

Ампульные устройства для облучения материалов в высокопоточном реакторе СМ-2

В. А. ЦЫКАНОВ, Б. В. САМСОНОВ, Р. А. ТИМЧЕНКО, В. Н. ШУЛИМОВ, Г. П. ЛОБАНОВ

УДК 621.039.553

Для облучения материалов в исследовательских реакторах используются различные устройства, которые существенно отличаются друг от друга в зависимости от назначения и условий проведения эксперимента. С точки зрения конструктора экспериментального устройства, все варианты облучения можно классифицировать по крайней мере по двум признакам: по величине энерговыделения в исследуемом материале и по величине температуры испытания.

По первому признаку исследуемые материалы можно подразделить на две группы:

А. Материалы с высоким удельным энерговыделением (твэлы и их макеты, топливные композиции с высокообогащенным ураном или большим содержанием плутония).

Б. Материалы с низким удельным энерговыделением (конструкционные материалы, материалы замедлителей и поглотителей, топливные композиции с низкообогащенным ураном).

По второму признаку все эксперименты можно также разделить на две группы: а) испытания при температуре, не сильно превышающей температуру окружающей среды; б) испытания при высоких температурах.

Наибольшие трудности при конструировании экспериментального устройства возникают при сочетаниях Аб и Бб. В первом случае — из-за трудности обеспечения теплоотвода от образца, а во втором — из-за трудности поддержания высокой температуры.

Экспериментальные устройства высокопоточного исследовательского реактора бывают петлевыми или ампульными. Каждое петлевое устройство включает один или несколько петлевых каналов, в которых проводится облучение, и петлевой контур, состоящий из оборудования для отвода тепла, генерируемого в исследуемых образцах. В петлевом устройстве

применяется свой теплоноситель, и оно рассчитано на конкретные рабочие параметры. Петлевые устройства в основном используются для проведения экспериментов с материалами группы А. Главный недостаток петлевого устройства заключается в том, что каждая петля предназначается для конкретного испытания того или иного образца в том или ином теплоносителе и не может быть легко переоборудована для испытаний существенно отличающихся образцов при других условиях. Вместе с тем это дорогостоящее сооружение, занимающее много места в здании реактора и требующее для обслуживания дополнительный персонал.

Ампульные устройства в отличие от петель, как правило, не имеют специальной системы теплоотвода. Все тепло, генерируемое в исследуемом образце и конструкционных материалах самих ампульных устройств, отводится в теплоноситель реактора. Следовательно, ампульные устройства не требуют дополнительного технологического оборудования и помещений для его размещения. Отсюда вытекает их первое преимущество по сравнению с петлевыми устройствами: они более дешевы. Благодаря этому ампульные устройства можно сооружать заново для каждого конкретного эксперимента, что обеспечивает его проведение в самых оптимальных условиях. Для получения более полных данных в каждом случае можно устанавливать наиболее подходящие измерительные устройства, а исследуемые образцы могут находиться в любой окружающей среде. В этом второе, главное преимущество ампульных устройств.

Недостатки ампульных устройств связаны с ограниченными возможностями отвода тепла из-за отсутствия специального теплообменного устройства, с трудностями достижения высоких температур при исследовании материалов с низ-

Энерговыведение (вт/г) от поглощения γ -излучения для различных экспериментальных каналов реактора СМ-2

Номера каналов				
4; 5; 3; 2; ДЭК-1; ДЭК-2; ДЭК-3; ДЭК-4	13; 15	БКС-1; БКС-2; БКС-3; БКС-4	6; 7; 8; 9; 10	11; 16
8,6	4,0	3,5	1,35	1,30

ким удельным тепловыделением и со сложностью регулирования параметров испытания.

По мере увеличения мощности исследовательских реакторов появилась возможность устранения этих недостатков ампульных устройств, а значительное расширение объема экспериментальных работ потребовало интенсивного использования таких устройств.

Развитие исследовательских реакторов идет по пути непрерывного увеличения удельной (объемной) мощности активной зоны, а это значит, что в такой же степени возрастает нагрев конструкционных материалов γ -излучением (см. таблицу). Следовательно, применив простейшую теплоизоляцию, можно создать в ампульном устройстве практически любую температуру без применения дополнительного электроподогрева.

Реакторы с высоким удельным энерговыведением чаще всего бывают корпусными с охлаждением водой под высоким давлением. Поскольку тепло из ампульного устройства передается воде реактора, то в этом случае от ампульного устройства могут отводиться значительные мощности, так как допустима высокая температура (250—260° С) на поверхности ампульного устройства.

Реактор СМ-2 со средним удельным энерговыведением 1600 вт/л и давлением 50 кг/см² является как раз таким реактором, для которого перечисленные выше недостатки ампульных устройств оказываются несущественными.

Применение переменных термических сопротивлений в ампулах позволяет регулировать температуру и поддерживать ее в заданных пределах при изменении локальных уровней энерговыведения во время работы реактора (от перемещения органов регулирования реактором, от неравномерного выгорания в активной зоне и т. п.), а также компенсировать все расчетные погрешности в определении температуры.

В ампульных устройствах реактора СМ-2 облучаются все материалы группы Б как при низких, так и при высоких температурах (случаи Ба, Бб) и в некоторых случаях материалы группы А при высоких температурах (случай Аб). В последнем случае использование ампульных устройств ограничивается экспериментами с небольшим количеством вещества.

В тех случаях, когда облучение материалов возможно проводить в достаточно широком интервале температур, применяются ампульные устройства с измерением температуры образцов. Если постоянное термическое сопротивление, обеспечивающее номинальную температуру, выбирается на основании расчетов, то все погрешности расчета и возможные изменения режима работы реактора будут изменять эту температуру в некоторых пределах.

В тех случаях, когда облучение материалов необходимо проводить при строго заданной температуре или когда отклонения температуры от номинальной в процессе эксперимента недопустимо велики, используется ампульное устройство с измерением и регулированием температуры образцов путем введения переменного термосопротивления. Это усложняет конструкцию ампулы, уменьшая надежность ее работы в реакторе, и несколько сокращает полезный экспериментальный объем ампулы. Поэтому предпочтительнее применять ампулы с постоянным термосопротивлением.

В качестве термических сопротивлений чаще всего используются различной величины зазоры, заполняемые газом, легкоплавким металлом или каким-либо порошком. Заполнитель выбирается в зависимости от необходимой температуры и с учетом таких факторов, как совместимость материалов и простота регулирования температуры. Наилучшим наполнителем являются газы, так как позволяют легко менять величину термического сопротивления путем изменения величины зазора или теплопроводности (смесь газов, замена одного газа другим). Однако газовые термосопротивления не позволяют проводить облучение при низких температурах (350° С), а также не обеспечивают достаточного интервала регулирования температуры при высоких температурах (1200° С) из-за возрастания теплоизлучения.

Для облучения образцов при низких температурах используются наполнители из легкоплавких металлов или слои, заполненные металлическим порошком, либо применяется непосредственное охлаждение образцов водой реактора. Регулирование температуры в этих слу-

чаях возможно осуществить за счет изменения интенсивности теплоотдачи к воде реактора.

Ниже приведено описание наиболее широко используемых в реакторе СМ-2 ампульных устройств, которые представляют интерес в связи с тем, что при небольших изменениях в конструкции они могут применяться для аналогичных целей в других исследовательских реакторах.

Ампульные устройства без регулирования температуры

Для низкотемпературного облучения используются ампулы с охлаждением образцов непосредственно водой реактора. Ампульное устройство устанавливается в экспериментальный канал, не имеющий «своего» отверстия в крышке реактора*. Так как в этом случае нельзя вывести термопары от образцов, то эти ампулы применяются для облучения материалов при температуре теплоносителя реактора, которая контролируется приборами, установленными в контуре охлаждения реактора.

Ампула представляет собой трубу из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм, нижняя часть которой выполнена в виде направляющего конуса. Крышка ампулы соединяется с корпусом с помощью байонетного соединения. Теплоноситель в ампуле движется снизу вверх, проходя через четыре отверстия в днище и четыре отверстия в крышке ампулы. Для того чтобы поток воды не выбросил ампулу из канала, она крепится с помощью расположенного в головке шарикового устройства. В направляющей трубе канала имеется кольцевой паз, в который при установке ампулы в канал входят шарики, выступающие из боковой поверхности головки. При снятии захвата с головки ампулы шарики фиксируются стаканом и пружиной и не могут выйти из паза канала. Извлекается ампула из канала при помощи цангового захвата. Для этого к головке прикладывается направленное вверх усилие, отжимающее пружину, после чего шарики приобретают подвижность, а ампула извлекается из канала. Крепление головки к ампуле, снятие крышки и установка образцов в ампулу могут проводиться дистанционно в горячей камере.

* В отражателе реактора имеются четыре канала (ДЭК-1 — ДЭК-4), оси которых не совпадают ни с одним из отверстий в крышке реактора. Они загружаются через отверстия в крышке, предназначенные для других каналов.

Для облучения образцов конструкционных материалов в тех же условиях с контролем температуры используется ампульное устройство (рис. 1), которое устанавливается в каналы, имеющие отверстие в крышке реактора. Поэтому оно укрепляется в крышке и не имеет шарикового замка. Для контроля за температурой образцов через головку ампульного устройства выводятся микротермопары. Образцы загружаются в контейнеры, доньшки и крышки которых имеют много отверстий (на рис. 1 не показаны) для прохода теплоносителя.

Для облучения образцов тугоплавких материалов при температурах до 2000°С, измеряемых вольфрам-ренийевыми термопарами, применяется заполненная гелием ампула. Корпус ампулы выполнен из нержавеющей стали, два внутренних экрана — из молибдена. Для компенсации температурных удлинений экраны закреплены только с одного торца. Ампула соединена с трубой, которая оканчивается фланцем для крепления на крышке реактора. Термопары проходят сквозь трубу и через герметичное уплотнение выводятся из ампулы.

На рис. 2 показана ампула для облучения образцов одинаковым потоком нейтронов одного энергетического спектра, но при различных температурах. Образцы в ампуле располагаются на различных радиусах, образуя три секции: две кольцевых и центральную. Секции разделены газовым зазором. Температура образцов в первой секции равна 350°С, во второй — 500°С, в третьей — 850°С. Термопары выведены от образцов каждой секции.

Ампульные устройства с регулированием температуры

Ампульное устройство, изображенное на рис. 3, предназначено для облучения материалов в условиях регулируемой температуры. Корпус канала уплотнен в крышке реактора, и в него помещается подвеска с ампулой, в которой размещаются облучаемые образцы. Корпус канала и ампула в пределах активной зоны выполнены коническими. Угол между осью канала и образующей конуса равен 41°. Благодаря этому при перемещении ампулы относительно корпуса с помощью винтовой пары на 120 мм зазор между ампулой и каналом изменяется от 0,2 до 1,9 мм. Такое изменение термического сопротивления на пути теплового потока от образцов к теплоносителю, омывающему корпус канала, приводит при постоянном

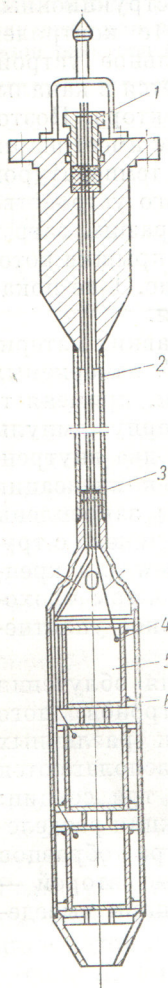


Рис. 1.

Рис. 1. Ампульное устройство для облучения образцов при температуре, близкой к температуре омывающего теплоносителя (с контролем температуры):

1 — узел герметичного вывода удлинительных проводов из канала; 2 — труба с фланцем для крепления на крышке реактора; 3 — уплотнение микротермопар; 4 — термопары; 5 — контейнеры с образцами; 6 — ампула.

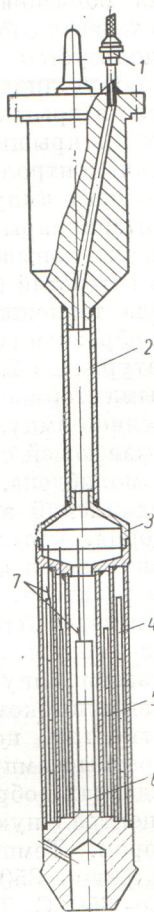


Рис. 2.

Рис. 2. Ампульное устройство для одновременного облучения образцов при различных температурах:

1 — узел герметичного вывода термопар; 2 — труба с фланцем; 3 — корпус ампулы; 4, 5, 6 — образцы при температуре 350, 500 и 850° С соответственно; 7 — термопары.

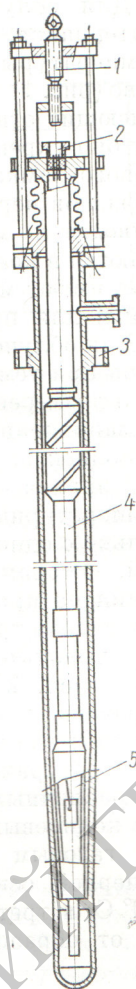


Рис. 3.

Рис. 3. Ампульное устройство с переменным газовым зазором:

1 — подъемное устройство; 2 — узел герметичного вывода термопар; 3 — корпус канала; 4 — подвеска; 5 — ампула с образцами.

энерговыведении к изменению температуры образцов.

Для контроля за температурой в ампулу герметично вводятся микротермопары, тип

и конструкция которых определяются условиями эксперимента. Все устройство, за исключением ампулы, выполняется из стали 1Х18Н9Т. Материал ампулы выбирается в зависимости от условий эксперимента с учетом стойкости при заданной температуре и требований совместности.

В зависимости от уровня энерговыведения и необходимой температуры канал может быть заполнен гелием или азотом. Внутренний объем ампулы или сообщается с объемом канала, или изолирован, если образцы должны находиться в специальной среде.

При заданной мощности реактора диапазон регулирования температуры образцов зависит от веса загруженного в ампулу материала, отнесенного к единице поверхности теплоотвода ампульного устройства ($a, \text{г/см}^2$).

Образцы и конструктивные элементы, при помощи которых они устанавливаются в ампуле, размещаются равномерно по длине и сечению ампулы, обеспечивая минимальную неравномерность теплового потока с поверхности. При облучении ампул с различной величиной a были получены зависимости температуры образцов от величины гелиевого зазора между корпусом канала и ампулой. На рис. 4 приведены эти данные для каналов № 2—5, удельное энерговыведение для которых указано в таблице. Благодаря плотному тепловому контакту температура образцов в ампуле не отличалась от температуры стенки. Из кривых рис. 4 видно, что в ампульном устройстве данной конструкции возможно облучение образцов при температуре 600—900° С, а диапазон регулирования (200—300° С) достаточен для компенсации погрешностей расчета и изменений температуры в про-

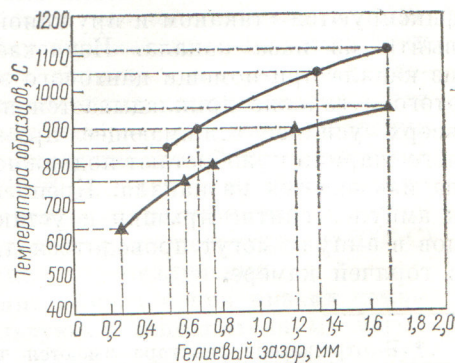


Рис. 4. Зависимость температуры образцов от величины гелиевого зазора:

● — $a = 3,5 \text{ г/см}^2$; ▲ — $a = 2, \text{ г/см}^2$.

цессе облучения, возникающих в результате непостоянства энерговыделения.

Дальнейшее увеличение температуры образцов возможно при введении дополнительного термического сопротивления между образцами и оболочкой ампулы. Величина этого сопротивления определяется тепловым расчетом. Однако при этом уменьшается диапазон регулирования температуры. Понижение температуры образцов можно осуществить за счет уменьшения величины a , но это приводит к недостаточному использованию экспериментального объема. Поэтому для более низких температур целесообразно использовать другие ампульные устройства.

На рис. 5 изображено ампульное устройство, позволяющее облучать конструкционные материалы в диапазоне температур $80-250^{\circ}\text{C}$. Ампульное устройство состоит из корпуса, устанавливаемого в канал реактора, и сменной ампулы. Ампула одноразового использования и проектируется с учетом условий эксперимента. Теплоноситель поступает в корпус ампульного устройства снизу и выходит через шесть прямоугольных отверстий размером 15×4 мм. Уменьшение расхода теплоносителя от максимального значения $\sim 3,4$ м³/ч осуществляется путем использования заслонки, которая при вращении головки регулирующего винта может перемещаться в вертикальном направлении на 25 мм.

При малых расходах теплоносителя его температура после прохождения через ампулу может возрасти на $50-100^{\circ}\text{C}$ в зависимости от массы образцов и удельного энерговыделения. Для уменьшения связанной с этим неравномерности температурного поля по высоте ампулы предусмотрен разделитель потока. Тогда температура теплоносителя, поступающего в каждый отсек ампулы, оказывается одинаковой и влияние подогрева значительно уменьшается. Разделение ампулы больше чем на два отсека нецелесообразно, так как сильно усложняется конструкция и сокращается полезный объем. Для повышения первоначальной температуры теплоносителя (что необходимо для увеличения температуры облучаемых образцов с небольшой тепловой нагрузкой с поверхности) применяется нагреватель, который состоит из набора 19 стальных стержней диаметром 8 мм и длиной 90 мм, размещенных в металлическом стакане диаметром 60 мм. Подогрев проходящего теплоносителя осуществляется за счет поглощаемого нагревателем γ -излучения.

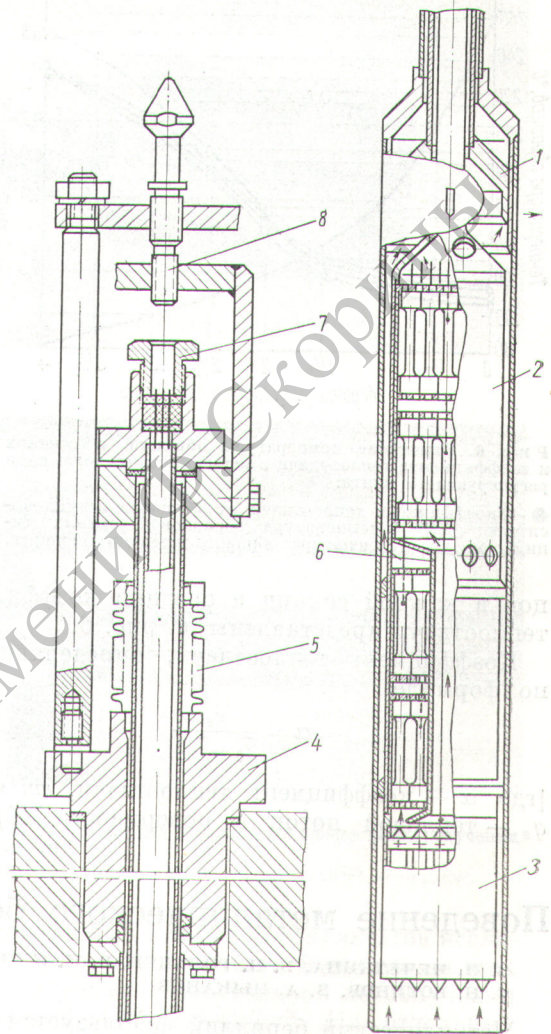


Рис. 5. Ампульное устройство с изменением расхода омывающего теплоносителя:

1 — заслонка; 2 — ампула с образцами; 3 — нагреватель; 4 — корпус канала; 5 — уплотняющий сильфон; 6 — разделитель потока; 7 — узел герметичного вывода термопара; 8 — регулирующий винт; стрелками показан поток теплоносителя.

Максимальное увеличение температуры, достигнутое с нагревателем такой конструкции при работе ампульного устройства в канале № 2, составило 80°C . При низкотемпературных облучениях нагреватель не устанавливается, вследствие чего может быть увеличен полезный экспериментальный объем. Основные характеристики определялись для ампулы с размещенными в четырех секциях образцами алюминиевых сплавов. Изменение температуры образ-

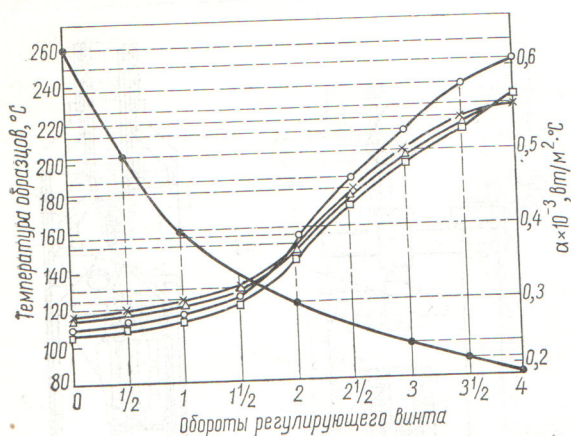


Рис. 6. Изменение температуры образцов в секциях и коэффициента теплоотдачи в зависимости от положения регулирующего винта:

● — коэффициент теплоотдачи от образцов к теплоносителю; ○, □ — температура образцов в верхних секциях; ×, △ — температура образцов в нижних секциях.

цов в каждой секции и средний коэффициент теплоотдачи представлены на рис. 6.

Коэффициент теплоотдачи, определявшийся по формуле

$$\alpha = \frac{q_s}{t_0 - t_{ж}}$$

[где α — коэффициент теплоотдачи, $вт/м^2 \cdot ^\circ C$; q_s — тепловой поток с поверхности образца

(определяется удельным энерговыделением в канале реактора, т. е. плотностью материала образца, и зависит от его геометрии; для рассматриваемого случая $q_s = 2,5 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$); t_0 — усредненная по четырем секциям температура образцов; $t_{ж}$ — средняя температура теплоносителя в ампуле], плавно изменялся от $\sim 0,7 \cdot 10^3$ до $\sim 0,2 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2 \cdot ^\circ C$ за четыре оборота регулирующего винта; одновременно подогрев теплоносителя менялся примерно от 0,5 до 5° C.

Из рассмотрения представленных зависимостей можно видеть, что ампульное устройство позволяет облучать образцы конструкционных материалов, плавно изменяя температуру в интервале 80—250° C.

Следует отметить возможность облучения образцов при более высокой температуре (600—700° C). Для этого ампула должна быть герметичной и иметь дополнительное термическое сопротивление. Однако это приведет к понижению диапазона регулирования температуры, поэтому целесообразнее использовать ампульное устройство, описанное выше.

В заключение авторы приносят благодарность сотрудникам службы эксплуатации реактора СМ-2, принимавшим деятельное участие в разработке и освоении ампульных устройств.

Поступила в Редакцию 19/VI 1969 г.

Поведение металлического бериллия в реакторе СМ-2

З. И. ЧЕЧЕТКИНА, В. П. ГОЛЬЦЕВ, В. И. КЛИМЕНКОВ,
С. Н. ВОТИНОВ, В. А. ЦЫКАНОВ

УДК 621.039.532.5:621.039.553

Металлический бериллий используется в реакторе СМ-2 с 1962 г. в качестве вытеснителя части воды из нейтронной ловушки. Вытеснитель представляет собой четыре вкладыша, размещаемых между топливными сборками реактора и центральным каналом, установленным в нейтронной ловушке. Каждый вкладыш состоит из двух блоков. Через них проходит циркониевая трубка, в которой перемещается стержень аварийной защиты реактора. Нижняя часть стержневой изготовлена также из бериллия.

В конце 1964 г. после получения удовлетворительных данных о стойкости металлического бериллия в условиях реактора СМ-2 была произведена реконструкция реактора с заменой бокового отражателя из окиси бериллия на металлический бериллий [1]. С тех пор накоплен дополнительный экспериментальный материал.

Некоторые из полученных данных приводятся ниже.

Исследуемый материал и условия облучения. Опыты проводили на образцах, вырезанных из вкладышей и стержней аварийной защиты до и после их выдержки в реакторе. Исследовали также контрольные образцы до и после облучения. Вкладыши изготовлены из горячепрессованных блоков дистиллированного порошкового бериллия зернистостью $\leq 600 \text{ мк}$ по известной технологии [2]. Предел прочности такого бериллия при 20° C составлял 15—17 $кГ/м^2$. Стержни аварийной защиты диаметром 20 мм были изготовлены методом горячего выдавливания из горячепрессованных блоков. Исследуемые детали, находившиеся в нейтронной ловушке, подвергались наибольшему воздействию облучения. Поток тепловых нейтронов по сечению вкладышей изменялся в пределах