

Методология и практика анализа риска являются относительно новой дисциплиной, которая продолжает интенсивно развиваться и должна находиться в поле зрения специалистов по безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный** закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ. — В сб.: Собрание законодательств Российской Федерации, 2002, № 52, ст. 5140.
2. **Федеральный** закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ. — Там же, 2002, № 2, ст. 133.
3. **Федеральный** закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.06.1997 № 116-ФЗ. — Там же, 1997, № 30, ст. 3588.
4. **Гордон Б.Г.** Об использовании понятия риска в различных отраслях промышленности. — Вестник Госатомнадзора России, 2003, № 1, с. 3—7.
5. **Ковалевич О.М.** Вероятностный анализ безопасности и обоснование рисков в атомной энергетике. — Энергия: экономика, техника, экология, 2004, № 12, с. 20—25.
6. **Ковалевич О.М.** Условия устойчивого развития ядерной энергетики. — Там же, 2004, № 3, с. 14—18.
7. **Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б.** Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 136 с.
8. **Гухман Г.** Берегись огня. — Энергия: экономика, техника, экология, 2004, № 2, с. 38—39.
9. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 6, с. 469—497.
10. **Основные** принципы безопасности атомных электростанций. Сер. изд. по безопасности № 75-INSAG-3. Информационный бюллетень № 2(7). М., Госатомнадзор СССР, 1988. 92 с.

Поступила в Редакцию 29.04.05

УДК 621.039.519

ВОЗМОЖНАЯ ПЕРСПЕКТИВА КАНАЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

Ганев И.Х. (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея)

Перспектива РБМК, как она представляется на сегодняшний день, состоит, в основном, в безопасном завершении проектного 30-летнего срока эксплуатации 11 блоков с продлением срока до 40—45 лет, если это окажется возможным. Будет также завершено строительство и пущен 12-й РБМК (5-й блок Курской АЭС), нейтронно-физическая безопасность которого повышена за счет уменьшения количества графитового замедлителя и дальнейшего снижения в связи с этим положительных эффектов обезвоживания и парообразования. Как отмечено в международном каталоге мировых энергетических реакторов [1], вместо части выводимых РБМК-1000 может быть внедрен многопетлевой МКЭР-800 мощностью 800 МВт.

МКЭР-800 является улучшенной версией РБМК, сохраняющей как его достоинства, так, однако, и недостатки. В числе последних можно отметить малую глубину выгорания топлива и такие технологические недостатки, как накопление в реакторе активируемого графита (^{14}C) и возможность пароциркониевой реакции с уменьшением толщины оболочек твэлов, омываемых кипящей водой. В связи с этим может быть рассмотрен вариант РБМК без этих недостатков и с дополнительными возможностями.

РБМК возникли вскоре после создания и освоения промышленных уран-графитовых реакторов, производящих из природного урана оружейный плутоний, сохранив некоторые тенденции этих реакторов. Так, необходимым условием была предельно малая критическая масса со средним по объему активной зоны обогащением в режиме непрерывных перегрузок $\sim 0,4\%$ ^{235}U в природном уране. Как следствие, жесткое требование к малому непроизводительному поглощению нейтронов в конструкционных материалах и топливе. В РБМК малопоглощающий нейтроны алюминий был заменен на более термостойкий и слабопоглощающий цирконий. Новый подход, связанный с повышением обогащения, проявляется, например, в том, что полезным считается добавление к топливу поглотителя, в современных РБМК эрбиевого выгорающего поглотителя. При первоначальном создании РБМК графитовый замедлитель был оставлен, так как позволил снизить резонансное поглощение нейтронов и критическую массу.

Однако реалии настоящего времени во многом противоположны качествам промышленных реакторов. На горизонте мы видим внедрение в ядерную энергетику быстрых реакторов с коэффициентом воспроизводства делящегося топлива, равным или большим единицы. В быстрых реакторах нет жестких ограничений на поглощение нейтронов в конструкционных материалах и цирконий заменяют сталью, обеспечивающей более глубокое выгорание и повышение к.п.д. Допустима более высокая критическая масса, обязательной является работа на ^{239}Pu вместо ^{235}U . Имеет ли смысл перенесение хотя бы части этих качеств в тепловые реакторы? Иными словами, как может выглядеть некоторый новый вариант РБМК для использования вместо выводимых реакторов?

В основе проектирования реакторов лежат такие требования, как экономия рождающихся при делении нейтронов, экономия делящихся ядер и, как следствие, экономия критической массы. Если из РБМК изъять графит, то вероятность утечки нейтронов и их потеря, связанная непосредственно с этим, увеличатся. Однако одновременно будет исключена вероятность поглощения нейтронов в графите, эффективный коэффициент размножения нейтронов останется почти неизменным. Иными словами, нейтронам есть куда лететь (вылетать из активной зоны через полости, оставшиеся после удаления графита), но по дороге они пересекают области активной зоны с топливом и интенсивно поглощаются ввиду большей, чем раньше, массы делящегося топлива и поглотителя, в результате не испытывают чрезмерную утечку. Вероятность утечки снижается до обычного для энергетических реакторов значения ввиду того, что топливо «перехватывает» нейтроны и не дает им вылетать из области цепной реакции. Баланс нейтронных процессов при $K_{\text{эф}} = 1$ должен выполняться при снижении вероятности утечки за счет повышения вероятности их поглощения.

Вопрос о нежелательности повышения критической массы является до некоторой степени спорным, так как критическая масса стартовой загрузки не теряется, а преобразуется с примерным сохранением состава и размера и после окончания срока службы установки может быть использована. Начальные капитальные вложения могут окупиться своеобразными процентами на капитал ввиду наиболее вероятного роста стоимости делящегося материала с течением времени.

Потеря делящихся ядер в процессе энерговыработки компенсируется в быстрых реакторах их высоким воспроизводством. В тепловых реакторах на обогащен-

ном уране этого нет, так как коэффициент воспроизводства мал ввиду уменьшения в тепловом спектре количества рождающихся при делении нейтронов. В РБМК без графита он, возможно, будет еще меньше. Однако при необходимости можно рассмотреть некоторые меры по его повышению, например, введением торцевых и боковой зон воспроизводства или отражателей (^{238}U , сталь, графит).

Определенный смысл есть в использовании в составе топлива модифицированных РБМК плутония, в том числе оружейного и Am, Cm, Np из облученного топлива ВВЭР-1000 с последующим переводом этого топлива в стартовую загрузку быстрых реакторов. Таким образом, возникает промежуточный класс тепловых реакторов между современными тепловыми и будущими быстрыми, которые используют топливо, разрабатываемое для быстрых. Облученное топливо этих реакторов, выводимых из действия, содержит значительно большую удельную массу плутония, чем топливо ВВЭР, работающих на обогащенном уране.

Оценим возможность и целесообразность создания модифицированной версии РБМК с ориентацией на некоторые параметры быстрых, а не промышленных реакторов. При этом сохраняются расстановка ТВС по квадратной решетке с шагом ~25 см, вид и параметры теплоносителя (кипящая вода), такие средства влияния на реактивность, как поглощающие стержни, дополнительные и выгорающие поглотители. Таким образом, сохраняются конструкция и параметры всей установки РБМК, за исключением некоторых изменений в активной зоне, приводящих к существенному изменению нейтронно-физических параметров реактора. В качестве начальных конструктивных шагов может быть проведена замена графитового замедлителя на газ, циркониевых оболочек твэлов и циркониевых канальных труб на сталь в целях компенсации реактивности, появляющейся при повышении загрузки делящегося топлива и реактивности.

Последующие, требующие изучения замены могут касаться числа твэлов (60 или 36 вместо 18) и размера оболочки (6,9×0,4 вместо 13,6×0,9 мм). Твэлы диаметром 6,9 мм в стальной оболочке разрабатываются в НИИАРе для быстрых реакторов [2, 3], достигнутый уровень по глубине выгорания составляет 15—30% тяж. ат. и выше, применяются виброуплотнение смешанного диоксидного топлива и «сухой» электрохимический метод его переработки. Твэлы ориентированы на быстрый спектр и натриевый теплоноситель, но можно утверждать, что сталь окажется пригодной и при охлаждении кипящей водой при меньшей температуре оболочек твэлов и большем газовом объеме для продуктов деления.

Исключение из активной зоны графита, циркония и ввод стали соответствуют той или иной критической массе и глубине выгорания в установившемся режиме непрерывных перегрузок. Этот режим характерен определенным обогащением топлива подпитки, соответствующим критичности реактора с данной конфигурацией и составом активной зоны и с учетом заданного выгорания выгружаемого топлива. При таком подходе соответствующую массу делящегося материала в активной зоне и глубину выгорания необходимо повышать по мере роста утечки и радиационного захвата нейтронов в том или ином составе активной зоны. В случае совпадения глубины выгорания и обогащения топлива подпитки отработавшее топливо содержит мало делящегося материала и при работе реактора может удаляться в отходы без химической переработки. По окончании срока действия установки среднее по объему обогащение облученного топлива велико и примерно совпадает с 1/2 обо-

гашения топлива подпитки, что существенно выше, чем в облученном топливе современных ВВЭР.

Рассматриваемые режимы более высокого обогащения топлива подпитки и выгорания упрощают и улучшают эксплуатацию за счет более редких перегрузок ТВС и экономические показатели при меньшей длине оболочек твэлов, приходящейся на некоторую фиксированную энерговыработку, меньшем объеме складов и перевозок.

Для иллюстрации сказанного приведем некоторые расчетные оценки критичности реактора в различных конструктивных вариантах в зависимости от глубины выгорания или средней по объему загрузки делящегося материала. Данные оценочные расчеты проводили в однотемпературном однозонном приближении для гомогенизированного реактора с заменой отражателей длиной линейной экстраполяции.

Вначале рассмотрим установившийся режим непрерывных перегрузок (далее выход в этот режим из начального состояния) со следующими упрощающими предположениями:

топливо стартовой загрузки и подпитки состоит из смеси диоксида оружейного (и/или энергетического) плутония и малопоглощающего высокотемпературного оксида, например, MgO, варьирование содержания холостой добавки позволяет изменять эффективную плотность PuO_2 ;

в выгружаемом топливе ^{239}Pu из топлива подпитки заменен полностью продуктами деления (глубина выгорания составляет 100% тяж. ат. при любом содержании диоксида плутония в топливе), загрузка и выгорание Am, Cm, Np не учитывались;

в среднем по объему активной зоны в установившемся режиме топливо содержит половину начального ^{239}Pu , вторая часть ^{239}Pu заменена продуктами деления;

для упрощения в оружейном плутонии учитывался лишь ^{239}Pu .

Твэлы, содержащие плутоний и холостую добавку, позволяют значительно увеличить коэффициент воспроизводства при использовании концепции внутрикассетной гетерогенности в быстрых реакторах [4]. РБМК могут потреблять избыточный плутоний быстрых [5].

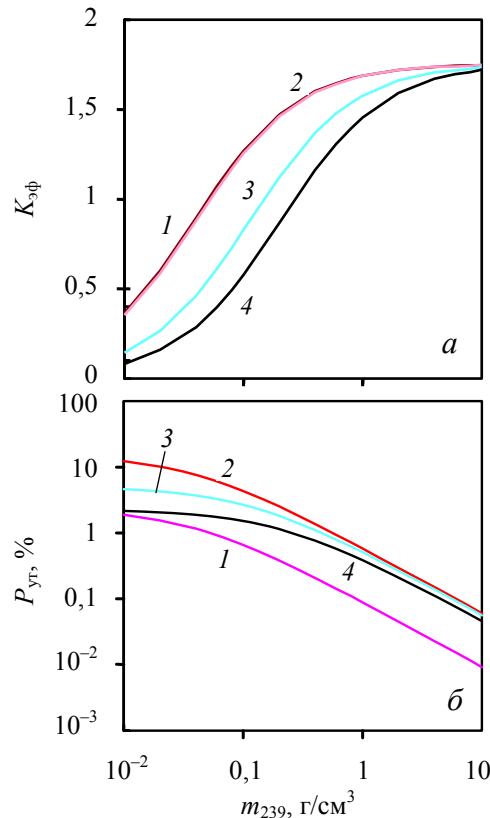
Повышение утечки нейтронов при замене графитового замедлителя газом с последующим снижением за счет роста критической массы рассматривалось на примере основного варианта конструкции активной зоны РБМК с 18 твэлами размером $13,6 \times 0,9$ мм в каналах, расположенных по квадратной решетке с шагом ~ 25 см. В расчете для оценки $K_{\text{эф}}$ в топливе учитывался только ^{239}Pu плотностью до 5 г/см^3 топлива со 100%-ным выгоранием в каждом случае. В расчете рассматривался упрощенный вариант активной зоны с числом топливных каналов, равным 1200, без учета стержней СУЗ, других поглотителей и отражателей, при высоте активной зоны 7 м.

С учетом принятых упрощений эффективный коэффициент размножения равен отношению числа рождающихся нейтронов к числу испытывающих утечку и поглощающихся:

$$K_{\text{эф}} = \sum_{a9} v_{a9} / (DB^2 + \sum_a); \quad \sum_a \approx \sum_{a9} + \sum_{a \text{ конс}} + \sum_{a \text{ ПД}},$$

где $\sum_{a9}$, $\sum_{a \text{ ПД}}$ — макросечения поглощения ядер ^{239}Pu и продуктов деления; v_{a9} — среднее число нейтронов, рождающихся при одном акте поглощения нейтрона ядром ^{239}Pu ; $\sum_{a \text{ конс}}$ — макросечение поглощения в конструкционных материалах (в оболочках твэлов и канальных трубах); DB^2 — макросечение утечки; D — коэффи-

коэффициент диффузии; B^2 — геометрический параметр; Σ_a — полное макроскопическое сечение поглощения нейтронов в активной зоне.



Р и с. 1. Зависимость эффективного коэффициента размножения (а) и вероятности утечки нейтронов (б) от содержания ^{239}Pu в загружаемом топливе: 1 — стандартный РБМК; 2 — РБМК без графита, замененного газом; 3 — РБМК (графит заменен газом) с заменой циркония в оболочках твэлов на сталь; 4 — РБМК (графит заменен газом) с заменой циркония в оболочках твэлов и канальных трубах на сталь

вероятности утечки. На рис. 1, 2 видны необходимая глубина выгорания и загрузка делящегося материала при $K_{\text{эф}} = 1$. В таблице приведены вероятность поглощения, утечки и другие параметры в различных конфигурациях активной зоны.

Итак, основные шаги и достижения модификации РБМК состоят в использовании режима непрерывных перегрузок для повышения глубины выгорания при работе с твэлами быстрых реакто-

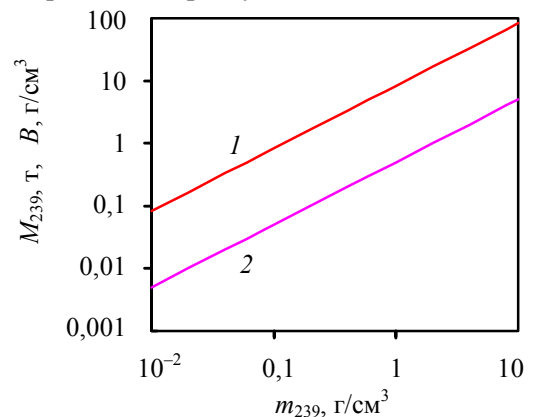
ров. Вероятность утечки и поглощения нейтрона имеет вид

$$P_{\text{ут}} = 1/(1 + \Sigma_a/DB^2); \quad P_{\text{полг}} = 1/(1 + DB^2/\Sigma_a).$$

При полном удалении графита из существующего РБМК эффективный коэффициент размножения не снизится, так как повышение коэффициента диффузии нейтронов D и их утечки из активной зоны компенсируется снижением поглощения нейтронов графитом (рис. 1, а). В дальнейшем в реакторе без графита, который заменен газовой средой, повышение загрузки ^{239}Pu и макроскопического сечения поглощения Σ_a приведет к снижению вероятности утечки за счет повышения поглощения ядер ^{239}Pu и дополнительного повышения поглощения нейтронов в активной зоне Σ_a при замене циркония на сталь (рис. 1, б).

В работающих реакторах $K_{\text{эф}} = 1$ и вероятность утечки примерно одинакова, поскольку этого требует баланс нейтронных процессов в эффективном коэффициенте размножения.

Как добиться полного выгорания ^{239}Pu из топлива подпитки в реакторе без графита с не очень большой избыточной реактивностью? Основной путь — переход в установившийся режим непрерывных перегрузок с увеличением критической массы, что приводит к росту Σ_{a9} и снижению ве-



Р и с. 2. Зависимость массы ^{239}Pu (1) и средней по объему глубины выгорания в установившемся режиме (2) от содержания ^{239}Pu в загружаемом топливе основного варианта

ров и такими одноразовыми средствами компенсации реактивности, как замена графита газом, циркония сталью и др.

Вероятность утечки и другие параметры в модификациях РБМК при $K_{эф} = 1$

Вариант РБМК	Утечка, %	Поглощение, %	Масса ^{239}Pu при $K_{эф} = 1$, т	Глубина выгорания, г продуктов деления/см ³ *
Стандартный **	1	99	0,45	0,055
Графит заменен газом	5,5	94,5	0,45	0,055
Без графита, оболочки ТВЭЛов из стали	3,5	96,5	1,2	0,15
Без графита, оболочки ТВЭЛов и каналные трубы из стали	1	99	2	0,29

*Приведено содержание плутония в загружаемом топливе.
 **В активной зоне оставлен графит, оболочки ТВЭЛов и каналные трубы выполнены из циркония.

Рассмотрим возможный вариант выхода в установившийся режим непрерывных перегрузок из начального состояния. Допустим, что стартовая загрузка реактора составлена из 10 групп ТВС, размещенных с повышением обогащения от центра к периферии реактора. Если в рабочем состоянии реактора (разогретом, равновесно отравленном, работающем на мощности) с выбранной конструктивной схемой $K_{эф} = 1$, то перегрузку облученных ТВС на ТВС подпитки можно начать от центра и далее постепенно перегрузить все ТВС. Если начальный расчетный $K_{эф} > 1$, то в РБМК можно применить различные способы компенсации реактивности с помощью выгорающих или дополнительных поглотителей с подавлением разбаланса реактивности поглощающими стержнями. В этом случае глубина выгорания выгружаемых ТВС повысится, но в первых и последующих группах она не сможет превысить заданный начальный уровень.

Существенно повысить глубину выгорания первых выгружаемых ТВС можно в варианте стартовой загрузки из ТВС с максимальным обогащением топлива, их число может быть уменьшено до значения, когда реактор еще сможет работать на номинальной мощности. Остающаяся избыточная реактивность компенсируется выгорающими гомогенными (гадолиний или ^{10}B в топливе), самокранированными (гадолиний или бор в виде стержней отдельно от топлива) или дополнительными поглотителями (каналы с карбидом бора равномерно по площади активной зоны среди топливных каналов). Значительное время реактор сможет работать без перегрузки за счет выгорания гадолиния или бора. Далее начнется постепенное удаление дополнительных поглотителей от центра активной зоны. Последний процесс должен сопровождаться загрузкой свежих ТВС с максимальным обогащением. Далее перегружаются ТВС стартовой загрузки с начальным обогащением и выгоревшим гадолинием. В конце этого процесса можно догрузить ТВС до номинального значения.

Если в начальном состоянии рассмотренных стартовых загрузок $K_{эф} < 1$, то следует снизить поглощение (вернуться частично к цирконию, например, в канальных трубах) или повысить обогащение без ухудшения ситуации с нераспространением.

В качестве проверенного можно рассмотреть более близкий к РБМК вариант с 18 твэлами высотой по 3,5 м в ТВС высотой 7 м. Твэл не испытан со стальными оболочками, но обеспечивает отработанную гидродинамику теплоносителя в ТВС. Стартовые загрузки могут быть близки к рассмотренным в зависимости от $K_{эф}$ в установившемся режиме.

Рассмотренные варианты позволяют сформулировать общие требования к основному, включая выбор показателей загружаемого и выгружаемого топлива:

отсутствие графита, замененного газом, и циркония, замененного сталью в оболочках твэлов и канальных трубах;

использование твэла размером 13,6×0,9 мм, высотой 3,5 м. ТВС содержит 18 твэлов (часть из них может быть заменена самоэкранированным выгорающим поглотителем);

смесь диоксида плутония (энергетического или оружейного) и холостого материала в количестве, обеспечивающем необходимое значение $K_{эф}$ при полном выгорании делящегося материала в режиме непрерывных перегрузок, в качестве топлива;

одновременная перегрузка ТВС и канальных труб, если время работы труб составляет 15—20 лет, что близко к кампании топлива;

после 5—6 перегрузок приближение срока эксплуатации реакторной установки к 100—120 годам с учетом необходимых замен и радиационной защиты оборудования;

наличие факторов, влияющих на время достижения полного выгорания топлива в конкретной ТВС, — разная плотность потока нейтронов в областях активной зоны и в той или иной ТВС с разным числом гетерогенных выгорающих поглотителей или массой гомогенного выгорающего поглотителя в топливе данной ТВС;

продление срока облучения и выгорания ТВС посредством постепенного удаления из активной зоны дополнительных поглотителей, установленных в активной зоне при первоначальном формировании стартовой загрузки.

В режиме установившихся непрерывных перегрузок при переходе от стандартного РБМК к варианту без графита, с оболочками твэлов и канальными трубами из стали глубина выгорания повышается в 5,3 раза, критическая загрузка ^{239}Pu — в 4,4 раза (см. таблицу и рис. 2). Следовательно, достигается корреляция между глубиной выгорания топлива и увеличением критической массы при росте утечки и/или непроизводительного поглощения нейтронов.

Таким образом, повышение глубины выгорания при достижении очередного технологического предела работоспособности твэлов требует увеличения процессов поглощения и утечки нейтронов в целях компенсации реактивности, т.е. увеличения критической массы (стратегические требования). В дальнейшем при работе на фиксированном уровне по глубине выгорания вероятности радиационного захвата нейтронов и их утечки могут оптимизироваться (снижаться) в соответствии с тактическими задачами улучшения экономических показателей реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Nuclear Industry Handbook. Nuclear Engineering International, 2005.
2. Маершин А.А., Цыканов В.А., Голованов В.Н. и др. Разработка и испытание твэлов быстрых реакторов с виброуплотненным оксидным топливом. — Атомная энергия, 2001, т. 91, вып. 5, с. 378—385.
3. Маершин А.А., Цыканов В.А., Гаджиев Г.И. и др. Опыт испытания перспективных топливных композиций в БОР-60. — Там же, с. 385—389.
4. Пономарев-Степной Н.Н., Алексеев П.Н., Давиденко В.Д. и др. Сравнение направлений развития ядерной энергетики в XXI веке на основе расчета материальных балансов. — Там же, с. 331—337.
5. Габараев Б.А., Ганев И.Х. Условия достижения предельного выгорания топлива в канальном реакторе типа РБМК без замедлителя. — Там же, 2005, т. 98, вып. 2, с. 83—91.

Поступила в Редакцию 23.06.06

УДК 621.039.534

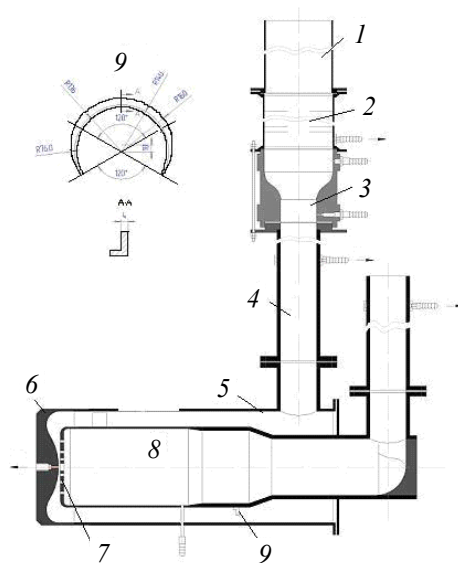
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МИШЕНИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МИШЕННОГО КОМПЛЕКСА МК-1

*Боронин А.А., Ефанов А.Д., Левченко Ю.Д., Орлов Ю.И., Федотовский В.С.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Мишенный комплекс МК-1 предназначен для проведения испытаний в пучке протонов ускорителя. По проекту он привязан к ускорителю протонов LANSCE (США) [1]. В качестве материала мишени используется свинцово-висмутовый сплав. Ионопровод и мишень разделены тонкостенной металлической мембраной. В результате ядерного взаимодействия пучка протонов с материалом мишени генерируется поток высокоэнергетических нейтронов. Этот процесс сопровождается энерговыделением 600 кВт и создает высоконапряженные условия работы мембраны и других элементов мишени. Поток сплава должен обеспечивать необходимый тепло-

съем с мембраны и теплоотвод из мишени в стационарных, переходных и аварийных условиях. Результаты настоящей работы использовали для отработки конструкции мишени, верификации компьютерных кодов.

Гидродинамическая модель мишени. В работе [2] приведены результаты опытов по визуализации течения и измерению скорости воды в месте расположения разделительной мембраны. Для изучения структуры потока теплоносителя по длине всей проточной части мишени была разработана экспериментальная модель, которая соответствовала кон-



Р и с. 1. Гидродинамическая модель ГДМ-1: 1 — подводящий участок; 2 — участок выравнивания профиля скорости; 3 — расходомерное сопло; 4 — входной измерительный участок; 5 — мишень; 6 — имитатор разделительной мембраны; 7 — профилирующая решетка; 8 — цилиндрический участок центральной трубы; 9 — серповидная шайба