

4. Онищенко А.М. Стохастическое описание сигналов для задач контроля аварийных ситуаций. Бета- и гамма-распределения сигналов. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 6, с. 440—448.
5. Онищенко А.М. Двумерное γ -, β -распределение. — Там же, т. 83, вып. 1, с. 23—32.
6. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. Пер. с англ. М.: Мир, 1968. 290 с.
7. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики (Перцептроны и теория механизмов мозга). М.: Мир, 1965. 480 с.
8. Француз А.Г. О влиянии зависимости между признаками на информативность для распознавания образов. — Изв. АН СССР, сер. Техническая кибернетика, 1964, № 4, с. 68—77.

Поступила в Редакцию 10.06.97

УДК 621.039.647

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

*Безносов А.В., Мелузов А.Г., Давыдов Д.В., Абрамов А.А.
(Нижегородский государственный технический университет)*

Одним из важных элементов электроядерной установки, управляемой от ускорителя, является жидкометаллическая мишень, в объеме которой происходит рождение нейтронов вследствие ядерно-физических реакций с ядрами жидкометаллического теплоносителя и выделение основной доли энергии частиц от ускорителя.

В настоящее время есть две основные концепции конструкции жидкометаллической мишени: вариант без установки и с установкой прочноплотной заглушки. В первом случае полость мишени либо непосредственно сообщается с объемом жидкометаллического теплоносителя, либо отделяется от него «прозрачной» для частиц перегородкой, исключающей поступление паро- и газообразных продуктов взаимодействия ядер теплоносителя с частицами в полость ускорителя, но не контактирующей с его поверхностью. При участии авторов проводились теоретические и экспериментальные исследования на моделях проточной части такой жидкометаллической мишени с вертикальным и горизонтальным расположением патрубка подвода частиц от ускорителя. Для вертикального (сверху — вниз) расположения патрубка теоретически и экспериментально показана возможность реализации гидродинамики потока в проточной части, с геометрией свободной поверхности жидкометаллического теплоносителя в мишени, исключающей его поступление в полость ускорителя, находящегося под глубоким вакуумом. При горизонтальном расположении патрубка, оптимальном с точки зрения конструкции мощного ускорителя, техническая реализация с учетом режимов начала и прекращения циркуляции теплоносителя через мишень сложнее. Эта концепция выгодно отличается от концепции с прочноплотной заглушкой, отделяющей теплоноситель от полости ускорителя, тем, что исключает сложную научно-техническую проблему создания прочноплотной заглушки, омываемой теплоносителем, с возможными локальными пульсациями температуры, с обеспечением длительной работоспособности материала заглушки в потоке частиц высокой энергии и ограниченным поглощением частиц в материале заглушки.

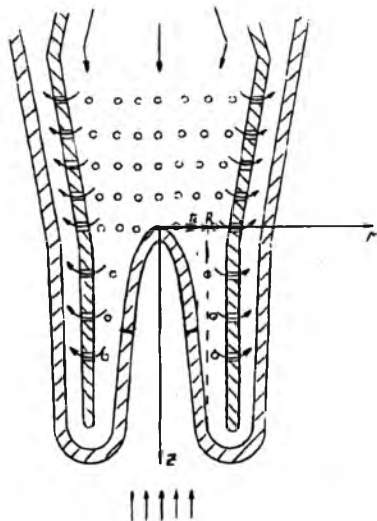
Вероятно, для перспективных мощных (100 МВт и более) жидкометаллических мишеней вариант без заглушки может оказаться единственно возможным. Для жидкометаллических мишеней малой мощности (1 МВт и менее) с ограниченным по времени ресурсом может оказаться приемлемым вариант с прочноплотной заглушкой. При анализе и научно-техническом обосновании конструкции прочной части мишени для испытания на воде вариантов конструкций мишени авторы исходили из следующих соображений:

1. Исходя из физических расчетов определено, что независимо от прочих условий, в том числе и мощности, выделяемой в объеме мишени (при постоянстве энергии частиц), взаимодействие частиц с ядрами и основная доля энерговыделения осуществляется на фактически неизменной длине в рабочей полости мишени (400—600 мм). Распределение частиц в поперечном сечении в патрубке их подвода подчиняется закону Гаусса (нормальному распределению), и соответственно основная доля объемного энерговыделения сосредоточивается в центральной части объема жидкометаллического теплоносителя, т.е. в ограниченном объеме. При увеличении мощности ускорителя и мишени и фиксированной длине энерговыделения объемное энерговыделение (в центре мишени) превысит достигаемое в любых известных стационарно работающих аппаратах (несколько МВт и более на 1 дм^3). Для уменьшения объемного энерговыделения может оказаться необходимым «вытягивание» эффективной длины рабочей камеры жидкометаллической мишени (или обеспечение равномерного по сечению распределения частиц от ускорителя).

2. Геометрия поверхности заглушки должна обеспечивать теплоотвод от нее, исключаящий как повышение температуры материала заглушки выше допустимой, так и возникновение недопустимых температурных пульсаций в материале заглушки. Исходя из этого требования должно быть обеспечено безотрывное обтекание поверхности и исключено образование и срыв вихрей в поток, что заведомо исключает выполнение заглушки в виде плоской пластины, нормальной к оси потока, и существенно ограничивает выбор других форм поверхностей заглушки.

3. Проточная часть жидкометаллической мишени должна исключать (или существенно ограничивать) локальное вскипание теплоносителя как на поверхности заглушки, так и в его объеме. Вскипание недопустимо с точки зрения последующего схлопывания образующихся пузырей с возникающими кавитационными процессами, при этом опасно схлопывание пузырей как на поверхностях конструкционных материалов, так и в объеме теплоносителя вследствие сопутствующих импульсов давления. При анализе процессов локального вскипания теплоносителя следует учитывать малую теплоемкость и скрытую теплоту его парообразования.

Авторами в качестве одного из вариантов предложена геометрия основной части поверхности заглушки в виде тела вращения, обеспечивающая равенство объемного энерговыделения (под действием потока частиц) в материале заглушки, пропорционального распределению этих частиц по сечению патрубка подвода частиц согласно закону Гаусса (рис. 1). При этом обеспечивается максимально возможное «вытягивание» заглушки вдоль оси устройства при объемном энерговыделении в ее материале, не превышающем максимальное локальное объемное энерговыделение при любых других формах поверхности заглушки. В этом случае при примерном равенстве условий теплоотвода от поверхности заглушки обеспечивается равенство температуры в ее объеме. На периферийной части заглушки для недопущения малого угла между касательной к поверхности заглушки и осью патрубка, а также из конструктивных соображений предложено выполнить периферийную часть заглушки с поверхностью вращения прямой (конической поверхностью) с углом конусности $6\text{—}12^\circ$, что также обеспечивает безотрывное обтекание поверхности потоком теплоносителя.



Р и с. 1. Вариант геометрии основной части поверхности заглушки в виде тела вращения

Таким образом, предложена заглушка с поверхностью вращения кривой

$$Z(r) = \begin{cases} \int_0^r \lg \arccos \exp \left[\frac{r^2}{2\sigma^2} \right] dr & \text{при } 0 \leq r \leq r_0; \\ \frac{(r - r_0)}{\lg(\alpha)} + Z(r_0) & \text{при } r_0 \leq r \leq R, \end{cases}$$

где σ — среднсквадратичное отклонение, характеризующее распределение плотности потока заряженных частиц по сечению ускорителя; r_0 — наибольший радиус основной части заглушки; R — наибольший радиус периферийной части заглушки; α — угол конусности ($6-12^\circ$).

При выборе геометрии проточной части следует учитывать ограничение средней скорости потока теплоносителя с точки зрения эрозийного износа конструкционных материалов и ограничении возможности радиального перемешивания на длине (400—600 мм) участка взаимодействия частиц с его ядрами. Возможным путем снижения максимальной температуры теплоносителя в мишени с учетом указанных ограничений является отвод части расхода через профилированные отверстия в наружной стенке рабочей камеры в зоне прохода заряженных частиц мишени, например, согласно следующему уравнению:

$$S(z) = k \int_{r(z)_1}^R f(r) \exp \{ -\Sigma_c [Z(r) - z] \} r dr,$$

где $S(z)$ — суммарное проходное сечение отверстий перфорации (в сечении с координатой z); k — коэффициент пропорциональности; $r(z)_1$ — функция, обратная функции $Z(r)$; $f(r)$ — функция, описывающая распределение плотности потока частиц по нормальному сечению мишени; Σ_c — макроскопическое сечение захвата заряженных частиц ядрами мишени; R — радиус пучка заряженных частиц (наибольший радиус заглушки).

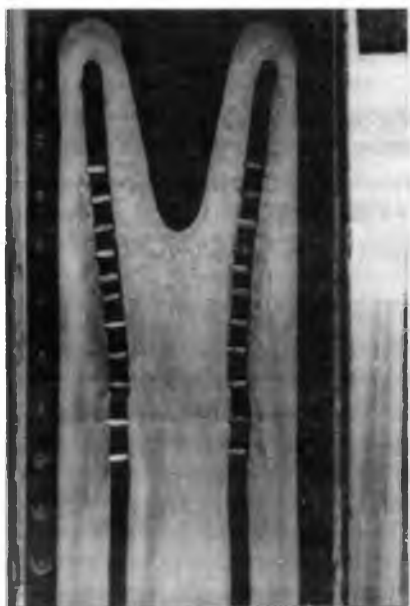
Следует отметить, что возможны и другие более точные законы профилирования расхода через каналы вдоль оси мишени, позволяющие отводить тепло согласно энерговыделению в рабочей камере мишени.

На рис. 2, 3 представлены стенд и картина течения жидкости в плоской модели рассмотренной геометрии жидкометаллической мишени. Средняя несущая скорость потока до 3 м/с, поперечный размер канала подвода среды 100 мм, визуализация потока осуществляется пузырьками воздуха. Наблюдаемая картина качественно совпадает с представленными рассуждениями.

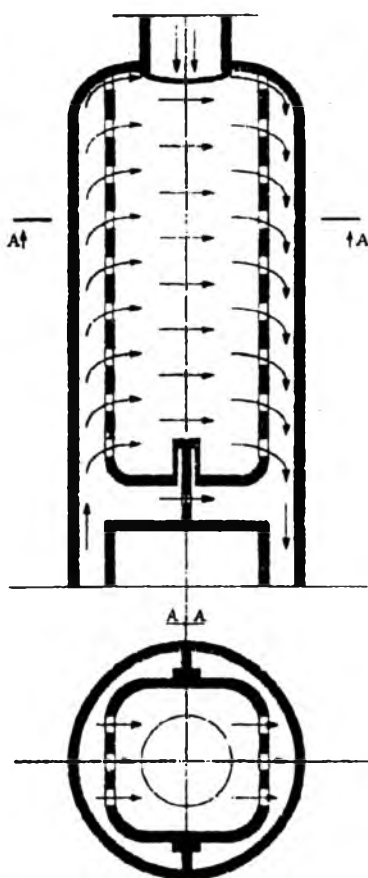
Анализ показывает, что при реализации конструкции с заглушкой предложенной (или другой) геометрии возникает следующее техническое противоречие. При обтекании заглушки потоком теплоносителя, попутным с направлением потока частиц от ускорителя, вероятен отрыв потока от поверхности заглушки с образованием локальных возвратных течений и застойных зон с перегревом и возможным кипением теплоносителя, что недопустимо. При противоположном направлении потока теплоносителя — навстречу потоку частиц поверхность заглушки омывается подогретым теплоносителем, что ухудшает и без того тяжелые условия работы материала заглушки. Логическим разрешением этого противоречия является организация потока теплоносителя



Р и с. 2. Внешний вид стенда



Р и с. 3. Течение жидкости в плоской модели



Р и с. 4. Конструктивная схема с поперечным движением потока теплоносителя

перпендикулярно направлению потока частиц от ускорителя. Авторами предлагается к рассмотрению конструктивная схема с поперечным движением потока теплоносителя, вариант которой представлен на рис. 4. Рабочий участок мишени выполняется в виде прямоугольника в поперечном сечении, циркуляция теплоносителя через который осуществляется плоскопараллельным потоком сверху—вниз. Расход теплоносителя в соответствии с локальным объемным энерговыделением вдоль длины рабочей камеры мишени профилируется путем соответствующей перфорации верхней и нижней стенок рабочего канала. Заглушка может быть выполнена в виде участка сферы большого радиуса гиба (R) исходя из условия безотрывного обтекания нисходящим потоком теплоносителя, например, $R \geq d(2\lg 12^\circ)$, где d — диаметр патрубка подвода частиц.

На рис. 5 представлена картина течения жидкости в полости модели с потоком воды перпендикулярно оси мишени, условия испытаний аналогичны представленным на рис. 2. Следует отметить, что техническая реализация этой конструктивной схемы существенно сложнее, чем предыдущей. В стенках прямоугольной рабочей камеры мишени возникают термические напряжения и др. Однако при этом исключаются ограничения по допустимой средней скорости потока теплоносителя и улучшаются условия работы материала заглушки. Окончательная конструктивная схема мишени может быть выбрана исходя из результатов комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

Авторами были испытаны варианты конструкций модели, предложенной специалистами ГНЦ — ФЭИ. В этой модели предполагается в качестве кон-



Р и с. 5. Течение жидкости в полости модели с потоком воды перпендикулярно оси мишени

струкции мишени использовать трубу со сферической заглушкой, причем объем в трубе делится продольной перегородкой на две существенно неравные части, по одной из которых осуществляется подвод, по другой — отвод теплоносителя. Патрубок подвода частиц от ускорителя размещается соосно против большей части объема трубы со стороны сферической заглушки, в которой поток поворачивается. В экспериментах варьировали направление движения потока, положение перегородки параллельно оси трубы, расстояние от конца перегородки до поверхности заглушки. На рис. 6, 7 представлены картины течения вариантов модели с поступлением сред из широкого канала в узкий и с обратным направлением потока. Геометрические характеристики модели мишени, представленной на рис. 6, 7, таковы: ширина широкого канала 95 мм, узкого — 65 мм, зазор между пластинами в канале 4 мм, расстояние от конца перегородки до поверхности заглушки (вдоль оси трубы) 55 мм, средняя несущая скорость в широком канале 1,1 м/с, в узком — 1,6 м/с.



Р и с. 6. Течение теплоносителя согласно модели с плоской разделительной перегородкой (теплоноситель поступает из широкого канала в узкий)



Р и с. 7. Течение теплоносителя согласно модели с плоской разделительной перегородкой (теплоноситель поступает из узкого канала в широкий)

Анализ и результаты эксперимента могут быть использованы для обоснования и рационального выбора жидкометаллической (свинцово-висмутовой) мишени электро-ядерной установки.

Поступила в Редакцию 01.10.97

УДК 621.039.73

СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЛИТИЧЕСКИХ ГРИБОВ К РАДИОНУКЛИДАМ

Ильин В.А. (МосНПО «Радон»), Градова Н.Б., Мокеев А.Н.

(Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева)

Одним из распространенных видов радиоактивных отходов являются целлюлозо-содержащие: загрязненная спецодежда, ветошь, бумага, древесина и др. Основным методом переработки таких отходов для сокращения объема является сжигание. Аль-