

Сюрпризы каскадных ядерных реакторов

В. Ф. КОЛЕСОВ, Н. В. ЗАВЬЯЛОВ, В. Т. ПУНИН

Значительную долю потребляемой в мире электрической и тепловой энергии производят ядерные реакторы. Но до сих пор, особенно после Чернобыльской аварии, остается актуальным вопрос о повышении их безопасности. Перспективный путь решения этой проблемы — перевод ядерной энергетики на базу электроядерных установок, представляющих собой комплекс из мощного ускорителя протонов и глубоко подкритичного ядерного реактора, называемого бланкетом. Электроядерные установки избавлены от опасности неконтролируемого разгона мощности. Они проще в управлении, в них легче решать задачу ликвидации радиоактивных отходов.

Электроядерные установки открывают большие возможности и для создания интенсивных импульсных источников ядерных излучений, необходимых при проведении многих физических и испытательных экспериментов. Распространенными генераторами этого типа излучений являются импульсные ядерные реакторы. Однако наиболее короткие по длительности импульсы способны выдавать лишь так называемые бустеры — это тоже электроядерные установки в составе реактора и сильноточного ускорителя электронов. Ускоритель

в данном случае генерирует очень короткий по длительности затравочный импульс фотонейтронов, а реактор размножает их, сохраняя импульс коротким.

Идеи электроядерных установок того и другого типа известны давно, по ним выполнено много теоретических, проектных и экспериментальных работ, однако полномасштабных установок до сих пор нет. Главное препятствие на пути их реализации — слишком высокие требования к мощности ускорителей. Так, для электроядерных установок первого типа требуется стационарный ускоритель протонов с мощностью в пучке до 50 МВт.

Существенное снижение требований к мощности пучка может быть достигнуто на пути использования каскадных реакторов. Каскадными называют двухсекционные реакторы с односторонней или преимущественно односторонней нейтронной связью секций. Реактор можно считать двухсекционным, если его активная зона состоит из двух частей, чем-то отличающихся одна от другой или разделенных пространственно, а деления хотя бы в одной секции частично производятся нейтронами от делений в другой секции. Это тот случай, когда нейтроны одной

секции влияют на процесс делений в другой секции, а нейтроны другой секции не влияют на процесс в первой секции. Наиболее важными входными параметрами каскадных реакторов являются собственные коэффициенты размножения нейтронов в первой и второй секциях, во всей системе и коэффициенты нейтронной связи секций между собой.

Первое упоминание о реакторных системах каскадного типа содержится в статье американского ученого Л. Борста, опубликованной в 1957 г. Односторонность нейтронной связи секций в модели создавалась экранами из поглотителей нейтронов, устанавливаемыми между секциями. Предполагалось, что принцип каскадности может быть использован в системах с запальным реактором для достижения более высокого выгорания топлива в секциях. После непродолжительного обсуждения в печати идея каскадных реакторов была надолго забыта.

Эта идея возродилась во ВНИИЭФ в конце 1970-х годов в связи с поиском конструкций аperiodических импульсных реакторов с более короткими импульсами нейтронов и гамма-излучения. В 1979 году В. Ф. Колесовым и А. А. Малинкиным было показано (см.:

ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 4. С. 10), что значительного укорочения длительности импульса в реакторе можно достичь использованием реакторных систем каскадного типа. Одновременно ими был предложен способ осуществления односторонней нейтронной связи секций, заключающийся в использовании в одной из секций в качестве активного материала нептуния (^{237}Np) — порогового делящегося вещества, а также в размещении между секциями слоя замедлителя нейтронов типа вольфрама.

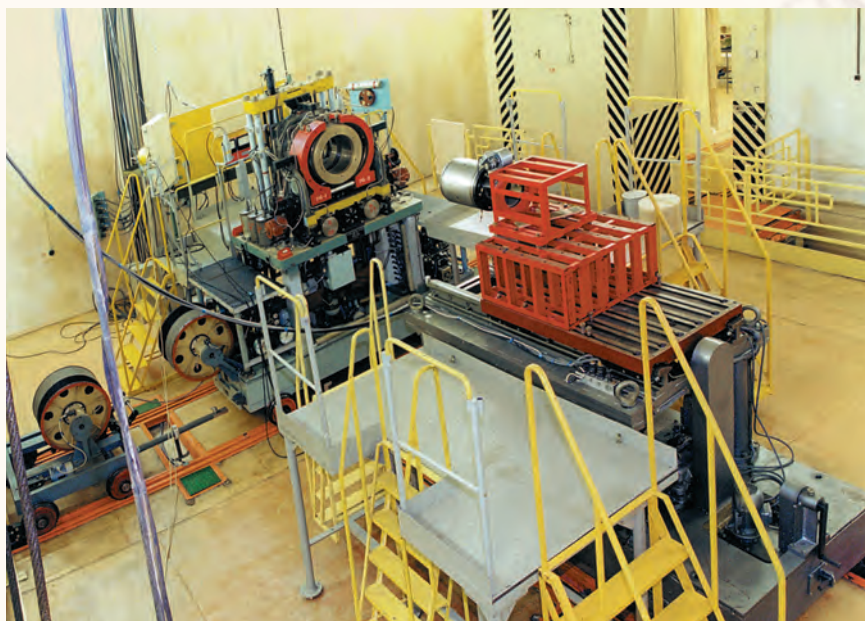
Показателем эффективности принципа каскадности применительно к импульсным реакторам и бустерам является отношение ξ длительности импульса в обычной (односекционной) (T_0) и каскадной (T) реакторных систем при условии одинакового энерговыделения за импульс в каждой из них (в случае бустеров — также и равного числа нейтронов в иницирующем нейтронном импульсе): $\xi = T_0/T$.

На основании указанного предложения в начале 1980-х годов во ВНИИЭФ А. И. Павловским, А. А. Малинкиным, В. Ф. Колесовым и др. был разработан проект бустера-реактора «Каскад» (БР-К) с внутренней активной зоной из сплава ^{237}Np с галлием и внешней активной зоной из уран-молибденового сплава (рис. 1). Предполагалось, что БР-К будет действовать в комплексе с сильноточным ускорителем электронов ЛИУ-30, который будет поставлять в секцию из нептуния 10^{15} первичных нейтронов в импульсе длительностью 20–100 нс. Импульсы делений в БР-К в сравнении с импульсами в односекционном устройстве имели бы в 7–10 раз меньшую длительность.

В 1990-х годах направление проектирования двухсекционных бустеров получило новый импульс в Сандийских национальных лабораториях США. П. Д. Гриффин, Д. Д. Миллер, Ф. А. Хармс и др. описали концептуальный проект каскадного бустера, разработанного под влиянием указанной выше публикации В. Ф. Колесова и А. А. Малинкина и являющегося продолжением работ по программе EDNA. По мнению авторов проекта, этот бустер полностью удовлетворит требованиям к импульсному источнику излучения будущего поколения, ориентированному на проведение испытаний по радиационной стойкости.

На стационарные энергетические системы, т. е. на электроядерные установки первого типа, принцип каскадных реакторных систем был распространен во ВНИИЭФ в 1993 г. В. Ф. Колесовым и Б. Я. Гужовским. Именно тогда было показано, что использование в электроядерных установках blankets каскадного типа пре-

доставляет возможность существенного снижения мощности ускорителя протонов (рис. 2). В качестве показателя эффективности принципа каскадности применительно к blankets электроядерных установок принимается коэффициент каскадного усиления A , равный отношению чисел делений в каскадном (P) и обычном (P_0) blankets, нормированных на один нейтрон источника со спектром нейтронов деления калифорния ^{252}Cf , при условии равенства коэффициентов размножения того и другого blankets: $A = P/P_0$. Среди других данных приведены и найденные из аналитических решений соотношения между параметрами каскадных реакторов. С помощью этих соотношений легко прослеживаются качественные зависимости параметров каскадных систем. Однако более точные и близкие к конкретным условиям данные следуют из численных расчетов по программам Монте-Карло. Во ВНИИЭФ в настоящее время такие расчеты проводят



Импульсный ядерный реактор БР-К1

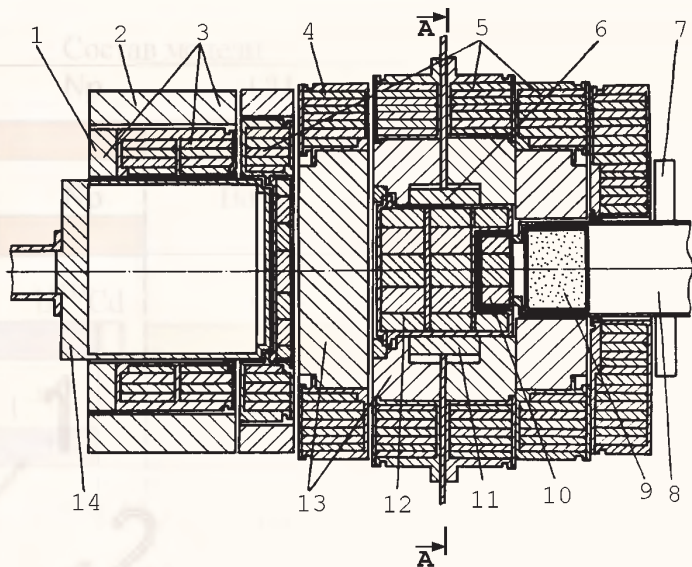


Рис. 1. БР-К в осевом разрезе: 1 — отражатель нейтронов; 2, 3 — регулирующий и подвижный блоки второй секции; 4 — аварийный блок; 5 — неподвижные блоки второй секции; 6, 10, 11, 12 — регулирующий, подвижный, импульсный и неподвижный блоки первой секции соответственно; 7 — стоп-блок и импульсный блок второй секции; 8 — канал для проводки тормозного излучения; 9 — замедлитель нейтронов типа ${}^6\text{LiH}$; 13 — вольфрам; 14 — контейнер для облучаемых образцов

преимущественно с помощью программы ИТМФ С-95.

В. Ф. Колесовым, В. Х. Хоружим, А. К. Житником и др. выполнен ряд масштабных расчетных работ, в том числе и с привязкой к реалистичным бланкетам лос-аламосского проекта АВС и проекта КПЖСР Курчатовского института. Эти расчеты привели к заключению, что

использование в этих бланкетах принципа каскадности и ${}^{237}\text{Np}$ имеет следствием десятикратное снижение мощности ускорителя протонов. Примерно к таким же выводам пришли и авторы других работ по каскадным бланкетам. Г. В. Киселев в одной из российских статей в 2001 г. назвал идею каскадных реакторов «технически революционной».

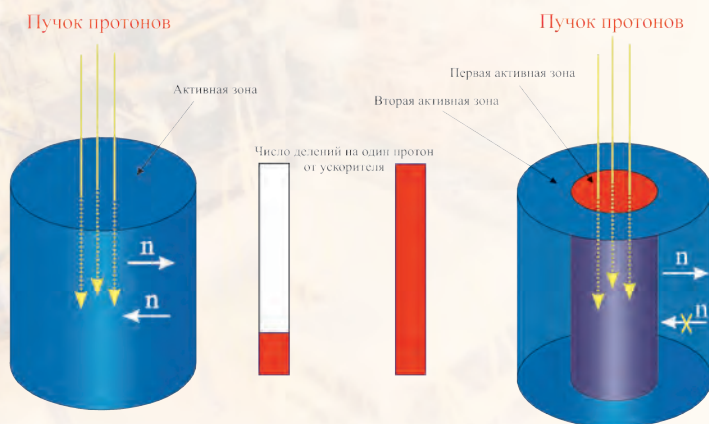


Рис. 2. Схемы бланкетов. Подкритичность бланкетов 5%. Слева обычный бланкет, справа — каскадный

В настоящее время к теме каскадных бланкетов проявляют интерес многие институты России и зарубежные лаборатории. Имеются проекты энергетических электроядерных установок с бланкетами каскадного типа. Существенно, однако, что все известные работы по каскадным системам относились к разряду расчетно-теоретических или проектных. Эксперименты на каскадных реакторах нигде не проводили.

Такие эксперименты были запланированы в Институте ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) ВНИИЭФ в рамках работ по проектам МНТЦ. Предполагалось, что эксперименты будут направлены на подтверждение действительности ${}^{237}\text{Np}$ в качестве средства обеспечения односторонней связи секций и проверку преимуществ каскадного бланкета в части снижения мощности ускорителя.

В 2001–2004 гг. большим коллективом сотрудников ИЯРФ под руководством Н. В. Завьялова подготовлены и выполнены три серии экспериментов на глубоко подкритичных уран-нептуниевых сборках, являющихся моделями каскадных и соответствующих им односекционных бланкетов. Это — эксперименты на:

- компактных моделях из металлического ${}^{237}\text{Np}$ и ${}^{235}\text{U}$ с использованием изотопного источника нейтронов, размещаемого в центре моделей;

- таких же моделях с использованием в качестве источника нейтронов высокочастотного линейного ускорителя электронов ЛУ-50;

- моделях с первым каскадом из металлического ${}^{237}\text{Np}$ и вторым каскадом в виде гетерогенной композиции из таблеток ${}^{235}\text{U}$ и фторидных соединений с использованием изотопного источника нейтронов.

В экспериментах применены сборки с низкими (примерно 0,6) значениями коэффициентов размножения нейтронов. Такие сборки просты по конструкции и компактны, содержат сравнительно небольшое количество делящихся веществ и заведомо удовлетворяют требованиям ядерной безопасности. Было показано, что отличие эффективности моделей обычных и каскадных бланкетов в этом случае невелико, но вполне достаточно, чтобы быть зафиксированным в эксперименте.

Первичная задача заключалась в измерении или оценке на основе экспериментальных данных полных чисел делений в каскадной и соответствующей ей односекционной моделях при условии одного и того же источника нейтронов и одинаковых значениях коэффициентов размножения нейтронов. Из измерений находили важный показатель каскадного бланкета — коэффициент A , равный отношению полных чисел делений в каскадной и односекционной моделях. Важность коэффициента A определяется тем, что именно в A раз можно снизить мощность ускорителя частиц при переходе к бланкету каскадного типа.

При подготовке экспериментов и обработке первичных результатов был проведен большой цикл расчетных исследований вариантов модельныхборок, учитывающий возможность их реализации путем использования имеющихся во ВНИИЭФ деталей (или заготовок) из нептуния и обогащенного урана.

С помощью расчетов подбирали размерыборок, приблизительно соответствующие заданному полному коэффициенту размножения нейтронов и удовлетворяющие условию бли-

зости коэффициентов размножения нейтронов во внутренней и во внешней секциях. Также вычисляли полное число делений во внутренней и внешней секциях. На основании этих расчетов для проведения экспериментов выбраны сферические сборки из металлического ^{237}Np и урана 90 %-го обогащения по ^{235}U . Нептуний размещали в центреборок, уран — на периферии. Пространство между нептунием и ураном заполняли полиэтиленом или оставляли пустым. В центреборок помещали точечный источник нейтронов с делительным спектром. В первом эксперименте было изучено 11 размножающихборок.

Состав и размеры этихборок в несколько идеализированном виде представлены на рис. 3. Реально сферические слои состоят из полусфер. Каждая урановая полусфера имеет медно-никелевое покрытие общей толщиной ~50 мкм. Полусферы из нептуния заварены в герметичные чехлы из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. В одной нептуниевой и во всех урановых полусферах имелись полюсные отверстия диаметром 12 и 27 мм соответственно.

Эксперименты проводили на стенде ВНИИЭФ ФКБН-2М для критическихборок. Для контроля актов деления ядер ^{237}Np и ^{235}U и нейтронов применяли серию разнообразных детекторов и методик регистрации излучений. В качестве источника первичных нейтронов в измерениях на каскадных и односекционныхбороках использовали метрологически аттестованный источник ^{252}Cf . Облучение одной конкретной сборки продолжалось от нескольких минут до 5 ч.

Второй эксперимент проводили на компактных моделях из металлического ^{237}Np и ^{235}U

с использованием в качестве источника нейтронов ускорителя ЛУ-50. Измеряли коэффициенты размножения нейтронов в нескольких видоизмененныхбороках 1 и 6 (рис. 3) и инертной модели, отличающейся от сборки 6 тем, что вместо урановой сферической оболочки в ней была установлена аналогичная по геометрии оболочка из стали марки 20. Нейтроны источника возникали в центральном свинцовом шарике. Их генерировало тормозное излучение от электронной танталовой мишени ускорителя. Конструкцияборок 1 и 6, использованных в этом эксперименте, представлена на рис. 4.

Третий эксперимент проведен с более сложными и габаритнымибороками, моделирующими бланкет на расплавленных фторидах, разработанный в РНЦ «Курчатовский институт» (система КПЖСР). В качестве первичного источника нейтронов в третьем эксперименте, как и в первом, использован источник ^{252}Cf . На основании расчетов была разработана конструкция и изготовлена глубоко подкритичная лабораторная модель бланкета, схематически представленная на рис. 5.

Блок замедлителя-отражателя в модели представляет собой массив графита в стальном каркасе. В центре графитового массива находится сварной цилиндрический сосуд из алюминиевого сплава, расположенный горизонтально. Диаметр и длина цилиндра — по 600 мм. В объеме сосуда смонтированы трубы из алюминиевого сплава, пространство между ними заполнено замедляющим нейтроны материалом из NaF. В центральной трубе на половине ее длины расположена сферическая сборка из ^{237}Np (та же, что и в экспериментах 1, 2). Остальной объем канала запол-

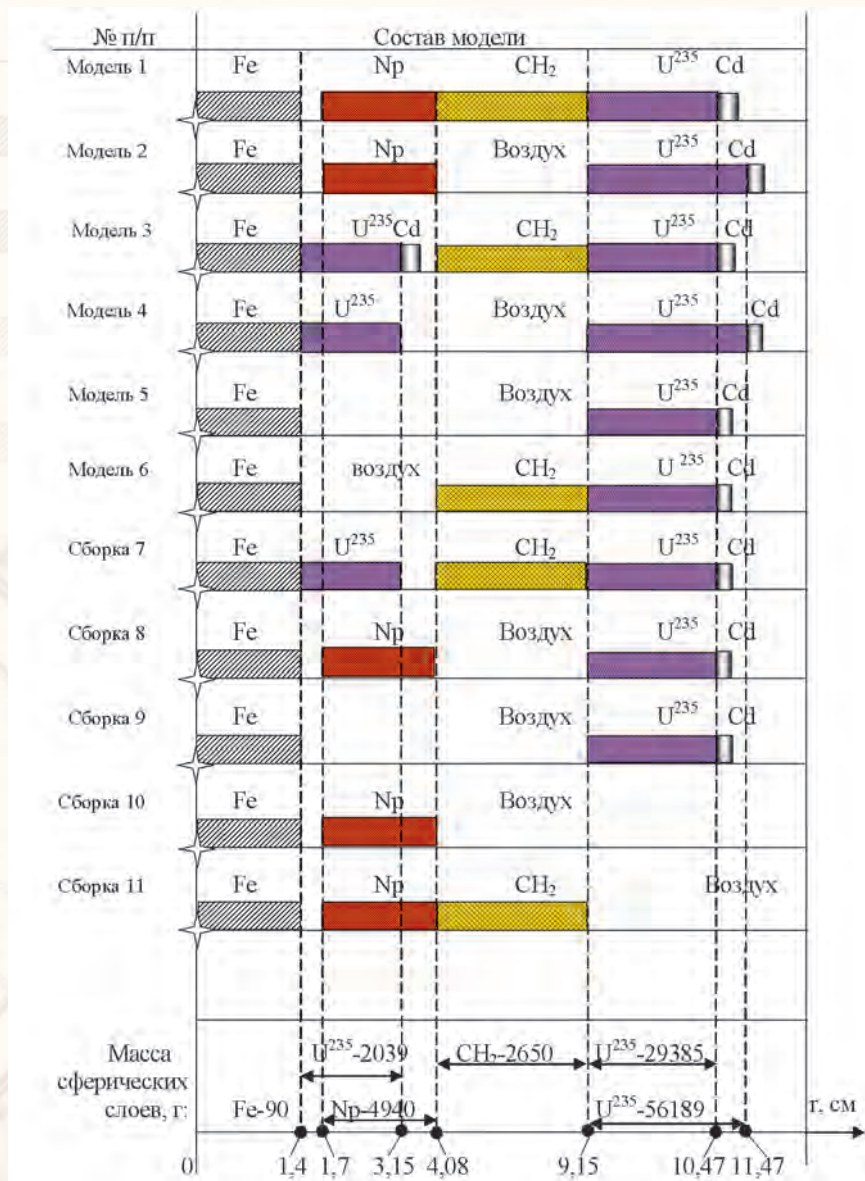


Рис. 3. Схема сферических модельных сборок, исследованных в первом эксперименте

нен цилиндрическими вкладышами из алюминия, содержащими NaF, имеющими канал с внутренним диаметром 48 мм. В этом канале размещали цилиндры диаметром 47 мм с солью ZrF₄ и двумя таблетками из зачехленного металлического урана (масса таблетки 87,6 г). Таблетки из урана располагали между цилиндрами из ZrF₄.

Вне центрального канала сборка содержала еще 42 канала

с внутренним диаметром 48 мм. В этих каналах размещали по 6 цилиндров из очехлованной алюминием соли ZrF₄, чередующихся с 5 таблетками из урана. Общее количество урановых таблеток в солевом блоке — 214, суммарная масса урана — 18 746 г. Шесть каналов диаметром 22 мм были предусмотрены для размещения ионизационных камер, предназначенных для измерения пространственного рас-

пределения чисел делений в левой секции модели.

Во всех экспериментах для каждой модели получены удовлетворительно согласующиеся с расчетом числа делений в сборках коэффициенты каскадного усиления. Из экспериментов следует, что в полном соответствии с данными расчетов и теоретическими представлениями каждая рассмотренная каскадная сборка отличается значительным каскадным усилением числа делений.

Эксперименты подтвердили теоретические заключения о положительных свойствах каскадных бланкетов и эффективности ²³⁷Np в качестве средства достижения односторонней связи секций. Кроме того, они предоставили ценную информацию о работе каскадных реакторных устройств в комплексе с ускорителем электронов.

Удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных, полученных на глубоко подкритичных моделях, увеличило доверие к результатам расчета параметров каскадных бланкетов с реальными значениями коэффициентов размножения нейтронов. Как следует из многих расчетов, коэффициент каскадного усиления для моделей с реальными значениями коэффициентов размножения нейтронов 0,95–0,98 может достигать 10 и более высоких значений.

Во ВНИИЭФ намечены расчетно-экспериментальные исследования и эскизное проектирование демонстрационного (опытного) образца электроядерной установки с каскадным бланкетом. В настоящее время в ИЯРФ прорисован облик такой энергетической установки небольшой мощности (до 500 МВт, тепловой) с коэффициентом размножения нейтронов 0,95 и ха-

рактными размерами активной зоны ~2 м. Бланкет будет действовать целиком на основе долгоживущих отходов ядерной энергетики. При этом его внутренняя секция будет представлена расплавленным металлическим ^{237}Np , а внешняя — гетерогенной структурой из ТВЭЛов отработавшего топлива в графитовой матрице. Центральная область будет представлять собой типичную активную зону на быстрых нейтронах, внешняя — зону на тепловых нейтронах.

Коэффициент каскадного усиления A для этого blankets равен 10, мощность центральной

секции составит 65 МВт, внешней — 435 МВт. Электроядерная установка позволит производить электрический ток и выжигать за год более 200 кг долгоживущих дочерних актинидов. Теплосъем в центральной секции будет осуществляться прокачкой самого непутия, во внешней — газообразного гелия. При энергии протонов ~ 800 МэВ требуемая мощность ускорителя будет равна 1 МВт. В электроядерной установке с обычным (односекционным) blanketом при тех же параметрах потребовался бы ускоритель протонов мощностью 10 МВт.

Эскизному проектированию установки будут предшествовать эксперименты на умеренно охлаждаемом макете blankets мощностью 1–10 кВт. Внешняя секция в макете будет представлена имитаторами долгоживущих отходов в виде комбинации из урана-235 и бора. Основными задачами программы исследований на макете будут опытное подтверждение заложенных в проект демонстрационной установки значений нейтронных параметров, в частности, коэффициента каскадного усиления A , интенсивностей выжигания дочерних актинидов и режима охлаждения внешней секции blankets.

Эскизное проектирование демонстрационного образца каскадного blankets и исследование его макета являются важным этапом на пути практической реализации электроядерных установок и, следовательно, повышения безопасности ядерной энергетики и решения проблемы уничтожения радиоактивных отходов.

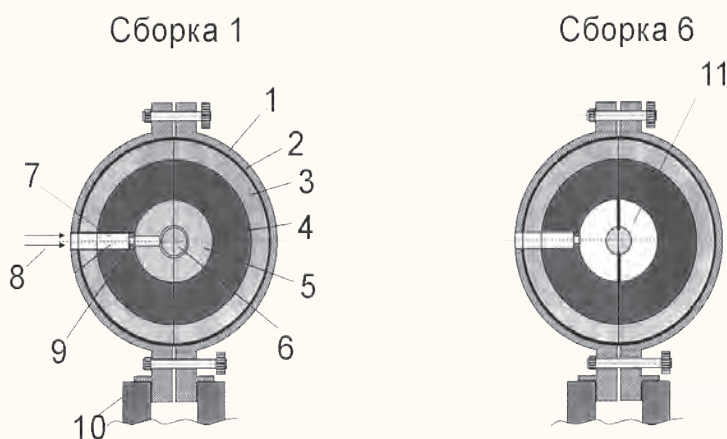


Рис. 4. Модельные сборки, исследованные во втором эксперименте:
 1 — Al; 2 — Cd; 3 — ^{235}U (90 %); 4 — CH_2 ; 5 — ^{237}Np ; 6 — Pb;
 7 — воздушный канал; 8 — пучок n-, γ -излучений ЛУ-50;
 9 — алюминиевая ограничительная шайба; 10 — стэнд;
 11 — воздушная полость

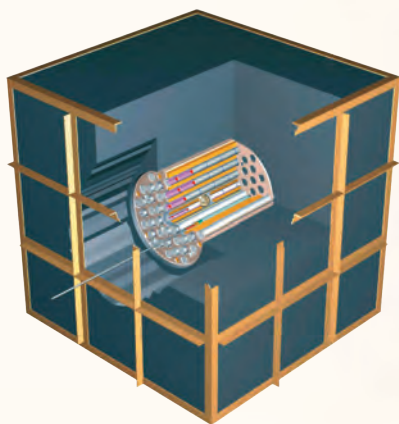


Рис. 5. Лабораторная модель blankets на фторидах

КОЛЕСОВ

Владимир Федорович — начальник отдела ИЯРФ ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ, заслуженный деятель науки РФ

ЗАВЬЯЛОВ

Николай Валентинович — первый заместитель директора ИЯРФ ВНИИЭФ по науке, доктор физ.-мат. наук

ПУНИН

Валерий Тихонович — заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, директор ИЯРФ ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, лауреат Государственной премии