

## РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ РЕАКТОРА ВВЭР-440 ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

**М.С. Хвостов**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва*



Представлена методика создания конечно-элементной модели ТВС реактора ВВЭР-440 для обоснования прочности при сейсмических нагрузках. Описана конечно-элементная модель ТВС, созданная в среде программного комплекса ANSYS. Определены собственные частоты и формы колебаний конструкции. Проведен расчет отклика конструкции на сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом. Проведена оценка точности результатов.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, тепловыделяющая сборка, ANSYS, собственные частоты и формы колебаний, отклик на сейсмическое воздействие, максимальное расчетное землетрясение, линейно-спектральный метод.

**Key words:** the finite-element method, fuel assembly, ANSYS, eigenfrequencies and forms, the response to the seismic impact, the ultimate design-basis earthquake, the linear spectrum method.

В работе исследована модернизированная ТВС реактора ВВЭР-440 бесчехловой конструкции. Целью работы было определение напряженно-деформированного состояния сборки при ее нагружении усилиями, имитирующими максимальное проектное землетрясение. Исследование кассеты проводилось в среде ПК ANSYS.

В ходе выполнения работы была создана конечно-элементная модель ТВС (рис. 1) и проведены расчет собственных частот и форм колебаний кассеты (модальный анализ) и расчет отклика на возмущение, характерное максимальному проектному землетрясению (спектральный анализ). В результате последнего расчета получено распределение напряжений в конструкции и их максимальное значение, определены форма колебаний ТВС при землетрясении и максимальное значение прогиба.

Существенным упрощением в данных расчетах является неучет влияния теплоносителя как среды, демпфирующей колебания. Также данная модель не учитыва-

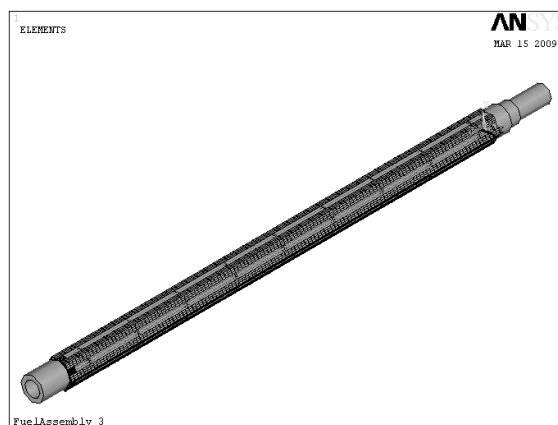


Рис. 1. Конечно-элементная модель ТВС

ет изменение механических свойств материалов кассеты и неравномерность их распределения вследствие воздействия тепловых потоков и потоков ионизирующих излучений.

Созданная конечно-элементная модель ТВС состоит из отдельных конструктивных элементов, объединенных между собой жесткими и нежесткими связями. Для моделирования отдельных частей кассеты были использованы следующие типы конечных элементов: *pipe16* – упругая прямая труба; *beam4* – трехмерная упругая балка; *shell43* – оболочка со свойствами пластичности; *matrix27* – матрица жесткости.

Задаваемые для каждого типа конечных элементов свойства материалов в расчетной модели соответствуют стали 08X18H10T (плотность 7800 кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости 182.2 ГПа) и цирконию (плотность 6650 кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости 71.2 ГПа). Указанные характеристики циркония одинаковы при легировании 1% Nb и 2.5% Nb. Приведенные свойства материалов соответствуют максимальной температуре теплоносителя на выходе из ТВС (325°C).

Конечно-элементная модель кассеты состоит из следующих основных частей: центральной трубки, опорной решетки и девяти дистанционирующих решеток, твэльного пучка, состоящего из 126 твэлов, хвостовика, головки, шести каркасных уголков и пружинного блока на головке ТВС.

Модели хвостовика и головки (рис. 2) представляют собой толстостенные короткие трубы, жесткость которых существенно выше жесткости твэльного пучка и каркасных уголков. Хвостовик и головка моделируются конечными элементами «*pipe16*». Свойства материала соответствуют стали.

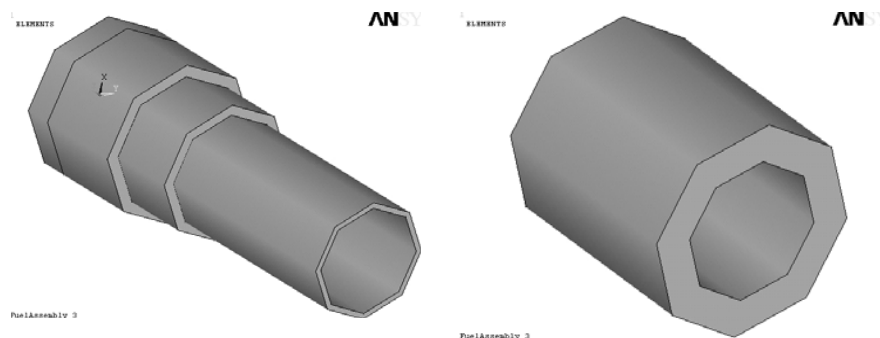


Рис. 2. Модели хвостовика и головки

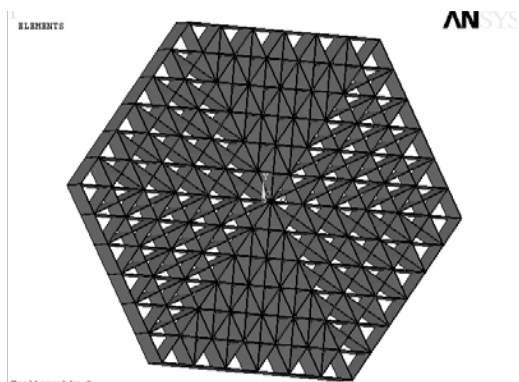


Рис.3. Балочная модель дистанционирующей / опорной решетки

Центральная трубка моделируется конечными элементами «pipe16». Свойства материала соответствуют цирконию.

Дистанционирующие решетки (ДР) и опорная решетка (рис. 3) моделируются балочным элементом «beam4», жестко соединяющим 127 узлов решетки. В свою очередь узлы ДР нежестко соединены с соответствующими узлами твэльного пучка. При этом решетки представляют собой абсолютно жесткие конструкции, модуль упругости для которых был задан большим на четыре порядка по сравнению с соответствующими характеристиками для основных материалов (стали и циркония). Крепление твэлов в опорной решетке принимается в данной модели абсолютно жестким.

Для определения коэффициента жесткости в соединении твэл-ДР отдельно была построена упрощенная конечно-элементная модель (рис. 4), состоящая из 19-ти ячеек, соединенных в форме шестигранника. Ячейки ДР моделировались конечными элементами типа «shell43». Материал ячеек – цирконий. Соединение ячеек между собой моделирует контактную сварку по двум точкам и выполнено посредством соединения соответствующих соседних узлов ячеек абсолютно жесткими связями.

Определение жесткости проводилось для центральной ячейки из заданного набора. К линии контакта с твэлом прикладывалась нагрузка, проводился расчет соответствующих перемещений и жесткость ячейки в составе решетки определялась как сила, отнесенная к перемещению. Закрепление системы проводилось по

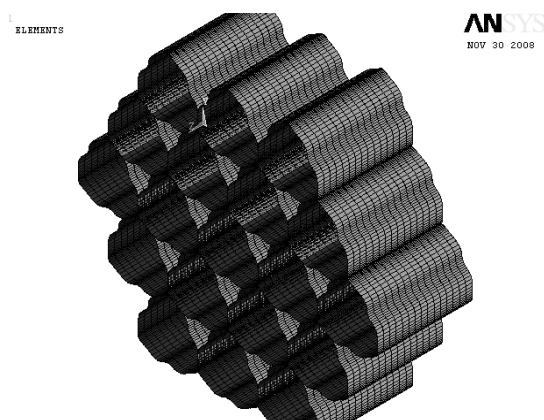


Рис. 4. Конечно-элементная модель дистанционирующей решетки

верхнему ряду ячеек. Определенное таким образом значение жесткости ячейки в составе ДР получилось равным 653595 Н/м, прикладываемое значение нагрузки 1 Н, соответствующее ей максимальное перемещение равно  $0.153 \times 10^{-5}$  м.

Твэльный пучок моделировался элементами «r16». Материал оболочек – цирконий. В качестве свойств наполняющего твэлы материала были заданы свойства диоксида урана, а именно, его плотность  $10450 \text{ кг/м}^3$ . Число и расположение узлов каждого твэла по высоте соответствуют узлам опорной и дистанционирующих решеток.

Каркасные уголки (рис. 5) задаются конечными элементами типа «shell43». Материал – цирконий. Геометрия уголков выполнена упрощенно без учета изменения профиля поперечного сечения по высоте.

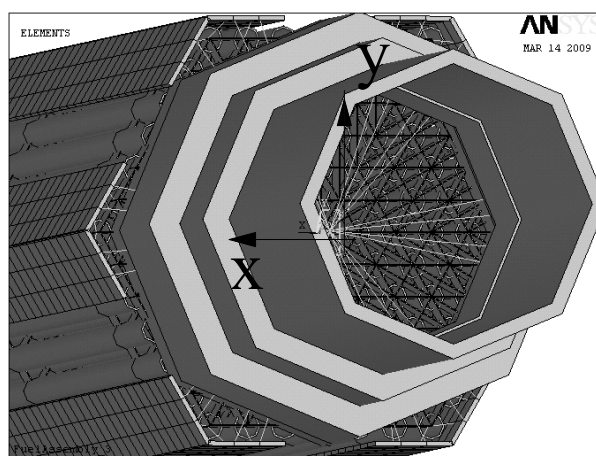


Рис. 5. Вид твэльного пучка и каркасных уголков со стороны хвостовика

Связь отдельных элементов конструкции между собой осуществляется при помощи элемента жесткости «matrix27».

Всего в модели ТВС было использовано три типа жесткой связи:

- абсолютно жесткая связь, используемая в соединениях концевиков (нижних узлов) твэлов с опорной решеткой, уголков с ободами дистанционирующих решеток, уголков с хвостовиком и головкой, центральной трубки с опорной и дистанционирующими решетками;
- связь между узлами твэлов и ДР;
- связь, моделирующая пружинный блок на головке ТВС.

Для первого типа связи (абсолютно жесткая связь, моделирующая сварные и резьбовые соединения, а также цанговое крепление твэлов в опорной решетке) все коэффициенты жесткости, препятствующие смещениям узлов по направлениям шести степеней свободы, были заданы равными (по абсолютной величине)  $1 \cdot 10^8$  Н/м.

Для второго типа связи (соединение твэл – ДР) в поперечном направлении ТВС был использован коэффициент жесткости, определенный из расчета отдельной модели дистанционирующей решетки (699301 Н/м).

Связь, моделирующая пружинный блок на головке ТВС, была задана коэффициентом жесткости в осевом направлении, равным 4700 Н/м. Во всех остальных направлениях пружинный блок предполагается абсолютно жестким, для этих направлений коэффициент жесткости был задан равным  $1 \cdot 10^8$  Н/м.

Для расчета отклика ТВС при сейсмическом воздействии в поперечном направлении предварительно были определены собственные частоты и формы колеба-

ний кассеты в соответствующем направлении. Указанные параметры колебаний кассеты находятся из модального анализа, в котором решаются системы линейных уравнений:

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{F(t)\},$$

где  $[M]$  – матрица масс системы;  $[C]$  – матрица сопротивлений;  $[K]$  – матрица жесткости;  $\{F(t)\}$  – функция нагрузки, зависящая от времени;  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений;  $\{u'\}$  – вектор узловых скоростей;  $\{u''\}$  – вектор узловых ускорений.

При определении собственных частот и форм колебаний конструкции предполагается, что совершаются свободные незатухающие колебания, т.е.

$$\{F(t)\} = \{0\} \text{ и } [C] = [0].$$

В спектральном анализе искомые узловые перемещения находятся из решения уравнения движения системы в общем виде.

Для перехода от узловых смещений к величинам напряжений используется зависимость между перемещениями и деформациями, а также зависимость между деформациями и напряжениями (закон Гука):

$$\{\epsilon\} = [D]\{u\}, \{\sigma\} = [E]\{\epsilon\},$$

где  $[D]$  – матрица операторов дифференцирования;  $[E]$  – матрица, членами которой являются модуль упругости и модуль сдвига.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в «Нормах расчета на прочность...» [1], расчет ТВС на сейсмическое воздействие был проведен линейно-спектральным методом. При данном методе расчета нагрузки, имитирующие максимальное проектное землетрясение, задаются в виде обобщенных спектров отклика горизонтальных колебаний, другими словами, к опорам конструкции (хвостовику ТВС и пружинному блоку на головке) прикладывается спектр ускорений в зависимости от частоты колебаний. Вид спектра ускорений (рис. 6) и численные значения взяты из «Норм расчета на прочность...» [1] и соответствуют сейсмичности площадки 9 баллов по шкале MSK-64 для конструкций, располагаемых на уровне земли, при относительном демпфировании колебаний 0.02.

Для проведения расчетов на нижний и верхний узлы модели были наложены условия закрепления. Поскольку ТВС, устанавливаемая хвостовиком на опорную плиту, образует герметичное соединение «шар по конусу», а сверху она поджимается блоком защитных труб, то нижний узел хвостовика был закреплен шарнирно, а верхний узел пружинного блока был лишен всех степеней свободы (заделка). При этом у головки кассеты остается возможность осевого перемещения.

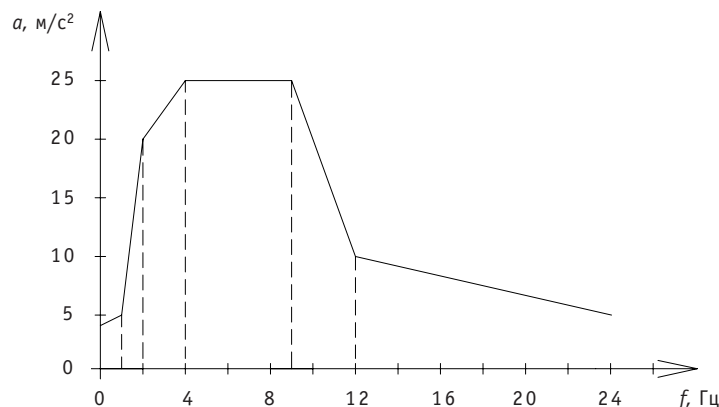


Рис. 6. Вид обобщенного спектра ответа горизонтальных колебаний

В результате модального анализа было получено шесть изгибных форм свободных незатухающих колебаний кассеты со следующими значениями собственных частот:

- направление OX:  $f_1=9.571$  Гц,  $f_2=20.308$  Гц,  $f_3=31.658$  Гц;
- направление OY:  $f_1=9.606$  Гц,  $f_2=20.382$  Гц,  $f_3=31.775$  Гц.

Результаты расчета ТВС на сейсмическое воздействие представлены в виде максимальных смещений конструкции от положения равновесия, в виде формы колебаний и значений напряжений, действующих в конструкции (рис. 7).

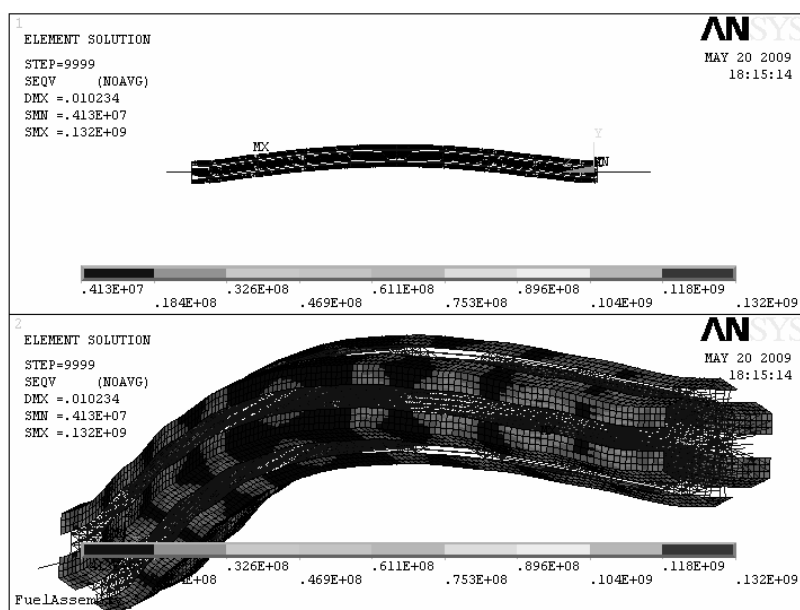


Рис. 7. Форма колебаний и распределение эквивалентных напряжений в конструкции ТВС при сейсмическом воздействии

Результат спектрального анализа показал, что максимальная стрела прогиба ТВС при заданном возмущении составляет 10 мм, а максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в элементах конструкции ТВС, составляет 132 МПа.

Наиболее напряженные участки конструкции расположены в местах сварного соединения каркасных уголков с ободами дистанционирующих решеток.

По «Нормам расчета на прочность...» [1] величина номинального допускаемого напряжения для сплавов циркония определяется как меньшее значение из  $\sigma_{0.2}/n_{0.2}$  и  $\sigma_B/n_B$ .

Коэффициенты запаса по пределу текучести и пределу временного сопротивления:  $n_{0.2}=1.5$ ,  $n_B=2.6$ . При температуре 325°C для сплава циркония с содержанием ниобия 2.5% характерны следующие значения пределов текучести и временного сопротивления  $\sigma_{0.2}=250.2$  МПа,  $\sigma_B=397.3$  МПа [1].

$$[\sigma_n]=\min\{250.2/1.5, 397.3/2.6\} = 152.8 \text{ МПа.}$$

Учитывая, что в соответствии с «Нормами расчета на прочность...» [1] найденные при расчете на сейсмическое воздействие значения напряжений сравниваются с номинальным допускаемым напряжением, умноженным на коэффициент, который для всех элементов оборудования АЭС принимается большим единицы, то можно считать полученное значение напряжения 132 МПа удовлетворяющим условию прочности.



В завершении данной работы была проанализирована адекватность созданной конечно-элементной модели, которая характеризуется значениями неравномерностей распределения расчетных величин (напряжений, смещений и др.) по соседним элементам. В программе ANSYS используются следующие оценки указанных неравномерностей:

- относительная погрешность между результатами в точках интегрирования элементов (ESOL) и результатами, усредненными по узлам (NSOL),

$$\Delta_1 = [(ESOL - NSOL) / ESOL] \cdot 100\%;$$

- оценка отклонения вероятной нижней (SMNB) и верхней (SMXB) границ результатов относительно вычисленных минимальных (SMN) и максимальных (SMX) величин

$$\Delta_2 = [(SMNB - SMN) / SMNB] \cdot 100\%, \Delta_3 = [(SMXB - SMX) / SMXB] \cdot 100\%.$$

Все эти характеристики вычисляются программой и доступны для просмотра после постпроцессорной обработки результатов.

Данные, основанные на опыте использования ПК ANSYS [2], показывают, что конечно-элементное разбиение является приемлемым в том случае, если величины приведенных выше оценок погрешностей не превышают 10%. Для исследуемой в данной работе модели ТВС, которая выполнена с использованием регулярной сетки, значения перечисленных погрешностей варьируются в пределах 3–5%, что позволяет сделать вывод об адекватности полученных с использованием этой модели результатов.

## ВЫВОДЫ

Расчет модели ТВС третьего поколения реактора ВВЭР-440 при принятых допущениях показал, что силовой каркас кассеты обладает достаточной прочностью, чтобы выдержать без разрушения нагрузки, вызванные воздействием максимального расчетного землетрясения. Однако полученное значение максимального прогиба кассеты не исключает возможности соударения с соседними кассетами при землетрясении.

Также было показано, что используемая в расчете модель приемлема с точки зрения конечно-элементного разбиения и адекватно описывает поведение конструкции.

## Литература

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭГ-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.
3. Шмелев В.Д., Дразунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 220 с.

Поступила в редакцию 5.10.2009

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.543.6

*Dose Characteristics of Neutrons Fields of Spent Ceramic Nuclear Fuel of Various Types* \S.V. Bedenko, F.V. Gnetkov, S.D. Kadochnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 16 titles.

The dose characteristics of the neutron fields spent ceramic uranium compounds were analyzed. A procedure for calculating the neutron component of the radiation characteristics of spent ceramic nuclear fuel was proposed. The causes of significant differences contributions of ( $\alpha$ , n)-reactions in the neutron radiation intensity of spent UO<sub>2</sub>, UC and UN were determined. The simulation results of the radiation field characteristics near the transport container with the results of radiometric experiments were compared.

### УДК 621.039.564

*Informational Approach to Solving Problems of Power Distribution Control in a Nuclear Reactor* \A.M. Zagrebayev, N.V. Ovsyannikova, I.V. Prokhorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 7 titles.

Informational approach to solving the problems of power distribution control in a nuclear reactor is offered. The definitions of information value of an in-core detector and information of the system of detectors are introduced. Connection between accuracy of a restoration algorithm and its informational properties is shown. The sequence of in-core detectors graduation (repair) definition on the basis of their informational value is offered.

### УДК 621.039.51

*New approach on designing spectrometric neutron radiation radiometer* \V.E. Dreizin, A.A. Grimov, D.I. Logvinov I.N. Mazepa; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 1 illustration. – References, 5 titles.

Results of modeling new method of spectrometric measurements neutron radiation are considered here. This method based on combined signal processing from several detectors with different spectral characteristic with following computer rebuilding energy spectrum of measuring radiation with assistance of neuron net. This net was preliminary trained on simulation models of neuron flow with different energy characteristic.

### УДК 621.039.56

*The Working out of the Finite-Element Dynamic Model of the Third Generation Fuel Assembly of the WWER-440 for the Strength Prove under Seismic Impact* \M.S. Khvostov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.

A description is given for working out of the finite-element dynamic model of the WWER-440 fuel assembly for the strength prove under seismic impact. The finite-element fuel assembly model worked out in ANSYS code is described. The eigenfrequencies and forms of the structure oscillations are received. The response to the seismic impact by the linear spectrum analysis is calculated. The estimation of the results precision is produced.

### УДК 621.039

*Analysis of the Radiation Monitoring Data by the Distribution-Free Statistic Methods (by the example of the River System Techa-Iset-Tobol-Irtysch Pollution)* \K.V. Lunyova, A.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 5 tables, 1 illustration. – References, 7 titles.