

твердой пленки продукта реакции NaBF_4 , тормозящей дальнейший ход реакции. При увеличении $T_{\text{сл}}$ выше 315°C почти полное связывание BF_3 происходило за несколько десятков секунд (см. рис. 7, а). По-видимому, при $T_{\text{сл}} > 315^\circ\text{C}$ пленка NaBF_4 плавится, образуя жидкий раствор с фторидом натрия [9], в котором и идет реакция. Повышение растворимости фторида натрия в NaBF_4 с ростом $T_{\text{сл}}$ [10] также увеличивает скорость реакции. Для протекания реакции при $T_{\text{сл}} < 315^\circ\text{C}$ необходимо обеспечить высокую начальную скорость тепловыделения, например, увеличением S_0 . На рис. 7, б приведена кривая 1 хемосорбции BF_3 для порошка фторида натрия с развитой пористой структурой при 270°C и $S_0 = 2,34 \text{ м}^2/\text{г}$. Инициировать хемосорбцию можно за счет энергии реакции BF_3 с другим реагентом, например фторидом лития, при добавлении которого к фториду натрия при 270°C время реакции составило $\sim 20 \text{ с}$ (см. рис. 7, б, кривая 2).

Таким образом, предложенные средства обеспечивают эффективную и устойчивую к внешним воздействиям пассивную аварийную защиту реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивоконь В.П. Совершенствование аварийной защиты ядерных реакторов. — Атомная техника за рубежом, 1988, № 9, с. 3—10.
2. Ермеев И.П., Зарецкий Д.Ф. Быстрая аварийная защита реактора на основе газового поглотителя: Препринт ИАЭ 4910/4, 1989.
3. Косилов А.Н., Колядин В.И., Сивоконь В.П., Андреев В.И. Техника экспериментального исследования твэлов в нестационарных режимах. — Атомная техника за рубежом, 1981, № 9, с. 3-8.
4. Андреев В.И., Егоренков П.М., Колядин В.И. и др. Применение газообразного поглотителя для испытательных твэлов в нестационарных режимах. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 5, с. 302-304.
5. Позняков В.В., Сивоконь В.П., Хромов В.К. Расчет элементов с газовым поглотителем нейтронов для СУЗ ядерных реакторов: Препринт ИАЭ 5045/4, 1990.
6. Таблицы физических величин. Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
7. Дмитриев В.Н., Градский В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1981.
9. Cantor S. Physical Properties of Molten-Salt Reactor Fuel Coolant and Flush Salt. Repl. ORNL-TM-2316, 1968, August, 2.p.
10. Griemes W. Molten-salt reactor chemistry. — Nucl. Appl. Technol., 1970, v.8, № 2, p. 137.

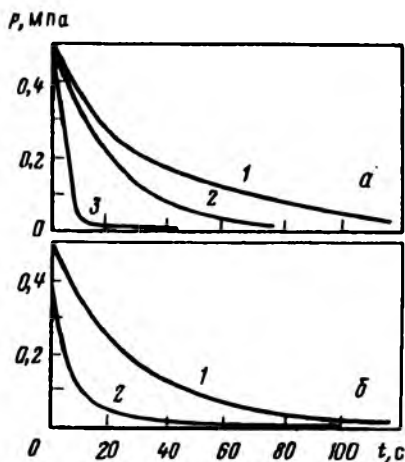


Рис. 7. Зависимость давления BF_3 от времени для фторида натрия при температуре слоя 315°C (1), 340°C (2), 400°C (3) (а)

УДК 621.039.58(075.8)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ОСТАНОВКИ РЕАКТОРА С МЕМБРАННЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

Ионайтис Р.Р. (НИКИЭТ), Лиена Э.Л., Томсонс Э.Я.
(Ин-т физики Республики Латвия)

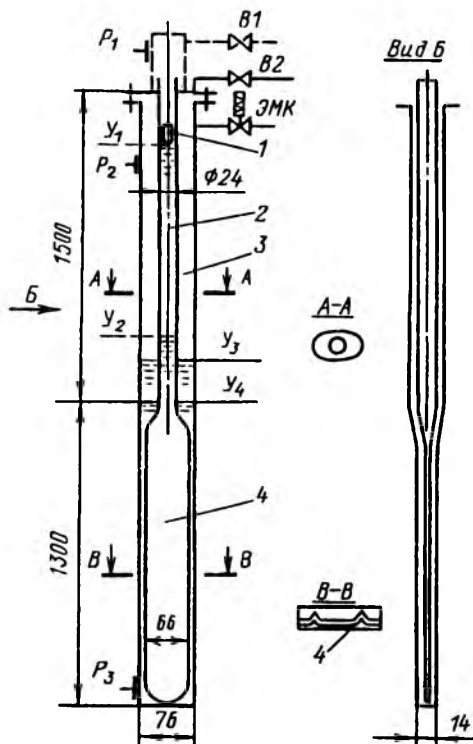
Требования безопасности ЯЭУ предполагают поиск новых решений [1—3]. Исполнительные механизмы систем управления и остановки реактора в настоящее время в основном стержневые. Используя в системах остановки исполнительные механизмы, работающие на разных принципах, можно существенно повысить безопасность ЯЭУ и удовлетворить требованиям, предъявляемым к их работе. На основании мирового опыта

Поступила в Редакцию 24.06.91

разработки и эксплуатации и требований нормативных документов системы остановки реакторов должны строиться на следующих принципах: резервирование, независимость, разнообразие, эшелонирование (защита в глубину), самозащищенность и пассивность, диверсионно-защищенность, контролируемость, простота, посвященность одной цели, низкая энергонапряженность и модульность. Под разнообразием понимается применение в системах (либо в пределах одной системы в разных каналах) различных средств и/или аналогичных средств, основанных на различных принципах действия для выполнения заданной функции. Благодаря применению этого принципа возможна полноценная реализация других указанных: безопасного отказа, резервирования, независимости и т.п.

Возможно создание исполнительного механизма системы остановки с мембранным рабочим органом на базе регулятора, работающего с жидкометаллическим галлиевым сплавом [4]. Работа такой конструкции возможна с жидким или газообразным нейтронно-поглощающим веществом и разным сочетанием сред поглотителя нейтронов и вытеснителя: жидкий металл — жидкий металл, жидкий металл — газ, газ — газ.

Основой исполнительного механизма является его рабочий орган, находящийся в активной зоне ЯЭУ. Он состоит из эластичной камеры, которую опоясывает внешний кожух, несущий механическую нагрузку всего механизма (рис. 1). Поглотитель нейтронов размещается во внутренней камере, во внешней камере содержится среда-вытеснитель, участвующая в управлении количеством поглотителя во внутренней камере. Последняя представляет собой эластичный мембранный сосуд, изготовленный из стали 12Х18Н10Т. Внешняя оболочка является несущей конструкцией всего исполнительного



Р и с. 1. Исполнительный механизм с плоским мембранным рабочим органом: 1 — уровнемер; 2, 3 — внутренняя и внешняя камера с поглотителем нейтронов и управляющей средой соответственно; 4 — плоский мембранный рабочий орган; P_{1-3} — датчики давления; $Y_{1,2}$ — верхний и нижний уровни поглотителя нейтронов; $Y_{3,4}$ — верхний и нижний уровни вытесняющей среды; B1, B2 — вентили управления

механизма, рассчитанного на рабочие условия. Поглотителем нейтронов служит индий в составе эвтектики индий—галлий—олово. Индий нетоксичен, температура его плавления 429 К [5, 6], сечение поглощения тепловых и резонансных нейтронов 196 и 3200 б соответственно. Галлий и олово, включенные в сплав, снижают температуру плавления до 283,5 К. Массовый состав эвтектики, %: In 20,5, Ga 67, Sn 12,5. В качестве вытесняющего жидкометаллического сплава используется эвтектика олово—галлий с температурой плавления и кипения 293,6 и выше 2000 К соответственно. Состав эвтектики, %: Ga 88, Sn 12. Индий, галлий, олово при облучении не образуют газы, они нетоксичны и не горят. При использовании индия в качестве поглотителя нейтронов толщина его слоя в рабочем органе составляет 2,5 мм, для эвтектики индий—галлий—олово — 7 мм [7].

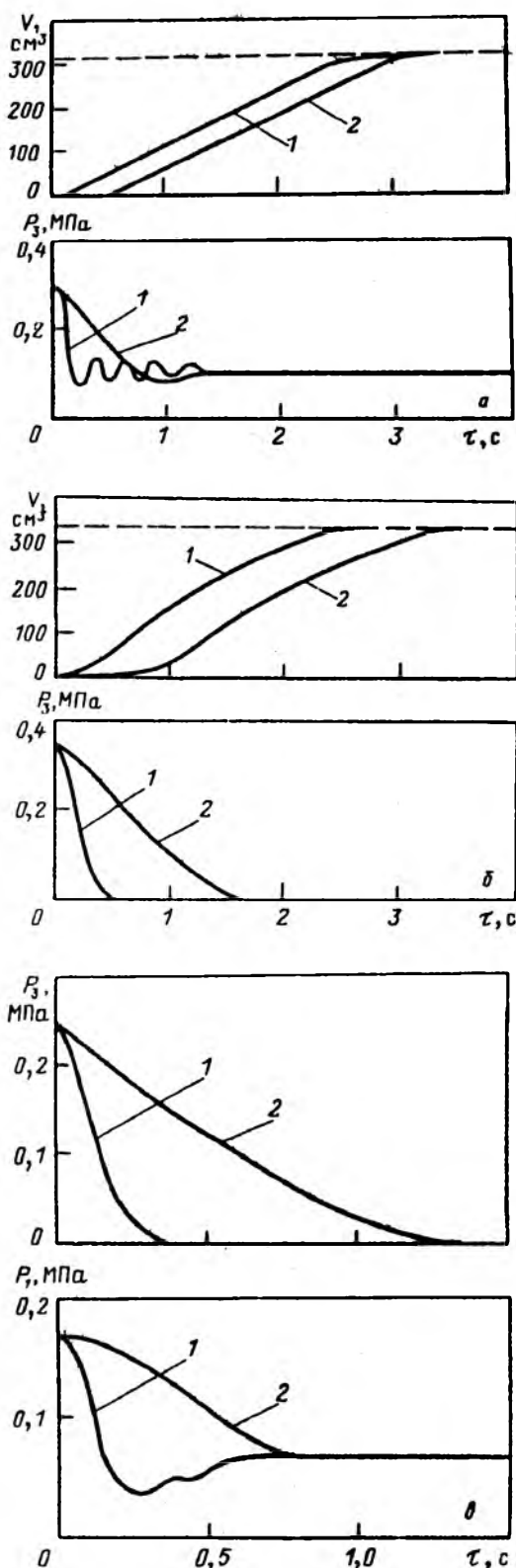
Исполнительный механизм. Эксперименты проводили на вертикальном макете длиной 2,8 м при комнатной температуре. Внутренняя камера длиной 1,3, шириной 0,66 м сделана из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм, по высоте она имеет две продольные гофры длиной 1,2 м. Изменение ее объема при полном цикле (наполнение и удаление поглотителя) составляет 340—360 см³. При заполнении камеры поглотителем нейтронов максимальная тол-

щина его слоя 7 мм. В верхней части она плавным коническим переходником соединена с трубой диаметром 24 мм, длиной 1,5 м, в которой находится поглотитель нейтронов до ввода его в камеру рабочего органа. Внешняя камера представляет собой коробку длиной 1,3, шириной 0,76, высотой 0,14 м из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с толщиной стенки 3 мм. В верхней части крепится труба внутренней камеры с установленным в ней поплавковым уровнемером, если поглотителем нейтронов служит жидкий металл или жидкость. Труба закрывается фланцем, в котором находятся контрольно-измерительные приборы и коммуникации подвода газа в случае использования в качестве поглотителя нейтронов газовой среды.

Уровень жидкого металла во внешней камере определяется поплавковым уровнемером, показания которого через каждые 30 мм изменения уровня регистрируются шлейфовым осциллографом К-115, давление вытесняющей среды измеряется в нижней и верхней частях исполнительного механизма электрическими датчиками $P_{2,3}$ с пределом 0 — 1 МПа и записывается шлейфовым осциллографом. Для предотвращения попадания жидкого металла в датчик P_3 к внешней камере подключается с помощью разделительной мембраны.

Для управления работой применяются вентили и клапан. Вентиль В2 служит для подачи давления газа во внешнюю камеру. Электромагнитный клапан используется для быстрого сброса давления во внешней камере. При определении динамических характеристик заполнения рабочего органа поглотителем нейтронов выходное сечение электромагнитного клапана диафрагмировалось для изменения скорости сброса давления.

Обсуждение результатов эксперимента. 1. Среда жидкий металл — жидкий металл. Уровень жидкого металла во внутренней камере до срабатывания исполнительного механизма Y_1 , после срабатывания — Y_2 , во внешней камере — Y_4 и Y_3 соответственно (см. рис. 1). Уровень жидкого металла во внутренней трубе при срабатывании исполнительного механизма изменился на 870 мм ($Y_1 - Y_2$), что опре-



Р и с. 2. Изменение количества поглотителя в рабочем органе и характерного давления от времени для варианта среды жидкий металл — жидкий металл (а), жидкий металл — газ (б), газ — газ (в)

деляет объем внутренней камеры рабочего органа. При этом уровень вытесняющего жидкого металла во внешней трубе изменился на 170 мм при выходном сечении электромагнитного клапана 16 мм. Для определения характеристик исполнительного механизма при разной скорости сброса давления из внешней камеры в выходное сечение клапана устанавливали диафрагму диаметром 5 мм. Время срабатывания, т.е. время, за которое заполняется 95 % объема рабочего органа, составляет 2,5 с при Ду электромагнитного клапана 16 мм (1) и 3 с при Ду 5 мм (2) (рис. 2,а).

2. Среда жидкий металл—газ. В этом случае в качестве управляющей среды использовался воздух. Как и в первом случае, уровень жидкого металла во внутренней камере до срабатывания исполнительного механизма $У_1$, после срабатывания — $У_2$. Благодаря отсутствию жидкого металла во внешней камере объем поглотителя, поступающего во внутреннюю камеру при ее заполнении, немного увеличивается и составляет $\sim 360 \text{ см}^3$. Уровень во внутренней трубе изменился на 950 мм, время срабатывания 2,4 с при Ду электромагнитного клапана 16 мм и 3,3 с при Ду 5 мм (см. рис. 2,б).

3. Среда газ—газ. В данном случае во внешней и внутренней камерах использовался воздух. Его давление измерялось датчиками P_1 во внутренней и P_3 во внешней камере. Время срабатывания исполнительного механизма 0,16 с при Ду электромагнитного клапана 16 мм и 0,63 с при Ду 5 мм (см. рис. 2,в).

Таким образом, время сброса управляющего газа зависит от сопротивления сбросного канала. Ввод газового поглотителя немного запаздывает по отношению к "срабатыванию" управляющего газа — менее 15 % всего времени. В быстрых переходных процессах наблюдается волновой характер изменения давления управляющего газа, который устраняется при изменении сопротивления сбросной магистрали.

Выводы. 1. Мембранный исполнительный механизм по своим параметрам способен конкурировать с используемыми стержневыми. Его целесообразно применять в системе управления, построенной на ином принципе действия.

2. Толщина слоя поглотителя нейтронов изменяется одновременно по всей высоте рабочего органа.

3. Эвтектические галлиевые сплавы нетоксичны, не взаимодействуют с водой, имеют низкую температуру плавления и высокую температуру кипения.

4. Динамика заполнения рабочего органа исполнительного механизма по варианту жидкий металл—жидкий металл, жидкий металл—газ удовлетворительная, газ—газ — хорошая.

5. Эффективность исполнительного механизма можно повысить, используя жидкометаллический сплав гадолиний—галлий или увеличив содержание в нем индия, однако при этом повышается температура плавления эвтектики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила и нормы в ядерной энергетике. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88), ПНАЭ Г-1-011-89. М.: Энергоатомиздат. 1990. 48 с.
2. Правила и нормы в ядерной энергетике. Правила ядерной безопасности реакторных установок (ПБЯ РУ АС-89), ПНАЭ Г-1-024-90. М., ЦНИИатоминформ, 1991. 52 с.
3. Ионайтис Р.Р., Михайлов М.Н., Черкашов Ю.М. Особенности разработки технических средств аварийной остановки ядерных реакторов. — Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 1, с. 5-10.
4. Платацис Э.Я., Лиела Э.Л., Томсонс Э.Я. Жидкометаллический регулятор реактора. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1982, вып. 1 (23), с. 61-69.
5. Яценко С.П. Индий. Свойства и применение. М.: Наука, 1973. 256 с.
6. Иванов Р.В. Химия и технология галлия. М.: Металлургия, 1973. 392 с.
7. Бутс В.В., Крузе У.А., Лиела Э.Л. и др. Исследование различных органов СУЗ на критической сборке. — Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 4, с. 283—284.