

случае полной реализации возможностей СГПИ блок 3 может выполняться в виде пересчетной схемы с регулируемым коэффициентом пересчета импульсов потока m в интервале $0 < P_b < 1$ по коду q с выхода счетчика. Следует, однако, заметить, что пересчетные схемы с коэффициентом пересчета менее 1 и относительно плавной регулировкой коэффициента пересчета не относятся к числу достаточно простых и надежных. Более эффективным является использование статистических пересчетных схем [2], выполненных, например, в виде генератора случайных двоичных кодов, равномерно распределенных в интервале от 0 до полной емкости счетчика со схемой формирования сигнала на выборку каждого очередного импульса из потока m путем сравнения на больше-меньше текущих кодов с выхода счетчика и генератора случайных кодов.

Импульсы основного потока n и выборки из потока m , частота которых равна $P_b m = RN$, поступают на вход блока суммирования потоков 5. Интенсивность потока импульсов на выходе этого блока $z = n + P_b m = (1 + R)n$. Блок может содержать схему с коэффициентом пересчета $K = (1 + R)$, при этом выходной поток будет приводиться к масштабу основного n и появится возможность синхронного переключения коэффициентов пересчета схем 4 и 5 под различные условия измерения с сохранением однозначного масштаба выходного потока. Установка оптимального коэффициента R под текущие условия измерений может быть переведена в режим автоматической с управлением по текущему значению (в определенном интервале) информационного кода схемы 1. Альтернативное решение — подача на вход суммирования схемы 5 потока импульсов с выхода схемы 4, при этом частота потока z будет всегда в 2 раза больше потока n .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.
2. Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Физматгиз, 1959. 412 с.
3. Григорьев В.А. и др. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1988. 336 с.
4. Давыдов А.В. Устройство радиометрических измерений плотности потока ионизирующих частиц. А.с. СССР № 671531, 1979.

Поступила в Редакцию 20.02.96

УДК 621.039

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ КОНТУРА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ РЕАКТОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ УСКОРИТЕЛЯМИ

*Безносов А.В., Вешняков К.Б., Серов В.Е.
(Нижегородский государственный технический ун-т),
Орлов Ю.И. (ГНЦ РФ — ФЭИ)*

Высокий выход нейтронов под действием потока протонов, сравнительно малое сечение поглощения, радиационная стойкость, возможность отводить высокотемпературное тепло при большой энергонапряженности и низком давлении позволяют рассматривать эвтектический сплав свинец—висмут и свинец в качестве перспективного теплоносителя для жидкометаллических мишеней реакторов, управляемых ускорителями частиц. Относительно слабое взаимодействие свинца и свинца—висмута с кислородом, водой и водяным паром в диапазоне рабочей температуры исключает взрывы и пожары при разгерметизации контура и контакте теплоносителя с воздухом, а также

при течи парогенератора. Существенным преимуществом свинца—висмута является наличие как значительного отечественного опыта работы с этим теплоносителем, включая реакторные установки, так и освоенных конструкционных материалов и инженерных решений. Созданы и отработаны активная зона реакторов, мощностной ряд циркуляционных насосов, парогенераторы, теплообменники, арматура и др., решены проблемы технологии теплоносителя. Свинец менее освоен, обладает более высокой температурой плавления, что усложняет обращение с ним, однако при облучении нейтронами в нем образуется значительно меньше α -активного ^{210}Po . Наличие значительного числа других радионуклидов, генерируемых мишенью, обесценивает это преимущество для рассматриваемых условий.

Оба теплоносителя в составе контура жидкометаллической мишени могут использоваться в установках трансмутации (в том числе и с промышленной выработкой энергии), а также в качестве источника нейтронов для энергетических бланкетов разного типа.

Комплекс, включающий жидкометаллическую мишень, насосы, теплообменники, компенсатор температурных изменений, трубопроводы, арматуру, систему очистки теплоносителя и защитного газа, системы заполнения, дренирования, поддержания в разогретом состоянии, контроля и регулирования параметров, электроснабжения и др. должен удовлетворять следующим основным требованиям:

циркуляция жидкометаллического теплоносителя должна обеспечивать транспортировку тепла без локального повышения его температуры до температуры вскипания и не более 770—870 К в месте контакта с конструкционными материалами;

попадание жидкометаллического теплоносителя в полость ускорителя во всех режимах работы комплекса, включая аварийные, а также паров и содержащихся в нем примесей со свободной поверхности в канал ускорителя должно быть исключено;

циркуляторы должны обеспечивать необходимую скорость транспортировки теплоносителя, теплообменники — надежно отводить тепло, выделяющееся в мишени.

Технические решения контура, оборудования, а также конструкционные должны отвечать общим требованиям, предъявляемым к реакторным контурам. Оптимальное расположение жидкометаллической мишени — горизонтальное исходя из реальных конструкций ускорителей.

Жидкометаллическая мишень. Очевидным техническим решением является конструкция с прочноплотной заглушкой на патрубке подвода частиц, омываемой потоком теплоносителя и разделяющей его контур и полость ускорителя. Обладая несомненными достоинствами, это решение, по мнению авторов, может оказаться неоптимальным по следующим причинам:

вызывает сомнение длительная работоспособность охлаждаемого жидкометаллическим теплоносителем материала заглушки в потоке высокоэнергетических протонов энергией около 1 ГэВ ($1,6 \cdot 10^{-10}$ Дж) с распределением плотности пучка в виде гауссианы со стандартной девиацией не менее 0,0125 м, в связи с этим в конструкции мишени, мишенного контура и ускорителя должны быть заложены технические решения, исключающие попадание теплоносителя в канал ускорителя при разрушении заглушки;

в конструкции с заглушкой достаточно большое локальное объемное энерговыделение теплоносителя определяется пробегом протонов в теплоносителе (по расчетным оценкам не более 0,4—0,5 м). Исключение локального вскипания теплоносителя во всех режимах работы может оказаться сложной задачей. Кроме того, для установок большой мощности наличие точечного источника нейтронов может оказаться неоптимальным с точки зрения работы бланкета, а установка в мишени вытеснителя из «прозрачного» для протонов материала потребует дополнительно решения сложных научно-технических задач.

Авторами предложен вариант конструкции мишени, в которой за счет закрутки потока теплоносителя в мишени формируется коническая свободная поверхность. Основание конуса соответствует диаметру патрубка подвода частиц, протяженность конуса вдоль оси потока может быть до 10—15 диаметров за счет изменения отношения радиальной и осевой составляющих скорости потока в мишени. Гидравлическое сопротивление мишени и частично отводящего участка преодолевается скоростным напором потока, который при приемлемой скорости теплоносителя не может превышать $(3-4)10^4$ Па, что достаточно для циркуляции через мишень.

Конструкция мишени определяется мощностью ускорителя, диаметром патрубка подвода частиц от ускорителя, требованиями (или их отсутствием) к протяженности (линейному размеру) источника нейтронов, выбранным подогревом теплоносителя в модели и др. Очевидно, что диаметр мишени должен быть равен или больше диаметра входного канала ускорителя. При установленных ограничениях на скорость потока и подогрев теплоносителя в мишени ее внутренний диаметр

$d \geq \sqrt{4N/\pi C_p W (\bar{t}_{\text{вых}} - \bar{t}_{\text{вх}})}$, где N — мощность энерговыделения в мишени, Вт; C_p —

теплоемкость, Дж/(м³·К); W — средняя осевая скорость в мишени, м/с; $\bar{t}_{\text{вх}}$, $\bar{t}_{\text{вых}}$ — средняя температура теплоносителя на входе и выходе из мишени, К. Протяженность рабочего участка при выбранном диаметре $l \geq 4N/\pi d^2 \bar{q}_v$, где $\bar{q}_v$ — допустимое среднее удельное объемное энерговыделение, определяемое на основании физического и теплофизического расчета. Условия локального теплообмена в объеме мишени должны исключать достижение температуры насыщения теплоносителя на участках с максимальным удельным объемным энерговыделением.

На основании изложенных (и других) соображений авторы провели расчетные оценки и конструкторские проработки, проанализировали движение потока в мишени, в результате чего создали прозрачную модель из органического стекла с внутренним диаметром имитатора подвода частиц от ускорителя 0,07 м и протяженностью корпуса мишени около 1,5 м. Испытания проводили на воде температурой около 20 °С и расходом $(1,66; 2,22; 2,77)10^{-3}$ м³/с с подачей воздуха в патрубок-имитатор подвода частиц от ускорителя, при сообщенном и разобщенном объеме полости последнего с атмосферой при двух положениях в пространстве — с вертикальным и горизонтальным расположением оси патрубка-имитатора подвода частиц. В процессе испытаний варьировали геометрические характеристики модели — угол конуса на выходе закрученного потока из напорной камеры в полость мишени (15 и 30°) и положение среза патрубка-имитатора относительно корпуса (ход 0,08 м), а также противодействие воды на выходе из модели. Изменили степень закрутки потока в модели.

Фиксировали расход воды, давление на входе, выходе воды и газа в полости патрубка-имитатора, форму и размеры свободной поверхности воды в модели, осевую и радиальную составляющие скорости в проточной части мишени.

Испытания в целом подтвердили расчетные оценки и приемлемость предложенной конструкционной схемы с точки зрения гидродинамики. Экспериментально показано, что изменение угла конуса с 15 на 30° и перемещение патрубка-имитатора относительно корпуса в пределах 0,08 м не оказывают заметного влияния на контролируемые параметры. Изменение давления газа в полости патрубка-имитатора приводит к смещению положения конической свободной поверхности воды относительно корпуса мишени, не оказывая влияния на другие параметры, причем при заглушенной (по газу) полости патрубка-имитатора в ней создается и поддерживается разрежение (при малом противодействии), зависящее от расхода. Перепад давления на модели составлял от 2,4 кПа при расходе $1,66 \cdot 10^{-3}$ м³/с до 15 кПа при $2,77 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Свободная поверхность закрученного потока в модели представляет собой конус с неровной внутренней поверхностью с гребнями по винтовой поверхности (рис. 1). Протяженность (высота) конуса вдоль потока зависит от поля скорости и противодавления. При отношении радиальной и осевой составляющей скорости в мишени 3—6 протяженность конуса составляла 0,42—1 м. Для устойчивой свободной поверхности при вертикальном положении модели требуется меньшая осевая скорость потока.

Испытания показали «гибкость» конструкционной схемы модели, например, возможность закрутки за счет как тангенциального подвода в напорную камеру, так и установки лопаток в канале подвода потока из напорной камеры в полость мишени и др.

Безусловно, после оптимизации этих испытаний требуется разработка стальной конструкции, исследование ее характеристик при работе с теплоносителем и, вероятно, последующая оптимизация.

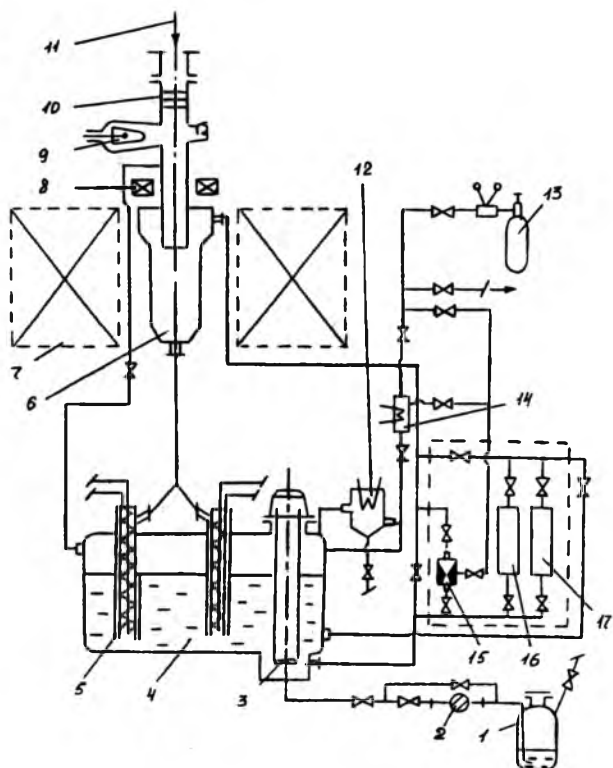
Предложенная конструкция не исключает попадания паров и газов из контура теплоносителя в полость ускорителя. Вероятно, в состав конструкции мишени должна быть введена герметичная прозрачная для протонов перегородка, устанавливаемая в канале ускорителя и не контактирующая с теплоносителем (предложение специалистов ФЭИ). Наряду с этим авторы предложили установить электрические устройства, исключающие движение ионов от контура теплоносителя в полость ускорителя. Для упрощения монтажно-демонтажных и ремонтных работ, а также технологической обработки контура теплоносителя необходима клиновая (шаровая или другая) задвижка, отделяющая контур теплоносителя от полости ускорителя.

Циркуляторы. В качестве циркулятора в контуре могут быть использованы электромагнитный насос, насосы с замерзающим уплотнением вала и организованными протечками через щелевое уплотнение вала, погружной насос. Применение электромагнитного насоса нецелесообразно вследствие недостаточно развиваемого напора, малого к.п.д., ограничений по температуре перекачиваемой среды. Преимуществом такого насоса является отсутствие необходимости в противокавитационном подпоре. Насос с замерзающим уплотнением вала, несмотря на некоторые преимущества, не может быть рекомендован ввиду сложности обеспечения требуемого ресурса уплотнения. Насос с организованными протечками через щелевое уплотнение вала является хорошо отработанной конструкцией, однако требует введения насоса возврата протечек, т.е. усложнения схемы контура. Последнее обстоятельство не позволит, вероятно, рекомендовать насос такого типа, по крайней мере, для мишенных контуров малой и средней мощности. Наиболее оптимальной и отработанной конструкцией для данного контура является насос погружного типа — для установок малой и средней мощности с электроприводом, для большой — с турбоприводом. Этот тип насоса позволяет обеспечить противокавитационный подпор на всасе за счет заглубления рабочего колеса под уровень теплоносителя при вакууме над свободным уровнем.

Теплообменники. Их тип и число определяются тепловой мощностью, а также числом контуров, обеспечивающих отвод и преобразование тепловой энергии мишенного контура в электрическую. Для прототипной установки мощностью 100 МВт, требующей высокой экономичности, возможно применение отработанных конструкций U-образных парогенераторов или модульных парогенераторов типа парогенераторов



Р и с. 1. Свободная поверхность закрученного потока



Р и с. 2. Компоновка мишенного контура: 1 — дренажный бак; 2 — фильтр; 3 — циркуляционный насос; 4 — буферная емкость; 5 — секция парогенератора; 6 — жидкометаллическая мишень; 7 — бланкет ЯЭУ; 8 — магнитная катушка; 9 — задвижка; 10 — заглушка; 11 — подвод частиц от ускорителя; 12 — конденсатор пара; 13 — баллон с гелием; 14 — газовый коллектор; 15 — эжектор; 16 — холодная ловушка; 17 — дистиллятор

лагать выше остального оборудования как для самодренирования теплоносителя при прекращении циркуляции, так и для создания тягового (сифонного) участка, обеспечивающего движущий напор для циркуляции теплоносителя через выходную часть мишени и трубопровод от мишени до свободного уровня. Компенсатор объема — буферная емкость должна располагаться ниже мишени. Для отвода остаточного тепловыделения оптимальным было бы размещение секций парогенераторов (теплообменников) в буферной емкости. Расположение циркуляторов должно исключать их самодренирование при прекращении циркуляции, а в случае применения погружного насоса необходимо заглубление рабочего колеса относительно свободного уровня в буферной емкости (или в баке насоса) для противокавитационного подпора во всех режимах работы. При этом в случае исключения попадания воздуха в контур давление над свободным уровнем теплоносителя может поддерживаться близким к давлению в полости. При этом должен быть запас до кипения в проточной части мишени.

Таким образом, принципиально возможно создание контура жидкометаллической мишени реакторов, управляемых ускорителями, без установки охлаждаемой теплоносителем прочноплотной заглушки на входном патрубке подвода частиц от ускорителя в мишени.

БН-600, -800 с последующим отводом тепла в контур технического водоснабжения (без полезного использования).

Система очистки. Проведенный авторами анализ примесей, образующихся в контуре, позволил предложить три основных элемента в составе системы очистки: вакуумный дегазатор для выведения газообразных примесей (третия, радиоактивных благородных газов и др.), «холодный» фильтр-ловушку для выведения твердодисперсных примесей и эжектор для технологической обработки контура. Устройства геттерной очистки, очистки с использованием расплавов солей и оснований, а также требующие изменения агрегатного состояния теплоносителя на данной стадии исследований не могут быть рекомендованы, по крайней мере, для прототипной установки малой мощности из-за значительного усложнения контура теплоносителя и недостаточной их эффективности.

Компоновка мишенного контура (рис. 2). Жидкометаллическую мишень целесообразно распо-