

## Разработка геометрических моделей твэлов контейнерного типа

© Г.В. Кулаков<sup>1</sup>, Б.А. Каширин<sup>1</sup>, А.А. Косауров<sup>1</sup>, Ю.В. Коновалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара, Москва, 123098, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлена технология создания трехмерных геометрических моделей тепловыделяющих элементов (твэлов) энергетических реакторов типа ВВЭР для проведения конечно-элементных физических расчетов и расчетов напряженно-деформированного состояния с использованием программных средств MSC.MARC и ABAQUS. Твэлы контейнерного типа, применяемые в этих реакторах, представляют собой сложную конструкцию для трехмерного моделирования, что затрудняет создание моделей. Подход заключается в использовании специальных программ, написанных на языке PYTHON. При этом работа по моделированию для пользователя сводится к заданию геометрических параметров конструкции твэла. На заключительном этапе происходит сборка комплектующих фрагментов. Имеется возможность учитывать при моделировании дефекты, возникающие в твэлах при их изготовлении и эксплуатации (сколы и трещины в таблетках, несоосность расположения таблеток, эллиптичность оболочки твэла и т. д.).*

**Ключевые слова:** твэл, таблеточное топливо, реактор, ВВЭР, оболочка

**Введение.** Для обоснования безопасной эксплуатации АЭС необходимо проанализировать поведение топлива тепловыделяющих элементов (твэлов) топливных сборок энергетических реакторов [1]. В настоящее время имеется возможность проводить расчеты температуры, напряженно-деформированного состояния и формоизменения твэлов любой формы с учетом их реальной трехмерной геометрии [2, 3]. Известные программные комплексы MSC.MARC [4] и ABAQUS [5] позволяют выполнять такие расчеты в упруго-вязкопластической трехмерной и квазитрехмерной постановках по теории пластического течения с использованием метода конечных элементов [6]. Пример практического применения таких расчетов приведен в работе [7].

В предлагаемой статье методически применяемый подход близок к методу прогнозирования надежности и долговечности элементов конструкций высокого давления [8, 9]. Предложен подход и рассмотрены примеры построения трехмерных моделей фрагментов твэлов, которые можно использовать при проведении расчетов с помощью приведенных программных средств.

**Параметрическое моделирование конструкций.** Создание трехмерной геометрической модели твэла с учетом составляющих его элементов является важной задачей. Далее рассмотрены модели

фрагментов таблеточных твэлов, которые можно использовать для создания конечно-элементных моделей полных топливных сборок энергетических реакторов.

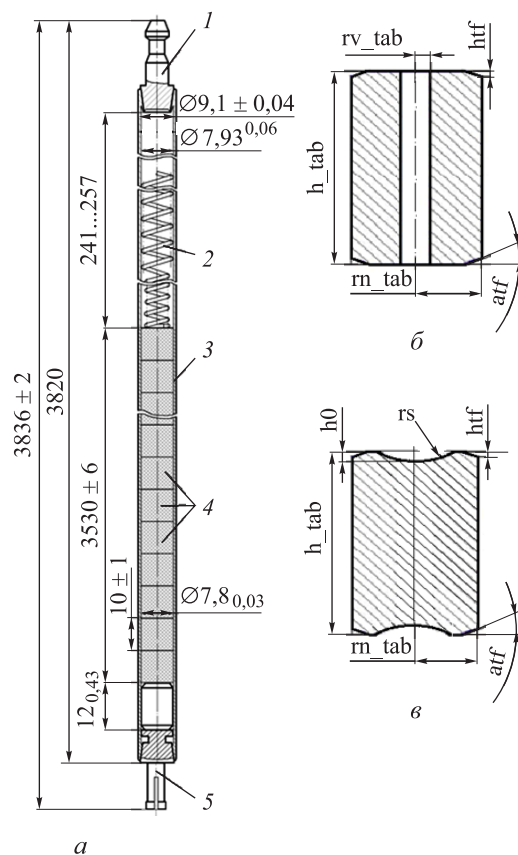
Все рассматриваемые конструкции можно представить в виде набора геометрических параметров, однозначно описывающих их. Так, любую цилиндрическую оболочку легко описать с помощью трех параметров: наружного или внутреннего радиуса оболочки, ее толщины и высоты. К ним допустимо добавить и угол развертки оболочки, если необходимо рассчитать незамкнутую оболочку. Для расчета оболочки по методу конечных элементов к ее геометрическим параметрам следует добавить параметры ее разбиения на конечные элементы (топологические параметры). Они будут представлять собой полный набор данных для создания конечно-элементной модели цилиндрической оболочки. Его передают в программу, и на выходе получают трехмерную модель оболочки.

С помощью параметрического моделирования можно создать оптимальную расчетную модель конструкции, в которую легко вносить любые изменения. Процесс моделирования упрощается и сводится к заданию параметров конструкции. Еще одно достоинство программных моделей — их упорядоченная топологическая структура конечно-элементных сеток, что улучшает качество расчета.

**Таблеточный твэл как объект параметрического моделирования.** Эскиз таблеточного твэла реактора ВВЭР-1000 представлен на рис. 1, а. Основной элемент любого твэла — топливные таблетки, которые размещают в его оболочке. Для того чтобы исключить разрывы топливного столба, образованного стоящими одна на другой таблетками, столб подпирается пружиной-фиксатором, верхняя часть которой запрессовывается в оболочку, а нижняя сжимается (разжимается), обеспечивая неразрывность топливного столба. Конструкция таблеточного твэла идеально подходит для параметрического моделирования, поскольку все его комплектующие описываются небольшим числом параметров и их геометрия незначительно различается для разных энергетических реакторов.

Процесс создания геометрической модели твэла проходит в два этапа: на первом — создаются модели элементов твэла (таблеток, заглушек и т. д.), на втором — проводится сборка ранее созданных элементов твэла в единую модель. Для сборки используются параметры, которые указывают места расположения деталей твэла. В конце работы программы пользователь получает готовую модель твэла.

**Модель топливной таблетки.** Применяемые топливные таблетки могут быть описаны шестью геометрическими и четырьмя топологическими параметрами, приведенными в табл. 1 и на рис. 1, б, в, с программными идентификаторами. Конечно-элементные модели различных таблеток представлены на рис. 2.



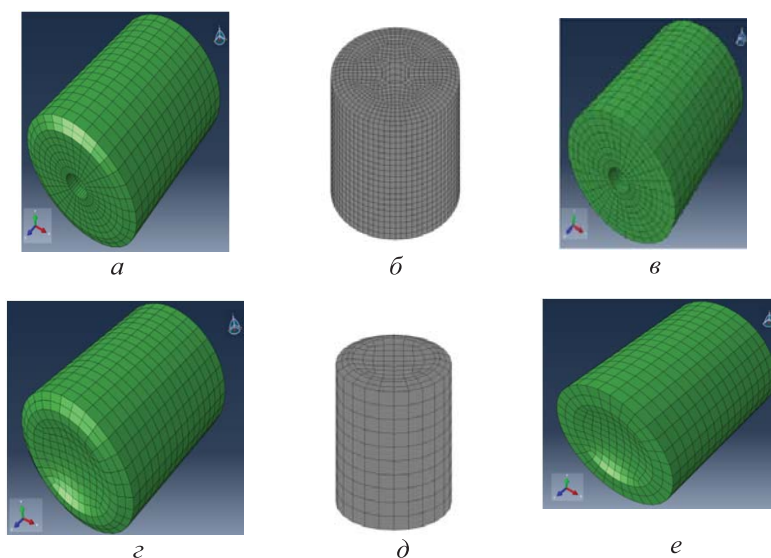
**Рис. 1.** Эскизы таблеточного твэла реактора ВВЭР-1000 (а) и таблеток с центральным отверстием (б), со сферической канавкой (в):

1 — верхняя заглушка; 2 — фиксатор; 3 — оболочка твэла; 4 — топливные таблетки; 5 — нижняя заглушка

Таблица 1

**Параметры топливных таблеток**

Обозначение	Назначение
<i>Геометрические параметры</i>	
rv_tab	Внутренний радиус таблетки
rf	Радиус сферы по оси вращения
rn_tab	Наружный радиус таблетки
htf	Высота фаски
atf	Угол фаски
h_tab	Высота таблетки
h0	Глубина вдавливания сферы по оси
<i>Топологические параметры</i>	
n1	Число элементов по радиусу без фаски
n_fc	Число элементов по фаске
na	Число элементов по 1/4 окружности
nh	Число элементов по высоте таблетки



**Рис. 2.** Модели таблеток с центральным отверстием (а) и с фаской (б), с центральным отверстием без фаски (в), со сферической канавкой (г) и фаской (д) и со сферической канавкой без фаски (е)

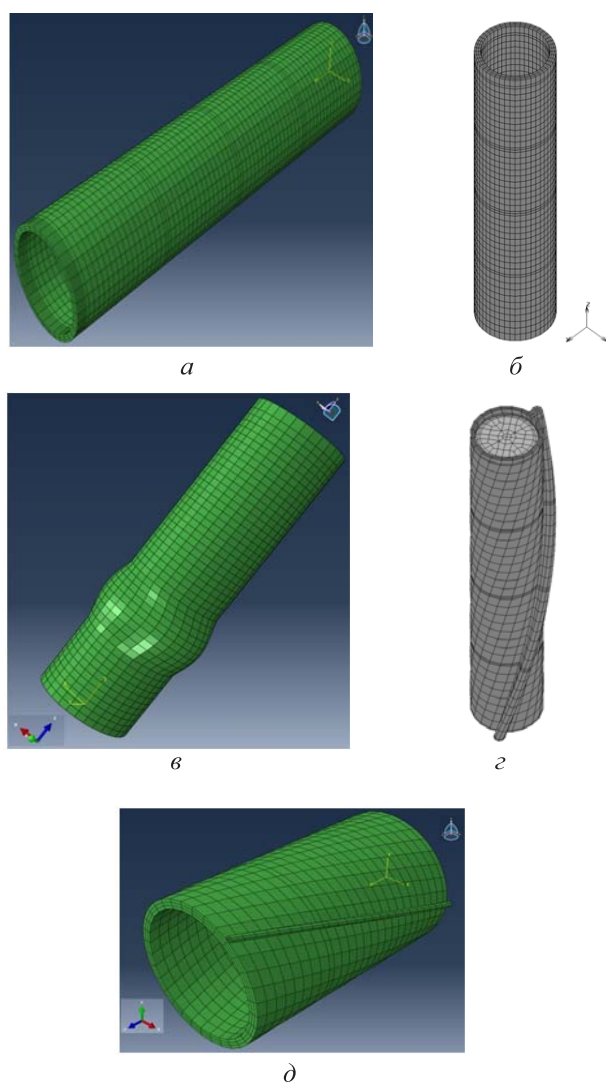
**Модель оболочки твэла.** В табл. 2 приведены три геометрических и три топологических параметра, описывающих модель оболочки твэла. Если оболочка имеет начальные дефекты, например, общую или локальную эллиптичность, местное утонение стенки, то в программе предусмотрен дополнительный список параметров дефекта. Так, при общей эллиптичности достаточно указать коэффициент эллиптичности (соотношение диаметров поперечного сечения оболочки). Модель оболочки твэла, содержащего четыре таблетки, приведена на рис. 3, а, б, модель оболочки с локальной эллиптичностью — на рис. 3, в.

Таблица 2

**Параметры оболочки твэла**

Обозначение	Назначение
<i>Геометрические параметры</i>	
rv she	Внутренний радиус оболочки
rn she	Наружный радиус оболочки
h she	Высота оболочки
<i>Топологические параметры</i>	
ns she	Число элементов по толщине
na she	Число элементов по 1/4 окружности
nh she	Число элементов по высоте

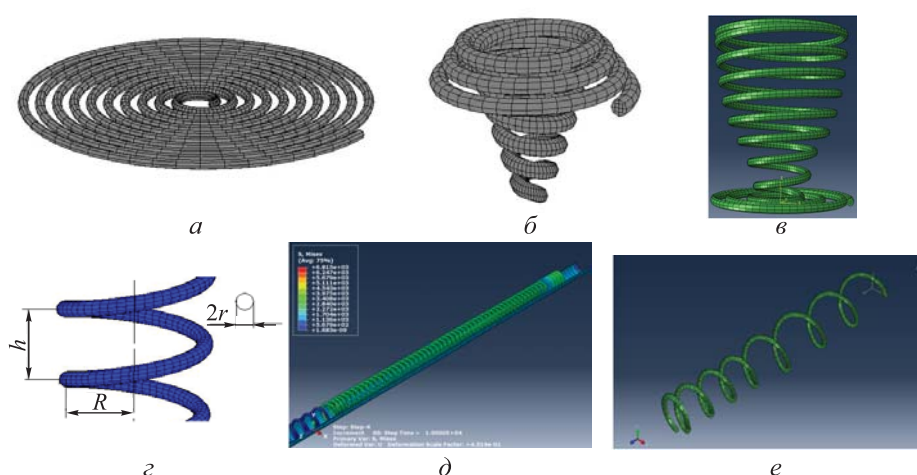
**Модель оболочки с дистанцирующим профилем.** В некоторых случаях твэлы в пучке разделяются дистанцирующими профилями, например, навитыми на оболочку прутками круглого сечения. Тогда в оболочку включается этот профиль, который описывается своими геометрическими и топологическими параметрами. Самый простой случай — круглый пруток, для которого достаточно указать диаметр прутка и число элементов по окружности сечения этого прутка. Фрагмент модели оболочки с прутком приведен на рис. 3, *г–д*.



**Рис. 3.** Модели оболочек твэлов:

*a, б* — оболочка, содержащая четыре таблетки; *в* — оболочка с локальной эллиптичностью; *г, д* — фрагменты оболочки с дистанцирующим профилем

**Модель фиксатора.** Фиксатор — цилиндрическая составная пружина, одна часть витков которой (большого диаметра) запрессовывается в оболочку твэла, а другая — с витками меньшего диаметра навивки поджимает столб топливных таблеток. Геометрия цилиндрической пружины описывается тремя параметрами: радиусом навивки, шагом пружины и числом витков. Для сечения пружины в случае круглой проволоки достаточно одного параметра — ее диаметра (рис. 4, *а*).

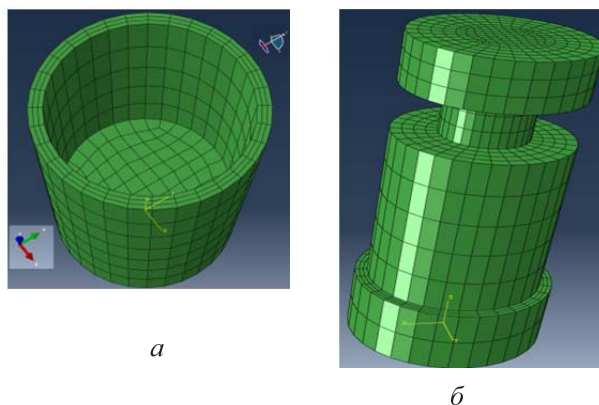


**Рис. 4.** Модели пружин и фиксатора:

*а* — фрагмент фиксатора и плоская пружина с нулевым шагом; *б* — вложенная пружина с отрицательным шагом; *в* — профилированная пружина с профилем из двух радиусов; *г* — параметры пружины; *д*, *е* — фиксатор и его фрагмент

Фиксатор с двумя участками описывается двумя наборами параметров, которые располагаются в списке *csr*. Этот список может содержать информацию о многих участках пружины. Для каждого из них необходимо указать радиус навивки в начале участка, шаг пружины на данном участке, число витков (не обязательно целое), число элементов по длине участка и радиус навивки последнего витка пружины на участке. Таким образом, несложно задать и получить модели различных пружин (рис. 4, *б–д*). В программе допускается задавать любые сечения проволоки (круглые, квадратные, прямоугольные и др.). Кроме того, можно получать различные профилированные пружины, профили которых задаются как формульными кривыми, так и нарисованными от руки. Для профильных пружин необходима отдельная информация. На рис. 4, *е* представлена модель реального фиксатора с 55 витками.

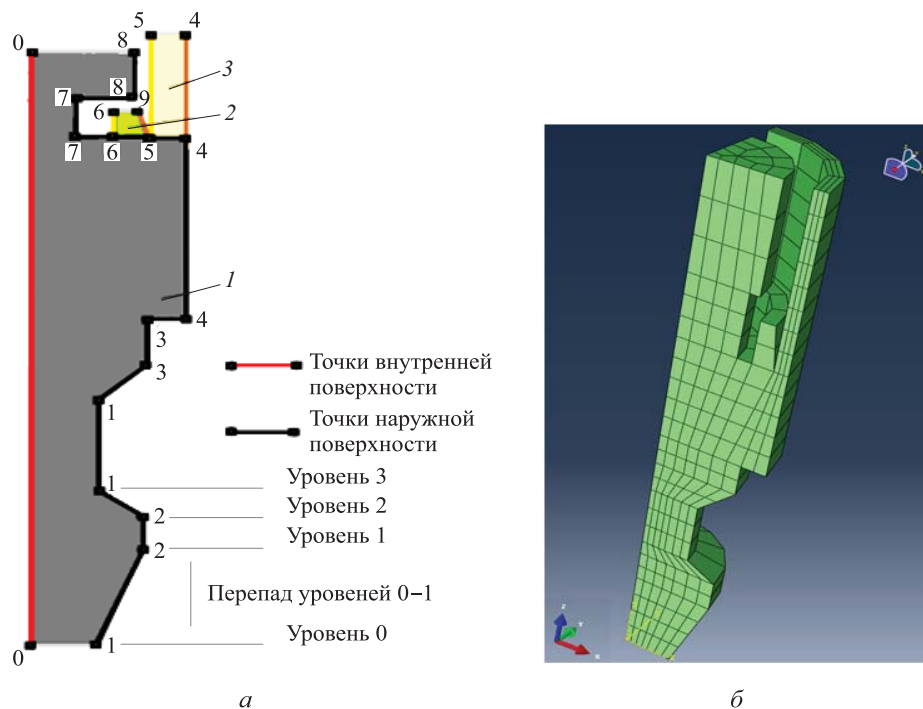
**Модель заглушки.** Все возможные заглушки представляют собой детали вращения, но многообразие их конструкций не позволяет описать их определенным набором параметров. Поэтому при создании моделей любых заглушек используются программы со стандартным набором данных. Разбивка упрощенных деталей вращения с цилиндрическими поверхностями сводится к заданию двух списков. Первый — список всех радиусов, имеющихся в конструкции, и число разбиений между соседними радиусами (сечение нулевого уровня). Второй список содержит информацию по выдавливанию отдельных групп элементов по высоте. На рис. 5 представлены модели простых тел вращения.



**Рис. 5.** Модели деталей вращения:

*a* — оболочка с плоским дном; *б* — составная модель детали вращения

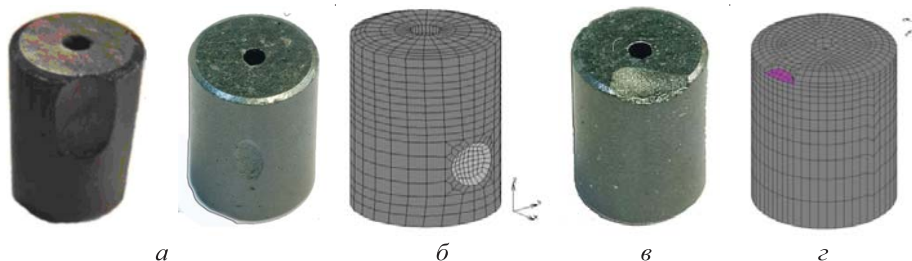
Для разбивки сложных деталей вращения применяют другие программы модуля, использующие другую исходную информацию. Сложные детали вращения могут быть разветвленными и иметь конические и сферические поверхности, и тогда информация о них сводится к заданию поперечного сечения тела. Сложная деталь с разветвлениями разбивается на отдельные подконструкции, и каждая из них описывается отдельно. Описание всей конструкции определяется двумя списками: в первом — указываются все радиусы конструкции, во втором — содержится описание внутренних и наружных поверхностей всех подконструкций детали. В это описание входят последовательное (снизу вверх) перечисление номеров опорных точек (радиусов) поверхности, значения ступеней высоты, число элементов на ступени и номер следующей точки. В качестве примера сложной конструкции на рис. 6 приведена модель заглушки с гратом (напильником металла при контактно-стыковой сварке).



**Рис. 6.** Модель заглушки с gratом:

*a* — сечение заглушки с разделением на отдельные конструкции (1, 2, 3... — номера радиусов опорных точек); *б* — модель заглушки с разверткой 90°; 1 — заглушка; 2 — grat; 3 — оболочка

**Модель таблетки с дефектами.** Современное производство таблеток допускает небольшой процент продукции с разрешаемыми дефектами (сколы, трещины и т. д.). В модель твэла могут входить таблетки с дефектами, наличие которых также позволяет выполнять параметризацию при расчетном анализе. Учет наличия дефектов таблетки позволяет правильно определить распределение температур в таблетке и ее напряженно-деформированное состояние, что важно при выяснении момента растрескивания таблетки. На рис. 7 приведены таблетки с реальными дефектами и модель дефектной таблетки.



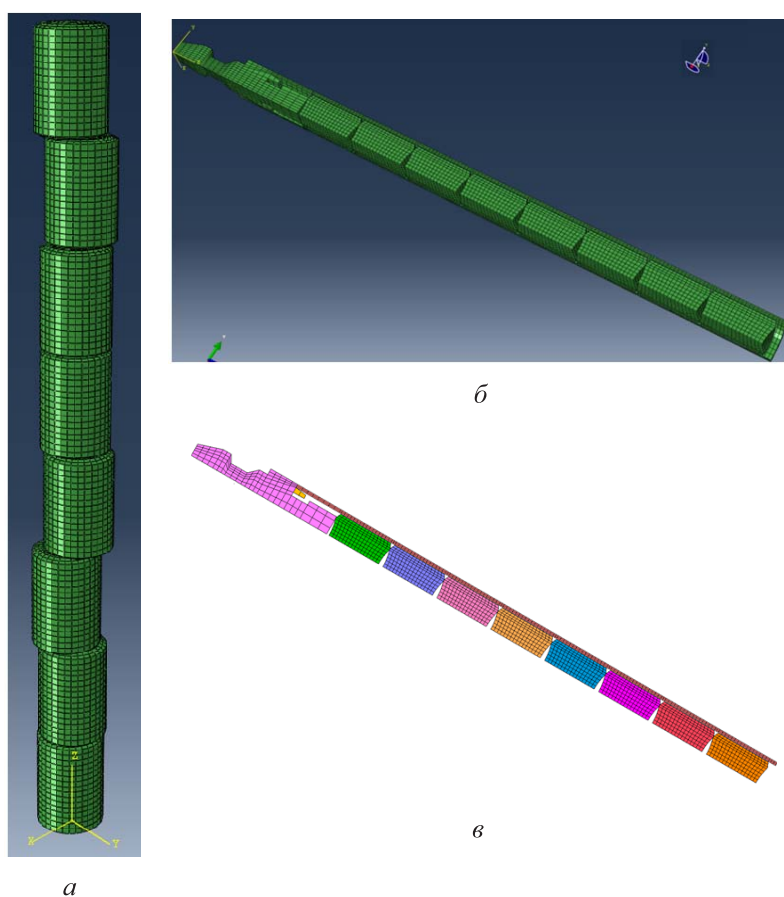
**Рис. 7.** Таблетки с дефектами:

*a* — боковые сколы; *б* — модель таблетки с боковым сколом; *в* — торцевой скол; *г* — модель таблетки с торцевым сколом



Предполагается, что любой скол таблетки в плане имеет эллиптическую форму. Тогда его можно описать пятью параметрами: площадью скола, соотношением осей, глубиной дефекта, радиусом и углом центра дефекта на торце таблетки или высотой и углом для бокового скола.

**Сборка модели.** Расчетные модели твэла могут состоять из разных наборов комплектующих, возможна модель только из одного элемента, например из оболочки с эллиптичностью (для исследования потери устойчивости). Для включения элементов в сборку твэла пользователь заполняет список присутствия, в котором факт наличия элемента подтверждается ненулевым числом. Наряду с этим списком, задаются параметры сборки: тип конечного элемента, масштабный коэффициент, угол развертки модели (90, 180, 360°). Эти параметры действуют для всех элементов твэла. На первом этапе моделирования



**Рис. 8.** Модели твэла:

*a* — несоосная постановка таблеток; *б* — соосная модель твэла, содержащего восемь таблеток, с разверткой 90°; *в* — осесимметричная модель твэла, содержащего восемь таблеток

создаются все заявленные элементы, и если первый этап закончился нормально (без ошибок), программа приступает ко второму — сборке модели твэла. Параметрами сборки являются в основном координаты положения элементов в конструкции, но есть и особые параметры, например признак соосности размещения таблеток в топливном столбе. При несоосной установке генератор случайных чисел задает каждой таблетке ее смещение от центральной оси и угол этого смещения. На рис. 8, а показано размещение восьми таблеток случайным образом. По окончании работы программы получают геометрическую модель твэла (рис. 8, б, в), дополнив которую моделями поведения материалов конструкции и моделью поведения с необходимым учетом граничных условий (закрепления узлов, нагружения давлением, контактного взаимодействия и т. д.) можно приступить к расчету конструкции.

**Заключение.** Приведенные методика и примеры построения трехмерных геометрических моделей фрагментов таблеточных твэлов можно использовать для создания конечно-элементных моделей полных топливных сборок энергетических реакторов, что позволяет проводить физические и прочностные расчеты с использованием программ MSC.MARC и ABAQUS.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. *Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов*. Москва, Энергоатомиздат, 1996, 400 с.
- [2] Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Косауров А.А., Каширин Б.А., Кузнецов А.В. Моделирование поведения топлива тепловыделяющих элементов реакторов ВВЭР и РБМК с использованием компьютерной технологии MARC. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 6 (42). URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1407.html>
- [3] Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Косауров А.А., Ватулин А.В. Методические особенности моделирования работоспособности тепловыделяющих элементов *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 6 (42). URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1408.html>
- [4] Javanbakht Z., Ochsner A. *Advanced Finite Element Simulation with MSC Marc*. Springer, 2017, 333 p.
- [5] *Abaqus: применение комплекса в инженерных задачах. Версия 6.7*. Москва, ТЕСИС, 2008, 99 с.
- [6] Long Y.Q., Cen S., Long Z.F. *Advance Finite Element Method in Structural Engineering*. Springer, 2009, 706 p.
- [7] Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Коновалов Ю.В., Косауров А.А., Перегуд М.М., Коротченко Е.А., Шишин В.Ю., Шельдяков А.А. Анализ влияния напряженно-деформированного состояния облученных оболочек твэлов из циркониевых сплавов на ориентацию гидридов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 8 (32). URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/1242.html>

- [8] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Европин С.В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 1. Численное моделирование накопления повреждений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 11, с. 3–11.
- [9] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Шиверский Е.А. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 2. Численное статистическое моделирование. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 12, с. 11–19.

Статья поступила в редакцию 19.09.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кулаков Г.В., Каширин Б.А., Косауров А.А., Коновалов Ю.В. Разработка геометрических моделей твэлов контейнерного типа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1724>

**Кулаков Геннадий Валентинович** — канд. техн. наук, директор отделения АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область научных интересов: исследования в области атомной энергетики. e-mail: GeVKulakov@bochvar.ru

**Каширин Борис Александрович** — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область научных интересов: численное моделирование задач термомеханики. e-mail: BAKashirin@bochvar.ru

**Косауров Александр Анатольевич** — начальник отдела АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область научных интересов: исследования в области атомной энергетики. e-mail: AAKosaurov@bochvar.ru

**Коновалов Юрий Валентинович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: статистическое моделирование процессов в области атомной энергетики. e-mail: kon20002000@mail.ru

## Development of geometric models of container-type fuel rods

© G.V. Kulakov<sup>1</sup>, B.A. Kashirin<sup>1</sup>, A.A. Kosaurov<sup>1</sup>, Yu.V. Konovalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials,  
Moscow, 123098, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes the technology of creating three-dimensional fuel rod geometric models (fuel elements) of WWER-type power reactors for performing finite element calculations (physical and strain-stress computation) using software MSC.MARC and ABAQUS. For three-dimensional modeling the container type fuel rods used in these reactors represent a complex structure; that is why it is difficult to create models. The offered approach uses special programs in the PYTHON language, and for the user the modeling work is reduced to specifying the geometric parameters of the fuel rod structure. At the final stage, the component fragment assembling is made. It is possible to take into account in modeling the defects arising in fuel rods during their manufacture and operation (chips and cracks in tablets, misalignment of the tablets, ellipticity of the fuel cladding, etc.).*

**Keywords:** fuel rod, tablet fuel, reactor, WWER, fuel clad

### REFERENCES

- [1] Samoylov A.G., Volkov V.S., Solonin M.I. *Teplovydelyayushchie elementy yadernykh reaktorov* [Fuel rods of nuclear reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996, 400 p.
- [2] Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Kosaurov A.A., Kashirin B.A., Kuznetsov A.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 6 (42). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1407.html>
- [3] Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Kosaurov A.A., Vatulin A.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 6 (42). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1408.html>
- [4] Javanbakht Z., Ochsner A. *Advanced Finite Element Simulation with MSC Marc*. Springer, 2017, 333 p.
- [5] *Abaqus: Primenenie kompleksa v inzhenernykh zadachakh. Versiya 6.7* [Abaqus: application of the complex in engineering tasks. Version 6.7]. Moscow, TESIS Publ., 2008, 99 p.
- [6] Long Y.Q., Cen S., Long Z.F. *Advance Finite Element Method in Structural Engineering*. Springer, 2009, 706 p.
- [7] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Konovalov Yu.V., Kosaurov A.A., Perehud M.M., Korotchenko E.A., Shishin V.Yu., Sheldyakov A.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, iss. 8 (32). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/1242.html>
- [8] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 11, pp. 3–11.
- [9] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Shiversky E.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 12, pp. 11–19.

**Kulakov G.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Director of Division, Joint Stock Company “A.A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials”. Research interests: research in the field of nuclear power generation industry.  
e-mail: GeVKulakov@bochvar.ru

**Kashirin B.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Leading Research Fellow, Joint Stock Company “A.A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials”. Research interests: numerical simulation of thermomechanical problems.  
e-mail: BAKashirin@bochvar.ru

**Kosaurov A.A.**, Head of the Department, Joint Stock Company “A.A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials”. Research interests: research in the field of nuclear power generation industry. e-mail: AAKosaurov@bochvar.ru

**Kononov Yu.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: statistical modeling processes in the field of nuclear power generation industry. e-mail: kon20002000@mail.ru