



**ГУСЕВ**  
Михаил Павлович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**GUSEV**  
Mikhail Pavlovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**ДАНИЛОВ**  
Владимир Львович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**DANILOV**  
Vladimir Lvovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

## Анализ эксцентриситета силы пружинного блока тепловыделяющей сборки

**М.П. Гусев, В.Л. Данилов**

*Искавление тепловыделяющей сборки атомного реактора является одной из серьезных проблем атомной энергетики и может повлечь за собой аварийную ситуацию на атомной электростанции. Однако причины, вызывающие искавление тепловыделяющей сборки, в настоящее время изучены не полностью. В данном исследовании выявлена одна из возможных причин искавления тепловыделяющей сборки — ее внецентренное сжатие, вследствие процессов релаксации, возникающих в пружинах блока, и вызывающих эксцентриситет силы пружинного блока. Разработана математическая модель, определяющая параметры внецентренного сжатия сборки: эксцентриситет силы, сжимающей сборку, и изгибающий момент. Исследование показало, что эксцентриситет силы, сжимающей сборку, и величина изгибающего момента значительны, и их влияние нельзя не учитывать при анализе искавления тепловыделяющей сборки.*

**Ключевые слова:** тепловыделяющая сборка, релаксация пружины, искавление тепловыделяющей сборки.

## Eccentricity Analysis of the Fuel Assembly Spring Cartridge Force

**M.P. Gusev, V.L. Danilov**

*Fuel assembly bow of a nuclear reactor is one of the major problems of nuclear power engineering and can result in an emergency at a nuclear power plant. However, the causes of fuel assembly bow, currently not fully understood. This study identified a possible cause of fuel assembly bow as its eccentric compression due to relaxation processes occurring in the spring cartridge and causing eccentricity of the spring cartridge force. A mathematical model is worked up for determining the parameters of eccentric assembly compression: the force eccentricity compressing the assembly, and the bending moment. The study showed that the force eccentricity compressing the assembly, and the bending moment are significant, and their impact cannot be ignored when analyzing the fuel assembly bow.*

**Keywords:** fuel assembly, spring relaxation, fuel assembly bow.

**И**скавление тепловыделяющей сборки (ТВС) — одна из серьезных проблем, возникающих в результате работы атомного реактора. Данные о максимальном искавлении ТВС на Калининградской АЭС представлены на рис. 1 [1].

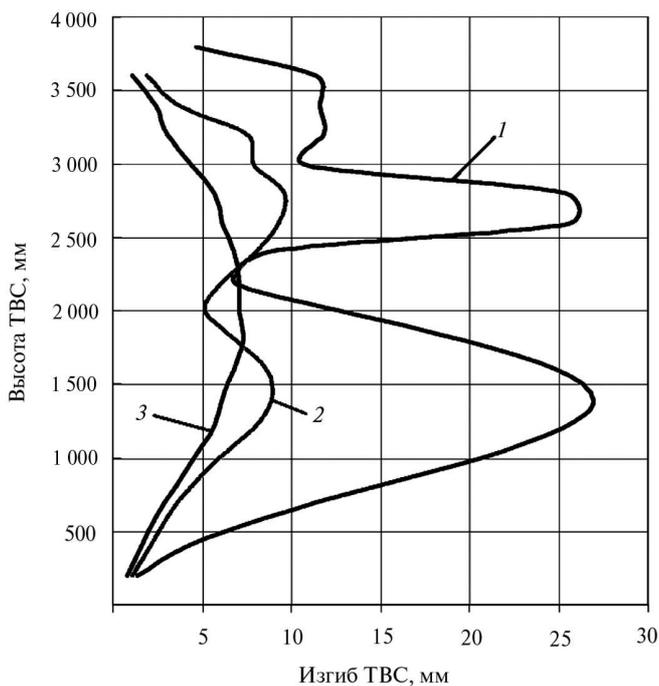


Рис. 1. Максимальное искривление ТВС, измеренное на Калининградской АЭС:

1 — 2003 г.; 2 — 2004 г.; 3 — 2005 г.

Кривая 1 на рис. 1 представляет измеренное искривление ТВС в 2003 г., когда в активную зону впервые было загружено 54 усовершенствованных ТВС, причем во время измерения не было ни одной усовершенствованной ТВС; кривая 2 — измерение искривления ТВС в 2004 г., когда в активной зоне уже присутствовало 54 усовершенствованных ТВС (В это время в активную зону загрузили еще 54 усовершенствованных ТВС); кривая 3 — измерение искривления ТВС в 2005 г., когда уже вся активная зона состояла из 108 усовершенствованных ТВС.

Искривление ТВС вызывает неполное погружение органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), что не позволяет осуществлять полный контроль ядерной реакции в активной зоне. Это одна из возможных причин аварийной ситуации на АЭС.

Проведенные исследования показывают, что процессы релаксации и возникающие деформации ползучести нагруженных компонентов ТВС являются причинами искривления сборки [2, 3].

В настоящей работе рассмотрено влияние пружинного блока, расположенного в головной части сборки, на нагружение ТВС. Пру-

жинный блок служит для удержания ТВС от всплытия в потоке теплоносителя. Каждая предварительно сжатая пружина в блоке подвержена действию высокой температуры и нейтронного потока. С течением времени сжимающая сила в пружине падает вследствие процесса релаксации напряжений в ней.

На основе феноменологического закона ползучести [4]

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

где  $\xi_{e,c}$  — интенсивность скорости деформации ползучести;  $\sigma_e$  — интенсивность напряжений, Па;  $a_c, n_c, \Phi_\xi$  — экспериментальные коэффициенты;  $\Phi$  — флюкс нейтронов,  $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;  $R_g$  — универсальная газовая постоянная, Дж·К/моль;  $T_a$  — температура элемент ТВС, К;  $Q$  — коэффициент, Дж/моль; была разработана математическая модель релаксации для отдельно взятой пружины [5]. В работе [5] также представлено сравнение результатов расчетов разработанной программы и промышленного комплекса Ansys 12. Сравнение результатов работы показало адекватность математической модели.

Для наилучшей оценки правильности работы программы было проведено сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными [6]. Экспериментальные данные были получены на основе испытаний пружин из стали 12Х18Н10Т на релаксацию при температуре 330 °С. Была реализована следующая программа испытаний: пружина помещалась в зажимное устройство и поджималась до заданной величины; в поджатом состоянии пружины выдерживались при заданной температуре в течении заданного времени в соответствии с программой испытаний; затем испытания останавливались, пружина освобождалась от нагрузки и проводился контрольный замер; при продолжении испытаний величина обжатия устанавливалась равной величине последнего замера.

В таблице приведены имеющиеся экспериментальные данные зависимости силы  $F$  от времени релаксации  $t$ .

Экспериментальные данные температурных испытаний пружин

Пружина 1		Пружина 2	
$t, \text{ч}$	$F, \text{Н}$	$t, \text{ч}$	$F, \text{Н}$
0	353	0	353
2 200	338	353	344
2 935	330	755	338
3 460	326	1 230	334
3 910	317	1 555	330
4 550	312	2 340	325
		3 075	321
		3 600	311
		5 035	302

Задача сравнения экспериментальных данных с расчетными сводилась к минимизации функции двух переменных

$$f(a_c, n_c) = \sum_{i=1}^N (F_i^{\text{э}} - F_i^{\text{р}}(a_c, n_c))^2 = \min,$$

где  $a_c, n_c$  — искомые параметры в температурном законе ползучести  $\xi_{e,c} = a_c (\sigma_e)^{n_c}$ , которые доставляют минимум функции;  $F_i^{\text{э}}$  — экспериментально полученные усилия сжатия пружины;  $F_i^{\text{р}}$  — расчетные усилия сжатия пружины, соответствующие по времени экспериментам;  $N$  — количество экспериментальных точек.

Проведенные расчеты и их сравнение с экспериментальными данными (рис. 2) показало, что разработанная модель правильно работает и способна реально отразить процессы ползучести и релаксации, возникающие в материале пружины, работающей при высокой температуре.

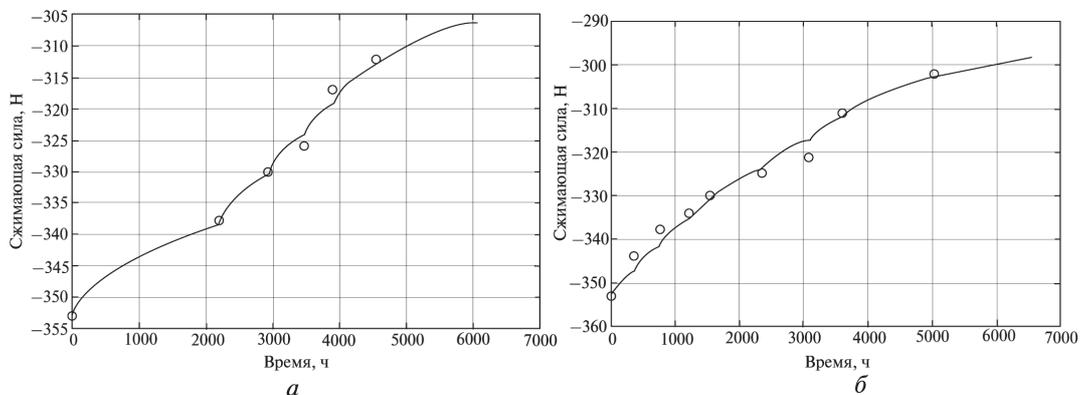


Рис. 2. Сравнение расчетных данных с экспериментальными:  
а — пружина 1; б — пружина 2; — — расчетная кривая; ○ — эксперимент

Пружинный блок, поджимающий ТВС, состоит из нескольких пружин. Сечение головки ТВС с расположением пружин представлено на рис. 3. В каждой пружине происходит релаксация напряжений и сжимающая сила в пружине падает. Поскольку релаксация напряжений в пружине зависит от ряда факторов, таких как температура и нейтронный поток, то снижение сжимающей силы происходит в каждой пружине по-разному, вследствие градиентов температурного и нейтронного полей.

В случае, когда релаксация сжимающей силы в каждой пружине протекает с различной скоростью, возникает смещение равнодействующей силы от геометрического центра сборки.

Расчет смещения точки приложения равнодействующей силы, т. е. ее эксцентриситет, проводился по формулам

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

где  $a_x$  и  $a_y$  — координаты смещения точки приложения равнодействующей силы в осях  $OXY$  (см. рис. 3);  $F_i$  — сжимающая сила  $i$ -й пружины в текущий момент времени  $t$ ;  $x_i$  и  $y_i$  — координаты расположения пружин в системе координат  $OXY$  (см. рис. 3);  $k$  — количество пружин в головке ТВС.

Влияние температурного воздействия, нейтронного потока и их совместное влияние на эксцентриситет точки приложения равнодействующей силы в зависимости от времени представлено на рис. 4.

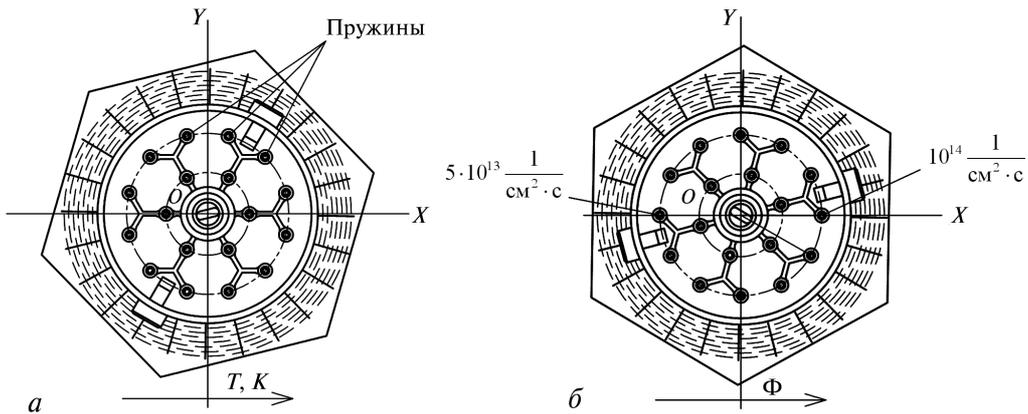


Рис. 3. Сечение головки ТВС:

*a* — воздействие температуры; *б* — воздействие нейтронного потока

На рисунке 4 видно, что наибольший вклад в величину эксцентриситета точки приложения равнодействующей силы вносит температурное воздействие. Совместное действие температуры и нейтронного потока повышает величину эксцентриситета. Значение максимального эксцентриситета достигает 9,5 мм.

Изменение во времени продольно-поперечного изгиба ТВС (см. рис. 4) равно произведению равнодействующей силы на величину эксцентриситета. Наибольший изгибающий момент возникает при совместном воздействии температурного и нейтронного потоков. Значение максимального изгибающего момента при этом достигает 16 Н·м. Со временем изгибающий момент падает.

Изгибающий момент, действующий на ТВС, очень незначителен, однако, действуя продол-

жительное время, он может вызвать заметные искривления ТВС.

### Выводы

1. Разработана математическая модель для релаксации силы в одной пружине и пружинном блоке в целом.

2. Проведено сравнение результатов работы программы с экспериментальными данными. Сравнение показало адекватность математической модели.

3. Исследовано влияние пружинного блока на нагружение ТВС. Выявлено наличие эксцентриситета равнодействующей сжимающей сборки силы и момента продольно изгибающего на ТВС, вследствие различных температурного и нейтронного потоков, действующих на каждую пружину в блоке. Значение максималь-

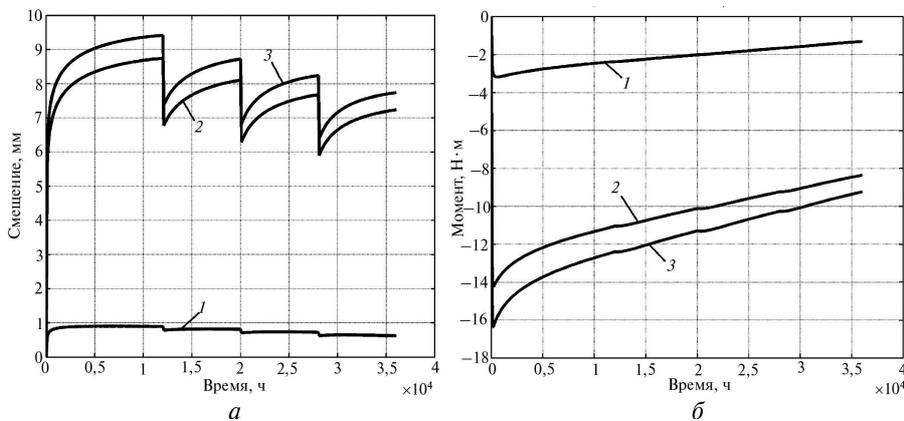


Рис. 4. Зависимость смещения точки приложения равнодействующей силы (*a*) и момента продольно-поперечного изгиба (*б*) от времени под воздействием:

1 — нейтронного потока; 2 — температуры; 3 — совместно температуры и нейтронного потока

ного эксцентриситета достигает 9,5 мм, а максимального изгибающего момента — 16 Н·м.

## Литература

1. Review of fuel failures in water cooled reactors. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 191 p.
2. *Бойл Дж., Спенс Дж.* Анализ напряжений в конструкциях при ползучести: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 360 с.
3. *Данилов В.Л., Зарубин С.В., Семишкин В.П.* Расчетно-теоретический анализ напряженно-деформированного состояния тепловыделяющей сборки ВВЭР-1000 // *Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*. Подольск, 2001.
4. *Киселевский В.Н.* Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении. Киев: Наук. думка, 1977. 101 с.
5. *Гусев М.П., Данилов В.Л.* Релаксация пружин головной части тепловыделяющей сборки // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2012. № 6. Спец. вып. Современные проблемы прикладной механики динамики и прочности машин. С. 139–148.
6. *Богомолова О.А., Енин А.А., Рожков В.В.* Экспериментальные исследования механических характеристик элементов, узлов и макетов ТВС с жестким каркасом в обоснование термомеханической стабильности ТВС в условиях эксплуатации // *Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*. Подольск, 2001.
7. *Mahmood, R., et al.* «Channel bow in boiling water reactors — hot cell examination results and correlation to measured bow», 2007 Int. LWR Fuel Performance Mtg, San Francisco, CA, 2007.
8. *Bibilashvili, Yu., et al.* «Operation experience of WWER fuel, including analysis of abnormal condition», Proc. 2nd Int. Sem. on WWER Reactor Fuel Performance, Modelling and Experimental Status, Sandanski, 1997, BAS, INRNE, Sofia (1997) 11.
9. *Jacobson, S., Francillon, E.* «Incomplete control rod insertion due to fuel element bow», Nuclear Fuel and Control rod: Operating Experience, Design Evolution and Safety Aspects, Madrid, 1996.
10. *Anderson, T.* «A decade of assembly bow management at Ringhals», Int. Mtg on LWR Fuel Performance, Orlando, FL, 2004.
11. *Bosselut, D., et al.* «Insertion and drop of control rod in assembly: simulation and parametric analysis», Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1454, IAEA, Vienna (2005).
12. *Chaplin, D., et al.* «EFG Fuel designs and experience in EDF reactors», TopFuel 2006, Salamanca, 2006.

## References

1. *Review of fuel failures in water cooled reactors*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2010, 191 p.

2. Boyle, J.T., Spence, J. Stress analysis for creep. London, Butterworth, 1983. (Russ.ed.: Boil Dzh., Spens Dzh. *Analiz napriazhenii v konstruktsiakh pri polzuchesti*. Moscow, Mir publ., 1986. 360 p.).

3. Danilov V.L., Zarubin S.V., Semishkin V.P. *Raschetno-teoreticheskii analiz napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia teplovydeliushchei sborki VVER-1000* [Computational and theoretical analysis of the stress-strain state of the fuel assemblies of VVER-1000]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-tekhnichekskoi konferentsii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER»* [Materials II All-Russian Conference «Safety Assurance of NPP with WWER»]. Podol'sk, 2001.

4. Kiselevskii V.N. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv staley i splavov pri radiatsionnom obluchenii* [Changes in the mechanical properties of steels and alloys in radiation exposure]. Kiev, Naukova dumka publ., 1977. 101 p.

5. Gusev M.P., Danilov V.L. *Relaksatsiia pruzhin golovnoi chasti teplovydeliushchei sborki* [The relaxation of the head of the springs of the fuel assembly]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Spetsial'nyi vypusk Sovremennyye problemy prikladnoi mekhaniki dinamiki i prochnosti mashin* [Herald MSTU named after N.E. Bauman. Special Issue Recent developments in applied mechanics, dynamics and strength machines]. 2012, no. 6, pp. 139–148.

6. Bogomolova O.A., Enin A.A., Rozhkov V.V. *Ekspierimental'nye issledovaniia mekhanicheskikh kharakteristik elementov, uzlov i maketov TVS s zhestkim karkasom v obosnovanie termomekhanicheskoi stabil'nosti TVS v usloviakh ekspluatatsii* [The experimental study of the mechanical characteristics of the elements, components and layouts FA with a rigid frame to support the stability of FA in the thermomechanical conditions]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-tekhnichekskoi konferentsii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER»* [Materials II All-Russian Conference «Safety Assurance of NPP with WWER»]. Podol'sk, 2001.

7. Mahmood R., *Channel bow in boiling water reactors — hot cell examination results and correlation to measured bow*, 2007 Int. LWR Fuel Performance Mtg, San Francisco, CA, 2007.

8. Bibilashvili Yu., *Operation experience of WWER fuel, including analysis of abnormal condition*, Proc. 2nd Int. Sem. on WWER Reactor Fuel Performance, Modelling and Experimental Status, Sandanski, 1997, BAS, INRNE, Sofia, 11.

9. Jacobson S., Francillon, E. *Incomplete control rod insertion due to fuel element bow*, Nuclear Fuel and Control rod: Operating Experience, Design Evolution and Safety Aspects, Madrid, 1996.

10. Anderson T. *A decade of assembly bow management at Ringhals*, Int. Mtg on LWR Fuel Performance, Orlando, FL, 2004.

11. Bosselut D., *Insertion and drop of control rod in assembly: simulation and parametric analysis*, Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1454, IAEA, Vienna, 2005.

12. Chaplin D., *EFG Fuel designs and experience in EDF reactors*, TopFuel 2006, Salamanca, 2006.

Статья поступила в редакцию 11.03.2013

## Информация об авторах

**ГУСЕВ Михаил Павлович** (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gusev.m.p@yandex.ru).

**ДАНИЛОВ Владимир Львович** (Москва) — профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vldanilov@mail.ru).

## Information about the authors

**GUSEV Mikhail Pavlovich** (Moscow) — Post-Graduate of «Applied mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: gusev.m.p@yandex.ru).

**DANILOV Vladimir Lvovich** (Moscow) — Professor of «Applied mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vldanilov@mail.ru).