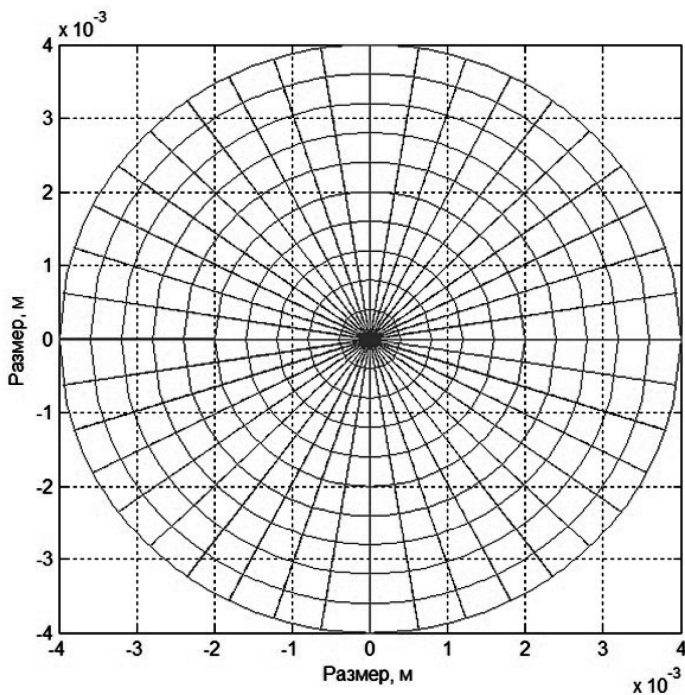


Рис. 3. Разбиение сечения витка пружины

шаге в соответствии с зависимостями (1) и (6). Начальные значения напряжений находим по упругому состоянию пружины. Интегрируя текущие значения напряжений по сечению, определяем величины внутренних силовых факторов, через которые устанавливаем текущее значение силы сжатия пружины. Накопление деформаций ползучести определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,k}^{i,j} &= \varepsilon_{c,k-1}^{i,j} + \xi_{k-1}^{i,j} \Delta t_k; \\ \gamma_{c,k}^{i,j} &= \gamma_{c,k-1}^{i,j} + \eta_{k-1}^{i,j} \Delta t_k, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varepsilon_{c,k-1}^{i,j}$ и $\gamma_{c,k-1}^{i,j}$ — накопленные деформации ползучести на предыдущем шаге.

С помощью данных соотношений можно найти изменения начальных размеров пружины после ее разгрузки.

На основе приведенного алгоритма расчета разработана программа в среде MATLAB, позволяющая получать кривые релаксации силы сжатия при различных геометрических параметрах пружины и разных температурных и нейтронных воздействиях.

Для проверки работы алгоритма и программы расчета был выполнен расчет релаксации пружины с помощью конечно-элементного комплекса ANSYS. На рис. 4 представлена конечно-элементная мо-

дель пружины. Условия закрепления и нагружения пружины заданы из требования тождественности начальных состояний обеих расчетных моделей.

Для сравнения на рис. 5 показаны результаты конечно-элементного расчета 1 и расчета пружины на основе разработанного алгоритма 2. Расчет выполнен по следующей программе нагружения. На первом этапе проведено сжатие на 15 мм с выдержкой в течение 4 000 ч; на втором — дополнительное сжатие на 1 мм, общая осадка составила 15+1=16 мм, время выдержки 4 000 ч; на третьем этапе — 16 + 1 = 17 мм, время 4 000 ч; на четвертом — 17 + 1 = 18 мм, выдержка в течение 6 000 ч.

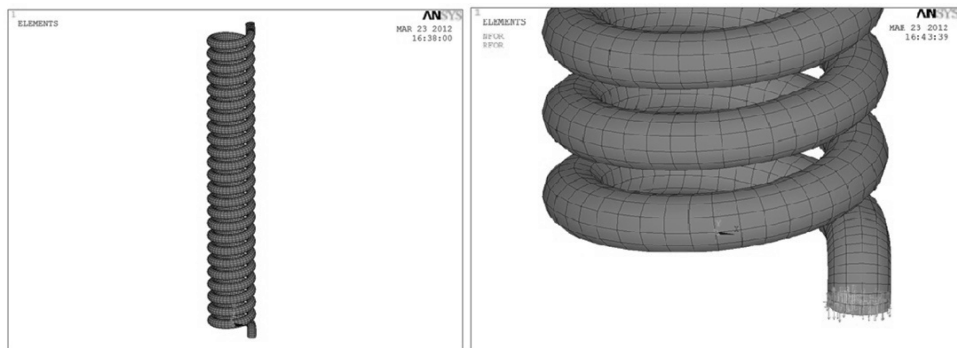


Рис. 4. Конечно-элементная модель пружины

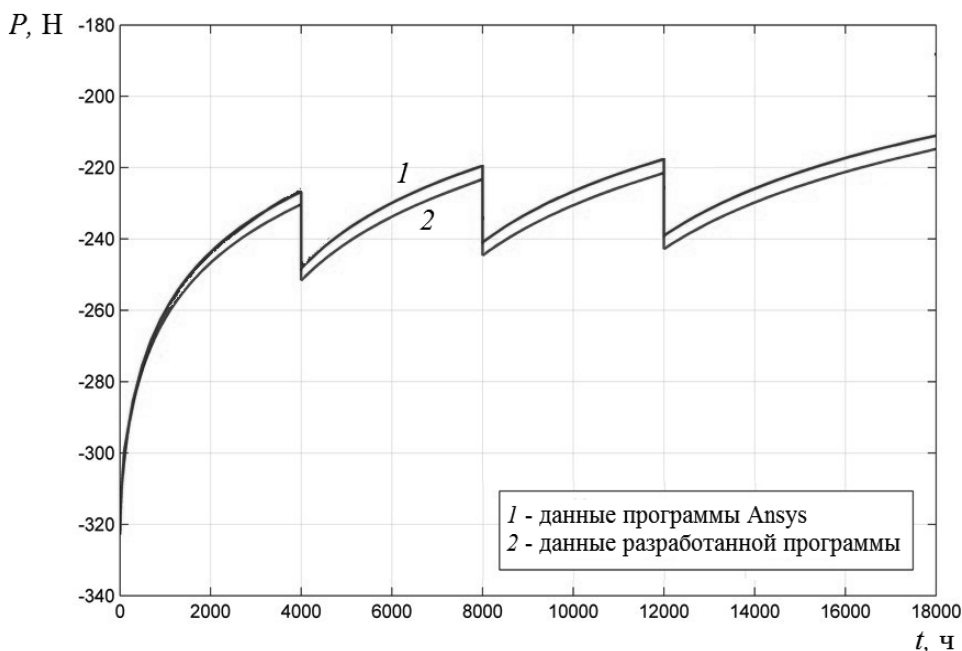


Рис. 5. Результаты решения задачи

Сопоставляя результаты решения задачи по двум моделям, видим, что релаксация, полученная по разработанной программе, несколько завышена по сравнению с результатом решения задачи с помощью ANSYS. Однако общий вид кривых одинаковый, и можно утверждать, что алгоритм разработанной программы построен и реализован верно. Завышенное значение релаксации приводит к более безопасной оценке ресурса работы пружины.

На основе созданной математической модели релаксации силы сжатия пружины разработан алгоритм расчета смещения равнодействующей сжимающей ТВС силы. Поскольку в пружинном блоке ТВС расположено 18 пружин (рис. 6), то можно предположить, что из-за градиента температур и различного флюкса нейтронов релаксация силы сжатия в каждой пружине идет по-разному. Различия в релаксациях, в свою очередь, приводит к смещению равнодействующей сжимающей сборку силы. Наличие эксцентриситета равнодействующей силы может вызвать искривление ТВС.

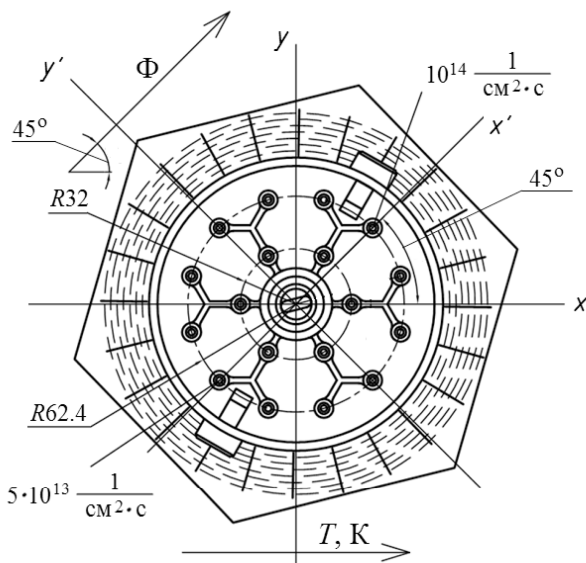


Рис. 6. Действие различных температурных условий и флюкса нейтронов в сечении ТВС

При расчете эксцентриситета предполагалось, что на ТВС действуют совместно градиент температур и градиент нейтронного потока (см. рис. 6). Эксцентриситет равнодействующей силы определяем по формулам

$$a_x = \frac{\sum_{i=1}^k (F_i x_i)}{\sum_{i=1}^k F_i}; \quad a_y = \frac{\sum_{i=1}^k (F_i y_i)}{\sum_{i=1}^k F_i}, \quad (10)$$

где a_x и a_y — координаты смещения точки приложения равнодей-

ствующей силы в осях OXY (см. рис. 6); F_i — сжимающая сила i -й пружины; x_i и y_i — координаты расположения пружин в системе координат OXY ; k — число пружин в головке ТВС.

Результат определения эксцентриситета равнодействующей силы представлен на рис. 7. Максимальный эксцентриситет составляет $\sim 9,5$ мм.

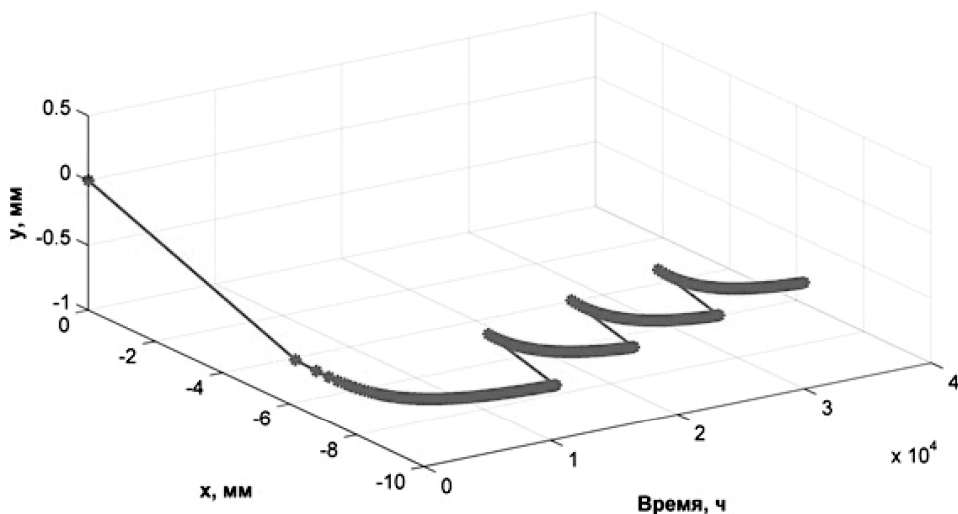


Рис. 7. Смещение точки приложения равнодействующей силы во времени вследствие различных температурных условий и нейтронного потока

Наличие смещения равнодействующей сжимающей сборки силы приводит к внецентренному сжатию сборки, что, в свою очередь, может вызвать нежелательное искривление ТВС. Вследствие искривления ТВС нарушается нормальная работа реактора: объекты регулирования системы управления и защиты не погружаются полностью в направляющих каналах до своих проектных положений, также происходит образование увеличенных водяных зазоров между узлами ТВС, что приводит к изменению водоурановых соотношений в активной зоне и локальным всплескам энерговыделения в топливе [4].

Выводы

1. Разработана математическая модель для расчета релаксации силы сжатия в пружинном блоке ТВС.

2. Сравнение результатов расчета релаксации пружины по разработанной модели и в промышленном комплексе ANSYS показало адекватность разработанной модели и возможность ее применения для последующего анализа релаксации пружинного блока ТВС.

3. Разработан модуль для определения эксцентриситета равнодействующей сжимающей сборку силы. Расчет максимального смещения силы от геометрического центра оси ТВС показал, что эксцентриситет силы возрастает во времени и может привести к искривлению ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев М.П., Данилов В.Л. Релаксационная стойкость винтовой цилиндрической пружины в условиях нейтронного облучения // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2012. – № 10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/402924.html>
2. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. – М.: Мир, 1986. – 360 с.
3. Киселевский В.Н. Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении. – Киев: Наук. думка, 1977. – 246 с.
4. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Общая постановка исследований термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 3. – С. 33–43.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012