

приведенное к максимальному значению, составляет 1,3% для ТВС энерговыработкой 1122 МВт·сут.

Таким образом, можно констатировать, что разработанная методика прямых измерений трехмерных распределений энерговыделения и энерговыработки в ТВС РБМК на работающем реакторе с помощью гамма-нейтронной камеры дает результаты, хорошо совпадающие с результатами расчетов по программе Призма-М. Экспериментально подтверждена возможность применения программы Призма-М информационно-

измерительной системы Скала-микро для контроля энерговыработки выгружаемых ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Защита ядерных реакторов. Пер. с англ. под ред. С.Г. Цыпина. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
3. Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В. Ядерно-физические константы. М.: Госатомиздат, 1963.

Поступила в Редакцию 20.03.07

УДК 621.039.647

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ НА СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОМ СПЛАВЕ

*Безносков А.В., Мелузов А.Г., Новожилова О.О. (Нижегородский гос. техн. ун-т),
Ефанов А.Д. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

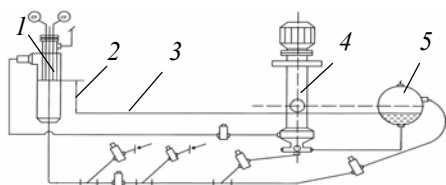
Традиционно рассматриваются две конструктивные схемы жидкометаллической мишени ускорительно-управляемой системы. Одна предполагает наличие металлической стенки (окна, заглушки, перегородки), которая разделяет полости ускорителя с глубоким вакуумом и жидкометаллической мишени, находящейся под давлением. В такой мишени трудно обеспечить работоспособность стенки, разделяющей полости ускорителя и мишени. Эта стенка находится в потоке частиц с высокой энергией, в контакте с жидкометаллическим теплоносителем в условиях температурных пульсаций. Другая схема, рассматриваемая в настоящей статье, предполагает отсутствие стенки, но в данной конструкции необходимо исключить превышение давления в рабочей полости мишени давления в полости ускорителя во всех нормальных и аварийных режимах работы мишенного контура. В противном случае возможно поступление в полость имитатора патрубка подвода ускоренных частиц жидкого металла, содержащего примеси — продукты ядерных реакций ускоренных частиц и тяжелых ядер, в том числе опасных радионуклидов.

Ускорители частиц и ось патрубка ввода ускоренных частиц всегда располагаются в горизонтальной плоскости. Необходимо устройство поворота потока ускоренных частиц перед их вводом в мишень при вертикальном расположении оси. Наличие такого устройства ухудшает

экономические характеристики ускорительно-управляемой системы.

Цель экспериментов, описанных в статье, — определение условий незатекания жидкого металла в полость имитатора патрубка мишени при вертикальном и горизонтальном расположении их осей в диапазоне рабочей температуры и расхода свинцово-висмутовой эвтектики через проточную часть модели натуральных размеров.

Экспериментальный стенд. Испытания проводили на базовом циркуляционном стенде ФТ-1, в состав которого входило следующее оборудование: электронасос с регулированием числа оборотов, номинальная частота вращения 1000 об./мин, расход — до $10 \cdot 10^4$ кг/ч, буферная емкость общим объемом $0,6 \text{ м}^3$, из них $0,3 \text{ м}^3$ — объем эвтектики и $0,3 \text{ м}^3$ — объем защитного газа, расходомерный бак, магнитный расходомер, электрообогреваемые трубопроводы и арматура из стали 08X18H10T внутренним диаметром 25, 40 и 60 мм, системы защитного газа и заполнения и дренажа теплоносителя. Стенд оснащен компьютеризированной системой сбора, обработки и представления информации, системами управления оборудованием и регулирования параметров, силового электроснабжения и охлаждения.

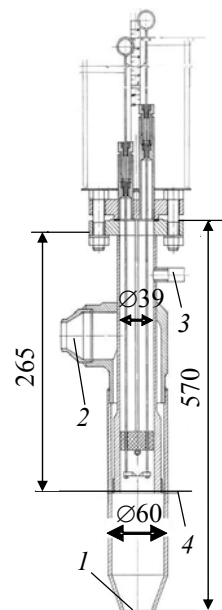


Р и с. 1. Схема высотных отметок оборудования на экспериментальном стенде: 1 — модель мишени; 2 — разность высот свободной поверхности теплоносителя в буферной емкости и свободной поверхности теплоносителя в теле мишени ~2000 мм; 3 — свободный уровень в буферной емкости; 4 — насос; 5 — буферная емкость

Температура циркулирующей свинцово-висмутовой эвтектики до 600 °С обеспечивается электрическими спиралями и трубчатыми электронагревателями, возможен трансформаторный токовый нагрев мощностью до 0,6 МВт. Защитный газ — аргон, гелий, водородсодержащие газовые смеси. Суммарный объем эвтектики около 1 м³, газа — 0,5 м³.

Высотные отметки элементов стенда при испытаниях моделей обеих конструкций мишени аналогичны (рис. 1). При испытаниях горизонтальной модели ее ось располагалась примерно на 2000 мм выше свободного уровня в буферной емкости. Компоновка оборудования стенда обеспечивала разницу около 2000 мм между высотой рабочей камеры мишени и свободным уровнем буферной емкости, в которую сливался теплоноситель. Давление газа в полости мишени измеряли мановакуумметром и вакуумметром. Эта полость сообщалась с системой газа либо отключалась от нее арматурой.

Вертикальная жидкометаллическая мишень (рис. 2). Она выполнена в виде цилиндрического корпуса диаметром 60 мм с нижним коническим переходником и угольником с боковым коническим переходником. В угольник вварен имитатор патрубка подвода ускоренных частиц. К верхней части последнего приварен фланец. В цилиндрическом зазоре между корпусом и патрубком имитатора подвода частиц установлены четыре ребра под углом 15° к образующей патрубка. Его нижняя часть вместе с элементом корпуса мишени образуют сопловой насадок для истечения жидкого металла из кольцевой щели в рабочую полость мишени. К фланцу патрубка через прокладку крепится крышка с двумя электроконтактными сигнализаторами. Сигнализатор выполнен в виде стальной штанги, на нижней части которой закреплен электрический контакт в виде фигурного флаж-



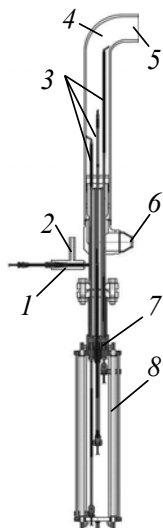
Р и с. 2. Конструктивная схема корпуса с крышкой вертикальной модели жидкометаллической мишени СБ 301 ФТ: 1, 2 — выход и вход жидкометаллического теплоносителя соответственно; 3 — подключение газовой трассы; 4 — нулевой уровень

ка. Вторым контактом является поверхность жидкого металла. Крепление штанги обеспечивает круговое вращение, продольное и вертикальное перемещение.

Подвод жидкого металла в модель — через боковой переходник, отвод — через нижний. Через штуцер в верхней части патрубка имитатора подвода частиц полость мишени сообщается с элементами газовой системы.

Горизонтальная жидкометаллическая мишень (рис. 3). Она выполнена с плавным поворотом вниз трубы диаметром 60 мм и угольником с боковым коническим переходником. В угольник вварен имитатор патрубка подвода ускоренных частиц, к внешней кольцевой части последнего приварен фланец. В цилиндрическом зазоре между корпусом и имитатором патрубка подвода частиц установлены четыре ребра под углом 15° к образующей патрубка. Его крайняя часть, находящаяся в полости корпуса вместе с элементом корпуса мишени, образует сопловой насадок для истечения жидкого металла из кольцевой щели в рабочую полость мишени.

К фланцу патрубка через прокладку крепится крышка с системой перемещения трех электроконтактных сигнализаторов сплошности жидкого металла в горизонтальной плоскости и индивидуального поворота каждого сигнализатора вокруг своей оси. Концы с чувствительными



Р и с. 3. Схема экспериментальной горизонтальной модели мишени СБ 302 ФТ-1: 1 — электроконтактный сигнализатор для измерения незатекания теплоносителя в имитатор патрубка; 2 — подвод газовой трассы; 3 — электроконтактные сигнализаторы для измерения геометрии свободной поверхности теплоносителя; 4 — мишень; 5, 6 — выход и вход жидкометаллического теплоносителя соответственно; 7 — коллектор уплотнения по газу системы электроконтактных сигнализаторов; 8 — система перемещения электроконтактных сигнализаторов

элементами периферийных внешних сигнализаторов отогнуты для получения более полной информации о геометрии поверхности жидкого металла в полости мишени. В верхней части имитатора патрубка подвод частиц вне корпуса модели наклонно установлен электроконтактный сигнализатор затекания жидкого металла в полость патрубка.

Подвод и отвод жидкого металла в модель — через ориентированные вниз боковой переходник угольника и плавный поворот трубы внутренним диаметром 60 мм соответственно. Через штуцер наклонного электроконтактного сигнализатора полость мишени сообщается с элементами газовой системы.

Методика экспериментов. Эксперименты по определению профиля свободной поверхности эвтектики в полости мишени заключались в следующем. Электроконтактные сигнализаторы перемещали в осевом направлении шагами на полную длину их хода. На каждом шаге сигнализатор проворачивали вокруг своей оси ступенями по 15° , записывали данные, которые использовали для построения геометрии свободной поверхности жидкого металла при каждом осевом и радиальном перемещении. Получали две координаты при прерывистом и постоянном

электрическом контакте. По этим точкам строили две геометрии поверхности: волновой поверхности с гребнями (замыкание контакта) и впадинами (размыкание контакта) и поверхности гарантированного контакта, располагающейся в объеме теплоносителя вблизи волновой поверхности.

В испытаниях варьировали расход жидкого металла через мишень в диапазоне $(0,56 - 5,15) \cdot 10^4$ кг/ч для модели с вертикальной и $(1,76 - 2,92) \cdot 10^4$ кг/ч с горизонтальной осью.

Испытания проводили при температуре эвтектики, циркулирующей через мишень с вертикальной осью, $230 - 300^\circ\text{C}$, с горизонтальной — $330 - 340^\circ\text{C}$. При отключенном объеме полости мишени от газовой системы варьировали противодавление на выходе путем ступенчатого изменения избыточного давления в системе газа от 0,01 до 0,2 МПа.

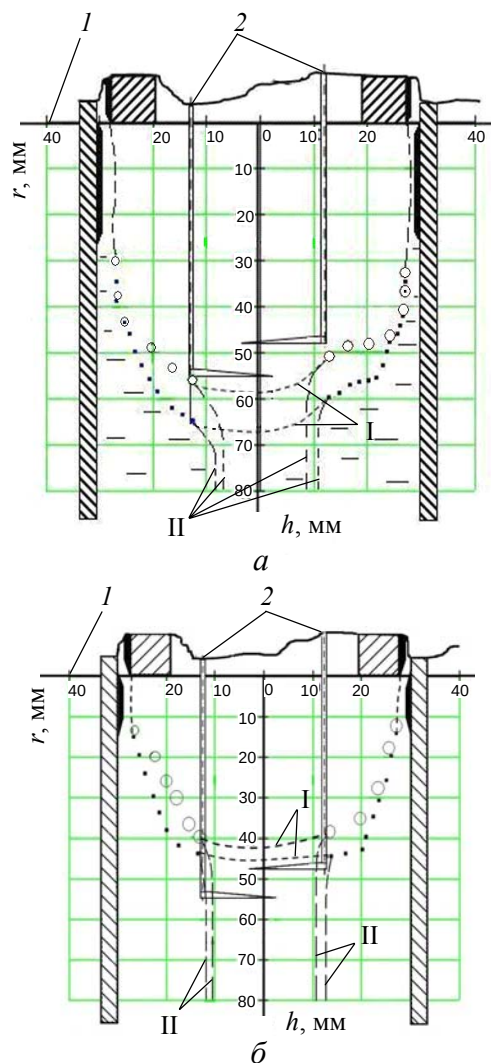
В процессе исследования эжекционных характеристик и с. 5. Проекция на горизонтальную диаметральною тему газа плоскость точек профиля свободной поверхности жидкого металла в горизонтальной модели мишени при расходе (разрежении) $1,77$ ($n = 800$ об./мин) (вид сверху) (а) и $2,8$ м³/ч ($n = 1000$ об./мин) (б): $\circ$, $\square$ — точки постоянного и периодического контакта сигнализатора с теплоносителем соответственно; $\times$ — точки отсутствия теплоносителя воды на свободную поверхность жидкого металла в контуре (для вертикальной модели).

Массоперенос паров теплоносителя фиксировали по образованию конденсата паров жидкого металла на «холодных» участках поверхности этого объема.

Обсуждение результатов. Исследование условий незатекания жидкого металла в полость имитатора показало, что в моделях с вертикальной и горизонтальной осями попадания теплоносителя в полость мишени как при сообщенной, так и при отключенной от системы газа полости не зафиксировано. Этот эффект, по мнению авторов, обусловлен оптимальным сочетанием выбранного угла закрутки потока и геометрии соплового насадка на выходе потока из кольцевой щели в рабочую полость мишени. Отмечено два случая попадания жидкого металла в газовую полость этого патрубка при неправильных действиях эксплуатационного персонала.

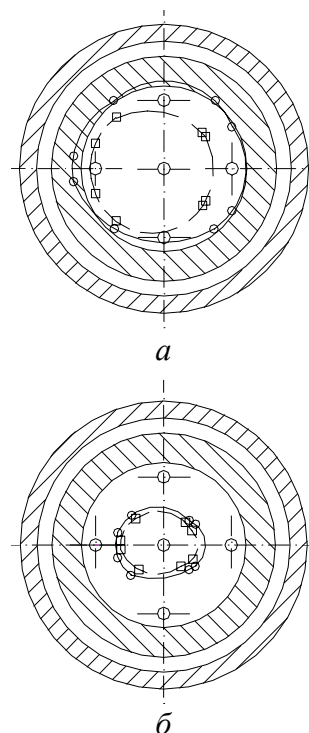
Исследование профиля свободной поверхности жидкого металла в полости модели мишени с вертикальной осью показало, что огибающие верхних экспериментальных точек

соответствуют условию получения устойчивого контакта сигнализатора с поверхностью жидкого металла (рис. 4, 5). Эти точки соответствуют гребням волновой поверхности жидкого металла. Огибающие нижних экспериментальных точек соответствуют условию получения устойчивого постоянного (непрерывного) контакта сигнализатора с условной поверхностью жидкого металла, проходящей в объеме жидкости вблизи поверхности впадин волновой поверхности жидкого металла. Поверхность, проходящая через гребни и выступы волновой поверхности жидкого металла, ближе к конической с малым углом конусности. Далее характер профиля рез-



Р и с. 4. Проекция на вертикальную плоскость точек профиля свободной поверхности жидкого металла при расходе 0,6 (а) и 2,9 м³/ч (б): 1 — нижний обрез патрубка ввода ускоренных частиц; 2 — оси контактных сигнализаторов; ○, □ — проекция точек при постоянном и периодическом контакте левого и правого сигнализатора со свободной поверхностью теплоносителя соответственно; --- — аппроксимация проекций свободной поверхности свинцово-висмутового сплава на вертикальную плоскость

ко меняется — он приближается к профилю эллипсоида вращения с положением нормального сечения большей площади перпендикулярно направлению движения потока.



Р и с. 6. Проекция на вертикальную плоскость точек профиля свободной поверхности жидкого металла в горизонтальной модели мишени при расходе 2,8 м³/ч, $n = 1000$ об./мин, $l = 40$ (а) и $l = 360$ мм (б): ○, □ — точки постоянного и периодического контакта сигнализатора с теплоносителем соответственно

Конструкция вертикальной мишени не позволила определить геометрию профиля в центральной части потока. Можно предположить, что она занимает положение между двумя крайними. Одно из них — поверхность «шнура» с малым углом конусности. Такую поверхность (I) авторы наблюдали при испытаниях аналогичных моделей с прозрачными стенками. Такой вид поверхности зафиксирован при испытаниях модели с горизонтальной осью. Другая — поверхность (II) в центральной части имеет вид эллипсоида вращения вследствие действия сил поверхностного натяжения в поле гравитации.

Меньшая высота парогазовой полости при большем расходе эвтектики через мишень может быть объяснена увеличением противодавления на выходе из мишени вследствие большего гидравлического сопротивления трассы с большим расходом среды. Аналогичный эффект наблюдали при повышении давления газа в системе газа.

Исследование профиля свободной поверхности жидкого металла в полости модели мишени с горизонтальным расположением оси пока-

зало, что внутренняя (ближняя к горизонтальной оси) линия соответствует условию периодического замыкания-размыкания электрореконтактного сигнализатора, внешняя — граничному условию постоянного контакта (см. рис. 5). Расстояние между этими линиями близко к суммарной высоте гребней-выступов и впадин на свободной поверхности жидкого металла. Испытания не позволили определить одновременно положение точек с постоянно и переменным замкнутыми контактами. Этим объясняется наличие локальных участков с наложением этих границ.

На начальном участке входа закрученного потока в рабочую полость мишени форма свободной поверхности жидкого металла в горизонтальной модели близка к аналогичной в вертикальной. Далее в центре потока фиксируется парогазовая полость с формой, близкой к цилиндрической. С увеличением расхода жидкого металла через модель диаметр полости немного увеличивается, но ее протяженность уменьшается. Изменение протяженности полости объясняется повышением гидравлического сопротивления участка трассы после модели. Соответственно возрастает противодавление на выходе из мишени. При увеличении расхода до $2,92 \text{ м}^3/\text{ч}$ (частота вращения насоса 1100 об./мин) зафиксированы протяженность полости около 40 мм и заполнение периферийной зоны имитатора патрубка подвода частиц жидким металлом. Аналогичный эффект наблюдали при испытаниях с вертикальным расположением оси в пространстве на жидком металле и моделей с вертикальным и горизонтальным расположением оси на воде.

Геометрия поверхности парогазовой полости близка к окружности, и ее диаметр уменьшается к выходу из мишени. Ось парогазовой полости смещена относительно оси модели вследствие действия гравитационных сил и несимметричности условий входа потока в модель (рис. 6).

Как показали испытания на воде модели с горизонтальным положением оси, при уменьше-

нии угла закрутки потока протяженность парогазовой полости сокращается. Характеристики потока на входе и в рабочей полости мишени определяются средней осевой (несущей) скоростью угла закрутки потока, противодавлением на выходе из модели и геометрией соплового насадка на входе в рабочую полость.

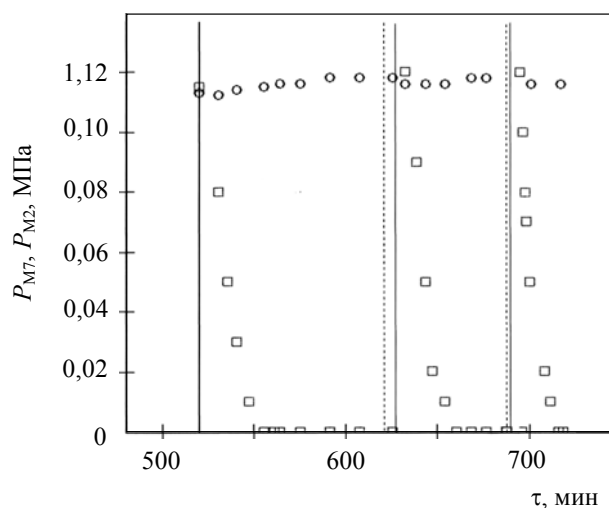
Как и в условиях вертикальной модели, на участке входа потока в рабочую полость свободная поверхность теплоносителя начинается возле кольцевой внутренней поверхности насадка. При увеличении противодавления на выходе из модели и значительном уменьшении протяженности полости зафиксировано перемещение границы начала полости внутрь патрубка имитатора подвода частиц.

Как показали исследования, эжекция газа из полости мишени потоком в волновой поверхности зафиксирована при испытаниях обеих моделей на воде и свинцово-висмутовой эвтектике. Расход эжектируемого газа и глубина достигаемого вакуума не зависят от ориентации оси модели. Они определяются типом рабочей среды, ее расходом, углом закрутки потока, противодавлением, температурой.

Исследования показали, что:

эжекция газа потоком эвтектики в проточной части модели мишени зафиксирована во всем диапазоне ее расхода через модель — $(5—80)10^4 \text{ кг/ч}$;

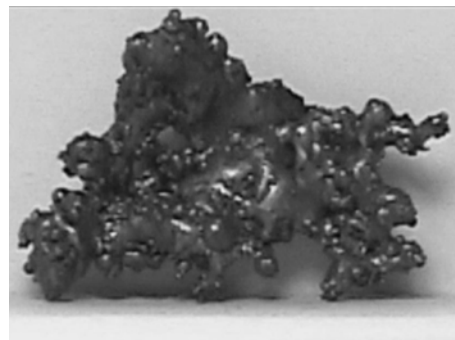
давление и соответственно разрежение, создаваемое эжекцией в полости модели, прежде всего зависят от расхода эвтектики (при фиксированном угле закрутки потока) и давления газа в контуре над свободной поверхностью (рис. 7). Средний расход эжектируемого газа составил $10—20 \text{ дм}^3/\text{ч}$ при расходе эвтектики $(5—51)10^4 \text{ кг/ч}$ и давлении в системе газа $0,105—0,7 \text{ МПа}$. Время достижения $0,1 \text{ МПа}$ (по техническому манометру) составляло от нескольких до десятков минут.



Р и с. 7. Временная зависимость давления газа в системе циркуляционного контура стенда и полости вертикальной модели мишени: □, ○ — показания мановакуумметра М7, подключенного к полости модели, и манометра М2, подключенного к системе газа, соответственно; ---, — — — — подключение и отключение полости мишени от газовой системы соответственно

Анализ результатов исследований эжекционных характеристик проточной части модели при подаче 1,5 кг воды на свободную поверхность эвтектики в течение 1 сут показал существенное отличие вакуумирования полости мишени при наличии водяного пара в контуре. Давление в полости модели, отключенной от газовой системы после сброса из нее газа до атмосферного, вначале возрастало, затем стабилизировалось (давление в системе газа было постоянным). Это может быть объяснено поступлением в полость мишени водяного пара из жидкого металла или менее эффективным уносом водяного пара эжекцией по сравнению с эжекцией аргона и водорода. В последующем при полном удалении водяного пара из контура характеристики эжекции газовой полости мишени соответствовали характеристикам до подачи в контур водяного пара.

Исследование массопереноса паров свинцово-висмутовой эвтектики в полости мишени показало, что при испытаниях вертикальной модели зафиксировано образование отложений неокисленной эвтектики на периферийных областях внутренней поверхности крышки имитатора патрубка подвода частиц в холодной зоне вблизи узлов уплотнений сигнализаторов (рис. 8). Темп образования таких отложений при циркуляции эвтектики через мишень составлял около 50 г в 1 сут. На поверхности образца фиксируются отдельные капли диаметром менее



Р и с. 8. Свинцово-висмутровая эвтектика, перенесенная в парогазовую полость модели мишени (×10)

1 мм, а также образования из последовательно образовавшихся слоев.

При конструктивном исполнении имитатора патрубка подвода частиц с расположенным внутри него с зазором около 1 мм плоским цилиндром дистанционирования сигнализаторов маловероятно, чтобы капли жидкого металла отрывались от его поверхности, пролетали этот зазор, поднимались на высоту 300 мм и концентрировались на локальном участке поверхности. Более вероятными представляются следующие причины:

при понижении давления над свободной поверхностью жидкого металла до 10^{-4} Па и менее при 300—350 °С происходило образование и перенос паров эвтектики с их конденсацией на холодных поверхностях;

в режиме с подачей воды в контур на свободной поверхности в полости мишени сепарировались пузырьки пара, захватывали локальные объемы металла и переносили их в холодные зоны.

В любом случае в полости мишени и на поверхности конденсата отсутствовала примесь кислорода. В противном случае окисленный конденсат эвтектики не мог бы удерживаться на верхней горизонтальной поверхности крышки.

Закключение. Исследования подтверждают возможность создания как вертикальной, так и горизонтальной жидкометаллической мишени, в полости которой поддерживается давление, равное давлению в полости ускорителя частиц за счет эжекции жидким металлом парогазовой смеси.

В проточной части мишени в районе патрубка ввода ускоренных частиц возможно формирование свободной поверхности жидкого металла. Со стороны жидкого металла она ограни-

чивает его поток, с другой стороны — полость ускорителя. Заданная форма этой поверхности может быть обеспечена его скоростью и геометрией соплового насадка на входе жидкого металла в рабочую полость мишени.

Геометрия свободной поверхности — волновая. Протяженность парогазовой полости в

рабочей камере мишени зависит также от противодействия на выходе из мишени, но, как показали эксперименты, она консервативна по отношению к давлению в системе газа мишенного контура.

Поступила в Редакцию 20.02.07

УДК 539.12.08

ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ НАИБОЛЕЕ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАЙОНОВ БРЯНСКОЙ И КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

*Степаненко В.Ф., Яськова Е.К., Орлов М.Ю., Петин Д.В., Крюкова И.Г., Кадиев А.Ю.,
Калашиникова Е.Г., Цыб А.Ф. (Мед. радиологический научный центр РАМН)*

Систематические измерения содержания ^{137}Cs и ^{134}Cs в организме жителей Брянской обл. с использованием мониторов и спектрометров излучения человека проводили начиная с мая 1986 г. Массовые обследования проводили в районах с наибольшим загрязнением (Новозыбковский, Злынковский, Красногорский, Гордеевский) [1] специалисты брянских санэпидстанций и органов здравоохранения при участии ведущих НИИ страны, а также в 1991 г. в рамках российско-германской измерительной программы. Такие же измерения в трех наиболее загрязненных районах Калужской обл. (Жиздринский, Ульяновский, Хвостовичский) проводили с августа 1986 г. сотрудники МРНЦ РАМН с участием специалистов местных органов здравоохранения, а также в рамках российско-германской измерительной программы [1, 2].

Целью работ являлось получение первичных данных для оценки индивидуальной и средней эффективной дозы внутреннего облучения всего тела для дозиметрической поддержки принятия решений о медико-профилактических, социальных и реабилитационных мерах, направленных на уменьшение последствий аварии на Чернобыльской АЭС [2]. В настоящей статье

С начала 1990-х годов в обеих областях работала передвижная спектрометрическая лаборатория МРНЦ РАМН с четырьмя спектрометрами типа кресло с защитой с NaI(Tl)-детекторами размером 76,2×76,2 мм со свинцовыми коллиматорами с широкой конусной апертурой (система «Джеммини-Мастер-1500» с многоканальным анализатором фирмы CANBERRA,

представлены основные результаты оценок эффективной дозы внутреннего облучения всего тела, основанные на ограниченной выборке достоверных данных.

Методы и материалы исследования. В Брянской обл. первоначально использовали полевой спектрометр Robotron RFT-20046 (Германия) с NaI(Tl)-детекторами размером 40×40 мм или 63×63 мм. С 1990 г. применяли портативный спектрометр с теневой защитой ИБФ МЗ СССР. В 1988—1991 гг. измерения проводили в меньшем объеме по сравнению с 1986—1987 гг. В начале 1990-х и в последующие годы в Брянской обл. применяли установленные в некоторых больницах спектрометры всего тела типа «кресло со свинцовой защитой» (NaI(Tl)-детектор размером 63×63 мм в свинцовой защите). В Калужской обл. на начальном этапе работы в 1986 г. в качестве основного измерительного средства использовали радиометр СРП-68-01. В 1987—1990 гг. использовали энергоселективный прибор ГТМ-01-Ц (оба типа приборов оснащены сцинтилляционными NaI(Tl)-детекторами) [3, 4]. В последующие годы, как и в Брянской обл., стали использовать установки типа кресло со свинцовой защитой.

Франция [4]). В 1991 г. массовые измерения проводили в рамках российско-германской программы с использованием как передвижных спектрометров с NaI(Tl)-детекторами, так и неэнергоселективных передвижных мониторов (пластиковые детекторы).

В период применения приборов Robotron RFT-20046, СРП-68-01, ГТМ-01-Ц в Брянской