

Наличия всех четырех фаз при отработке маневра мощности необязательно, это определяется временными характеристиками самого маневра.

Выводы. Для успешной реализации оптимальных методов управления нейтронным полем и энергораспределением в маневренных режимах работы АЭС с ВВЭР-1000 необходимо существенно изменить используемую в данное время алгоритмическую и инструментальную основу системы управления. На основании опыта разработки таких систем и модельных испытаний, рассмотренных в статье алгоритмов управления можно выделить следующие основные вопросы для изменения проектных решений:

увеличение числа кластеров СУЗ в активной зоне в целях как повышения общей эффективности аварийной защиты, так и возможности использования при маневрировании полностью погружаемых групп;

разработка технологических программ оптимизации маневра мощности, работающих в режиме on-line;

разработка и внедрение надежного комплекса технических средств для реализации предлагаемой системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнов Ю.А., Астахов С.А., Духовенский А.С., Подольский В.Я. Некоторые нейтронно-физические характеристики серийного реактора ВВЭР-1000 при маневрировании мощностью: Препринт ИАЭ, 1987. 46 с.
2. Аникианов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. и др. Математическое и программное обеспечение системы управления энергораспределением реактора типа ВВЭР: Препринт МИФИ, 1990. 24 с.
3. Андронов Б.И., Аникианов С.С., Дунаев В.Г., Комиссарчук С.Ю. Аналитический тренажер ТРЕКС для обучения оперативного персонала управлению энергораспределением реактора ВВЭР-1000 во время ксеноновых колебаний: Препринт МИФИ, 1990. 20 с.
4. Камышан А.Н., Лужнов А.М., Морозов В.В. и др. Вне реакторный контроль энергораспределения в реакторах PWR. — Атомная техника за рубежом, 1986, № 9, с. 3—8.
5. Аникианов С.С. Использование фильтра Калмана для идентификации модели ксеноно-иодных колебаний в реальном масштабе времени. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып. 3, с. 38—42.

Поступила 23.10.91

В окончательной редакции 15.02.93

УДК 621.039'58

ПАССИВНАЯ МОДУЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ АВАРИЙНАЯ ЗАЩИТА РЕАКТОРА

*Абалин С.С., Исаев И.Ф., Кулаков А.А., Сивоконь В.П.,
Удовенко А.Н. (РНЦ "Курчатовский ин-т"), Ионайтис Р.Р. (НИКИЭТ)*

Системы аварийной защиты реакторов постоянно развиваются. В настоящее время, в частности, разрабатываются дополнительные системы, основанные на нестрадиационных принципах действия, например, с газовым поглотителем нейтронов [1, 2]. В НИКИЭТе и РНЦ "Курчатовский ин-т" проведены предварительные проработки и экспериментальная проверка отдельных элементов этой системы с использованием в качестве поглотителя нейтронов ^3He .

В настоящей работе на основе газообразного поглотителя предлагается быстрое действующая пассивная аварийная защита, выполненная в виде автономных модулей, как последняя ступень защиты реактора. Ее эффективность обосновывается на примере РБМК. В отличие от традиционных активных средств она не требует для функционирования подвода энергии и информационных сигналов от внешних систем реактора, что обеспечивает устойчивость к несанкционированным воздействиям персонала, влиянию других систем, а также внешним воздействиям (диверсии и стихийные бедствия с разрушением конструкций АЭС).

Поскольку предлагаемая защита — последняя ступень в системе аварийной защиты,

она должна иметь повышенные уставки срабатывания и обязательно высокое быстродействие, чтобы и с увеличенными уставками обеспечить необходимую эффективность защиты. Именно для достижения высокого быстродействия выбрана техника с использованием газообразного поглотителя нейтронов [3—5]. При этом оказалось возможным достаточно просто реализовать устройство быстрого ввода газа, а также создать быстродействующие пассивные средства формирования аварийного сигнала.

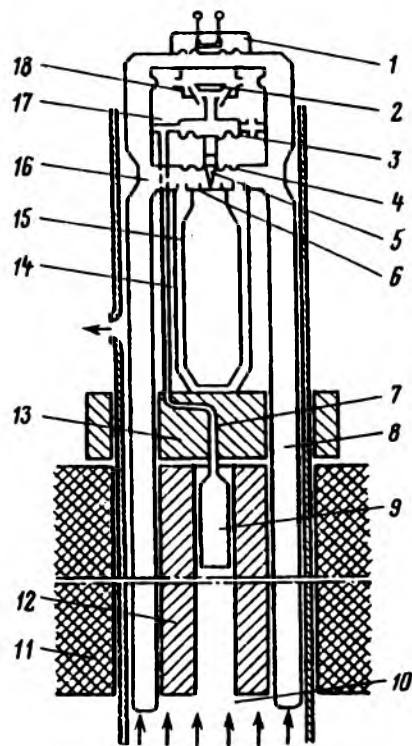
Возможность мгновенного срабатывания газовой пассивной аварийной защиты (0,1—0,3 с) в принципе позволяет остановить реактор даже при разгоне на мгновенных нейтронах, когда традиционные средства защиты неэффективны.

Схема модуля пассивной аварийной защиты. Конструкционно такая защита канального реактора может состоять из 25—30 автономных исполнительных механизмов-модулей, представляющих собой связки вертикальных трубок, вставляемые в технологические каналы (взамен ТВС) либо каналы СУЗ реактора (рис. 1). В верхней части модуля над активной зоной в ресивере запечатан мембраной газ — поглотитель нейтронов (^3He или $^{10}\text{BF}_3$), сжатый до 5—6 МПа. Нижняя часть связки трубок, находящаяся в активной зоне, является приемным каналом для газа-поглотителя и содержит чувствительный элемент детектора-преобразователя нейтронного потока, соединенный капилляром с упругой мембраной, которая снабжена ножом. Газовый дроссель совместно с подмембранным объемом образует дифференцирующее звено детектора. Последний наполнен ^3He до давления 2,5 МПа.

При увеличении скорости нарастания нейтронного потока выше установленной в чувствительном элементе за счет дополнительного энерговыделения и разогрева газа формируется импульс давления. Сигнал на выходе дифференцирующего звена, являющийся функцией скорости нарастания давления (нейтронного потока), приводит к разрыву мембраны, после чего нейтронопоглощающий газ из ресивера с большой скоростью инжектируется в приемный канал модуля и компенсирует аварийное увеличение реактивности. При медленном росте мощности (со скоростью нарастания нейтронного потока, находящейся ниже порога динамической чувствительности детектора) по достижении установленного уровня срабатывает устройство отсечки дросселя, и детектор реагирует на абсолютный нейтронный поток.

Таким образом, пассивная аварийная защита срабатывает по превышению как скорости нарастания нейтронного потока, так и мощности реактора. Каждый модуль срабатывает автономно от своего преобразователя нейтронного потока. Сигнал в детекторе-преобразователе формируется синхронно с нарастанием плотности нейтронного потока φ до уставки аварийной защиты ($1,5—1,9\varphi_{\text{ном}}$). Согласно расчетным и экспериментальным оценкам время заполнения приемного канала газом составляет 0,1—0,25 с при разрыве мембраны не более 0,05 с. Таким образом, полное время срабатывания аварийной защиты не превышает 0,3 с.

Модули пассивной аварийной защиты — одноразового действия, после срабатывания их извлекают и перезаряжают.



Р и с. 1. Модуль пассивной аварийной защиты: 1 — датчик; 2 — дроссель; 3 — мембрана; 4 — разделительная мембрана; 5 — нож; 6 — разрывная мембрана; 7 — капилляр; 8 — рабочая полость; 9 — чувствительный элемент; 10 — технологический канал; 11 — активная зона; 12 — вытеснитель; 13 — экран; 14 — защитный сосуд; 15 — ресивер; 16 — коллектор; 17 — подмембранный объем; 18 — узел перекрытия дросселя

Расчетное обоснование пассивной аварийной защиты. При малом поперечном размере конструкции модуля пассивной защиты РБМК (диаметр связки 8 см, диаметр трубок связки и детектора 0,8—1 см) для достижения высокой поглощающей способности модуля газ должен иметь большое сечение поглощения тепловых нейтронов и необходимую плотность, детектор — существенное энерговыделение в газе, что в свою очередь зависит как от ядерной реакции, так и эффективности торможения продуктов реакции в газе. Этим требованиям удовлетворяют ^3He и $^{10}\text{BF}_3$ [6], нейтроны в которых поглощаются при экзотермических реакциях $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$ ($E_p = 0,764$ МэВ) и $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ($E_p = 2,79$ МэВ). Сечения поглощения для них усредненные, например, по нейтронному спектру РБМК, $\sigma_{^3\text{He}} = 3 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$ и $\sigma_{^{10}\text{B}} = 2,3 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$.

Рассматривая возможность широкого применения ^3He в системе аварийной защиты, необходимо учитывать его высокую стоимость и дефицитность, а также наработку трития при его взаимодействии с нейтронами, особенно заметную в случае ложного срабатывания отдельных модулей, что требует оснащения системы дополнительными устройствами очистки ^3He от трития и его утилизации. Применение газообразного $^{10}\text{BF}_3$ вместо ^3He может существенно удешевить и упростить систему пассивной аварийной защиты и повысить ее надежность в случае нарушения герметичности приемной полости модуля при аварии, поскольку возможен перевод $^{10}\text{BF}_3$ в приемной полости в нелетучее соединение.

Эффективность газовых регулирующих органов системы аварийной защиты РБМК оценивалась по программе WIMS-D4 [5]. В результате расчета определена поглощающая способность газонаполненных органов разной геометрии относительно поглощающей способности стержня из карбида бора (рис. 2). Оценки проведены в предположении, что радиационный разогрев ^3He невелик и не изменяет существенно его плотность в управляющем объеме.

Поглощающей способности газовой кольцевой полости, близкой к 90 % «веса» стержня, соответствует давление ^3He 1,2 МПа. В случае использования 24 модулей может быть обеспечено требование по реактивности для аварийной защиты $\geq 2\beta$. При этом для конкретных параметров модуля (объем приемной полости $V_{\text{п.п}} = 13$ л, ресивера $V_{\text{рес}} = 5$ л) давление и количество ^3He , запасаемого в ресиверах, составят соответственно 4,7 МПа и 0,026 кг на модуль или 0,63 кг на реактор. При снижении требований к эффективности или увеличении числа модулей количество газа может быть значительно сокращено, так как зависимость веса газовой приемной полости аварийной защиты от давления нелинейна. Например, при требовании эффективности к газовой аварийной защите из 24 модулей, равной $1,2\beta$, потребность в ^3He составит $\sim 0,14$ кг.

В случае применения $^{10}\text{BF}_3$ взамен ^3He при том же, что и для ^3He , давлении газа в ресиверах 5 МПа для системы пассивной аварийной защиты, размещаемой в технологических каналах ($T = 550$ К), получаем следующие значения плотности и давления

$^{10}\text{BF}_3$ в приемных полостях модулей: $1,84 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, 1,4 МПа. Количество запасаемого в ресиверах газа $^{10}\text{BF}_3$ составляет 0,35 кг на модуль или 9,4 кг на реактор.

В решающей степени быстроедействие аварийной защиты определяется временем ввода поглощающего газа в приемные полости модулей пассивной защиты. Расход газа при адиабатическом турбулентном и ламинарном истечении из ресивера через отверстие в мембране описывается известными выражениями газодинамики [7], математическая модель газодинамики для газовых систем аварийной защиты рассмотрена в работе [5]. Полученное для конкретных условий РБМК ($T=550$ К, $p_{\text{рес}} = 5$ МПа, $p_{\text{п.п}} = 1,4$ МПа,

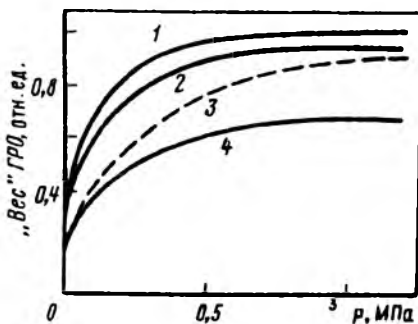


Рис. 2. Зависимость эффективности кольцевого диаметром 79×6,6 мм (3) и цилиндрических газовых элементов диаметром 82 (1), 74 (2), 40 мм (4) от давления газа-поглотителя (^3He) в них

$V_{\text{рес}} = 5$ л, $V_{\text{п.п}} = 13$ л) время заполнения приемных полостей равно 0,1—0,15 с для ^3He при площади проходного сечения $1 \cdot 10^{-4}$ м² и 0,2—0,25 с для $^{10}\text{BF}_3$ при $2,5 \cdot 10^{-4}$ м². Такое малое время заполнения обеспечивает высокое быстродействие пассивной аварийной защиты (рис. 3).

Расчетные параметры детектора на основе ^3He . Газодетектор модулей является основным элементом рассматриваемой пассивной аварийной защиты, выполняющим как сигнально-преобразующую, так и силовую исполнительную функцию системы. Принцип его работы основан на энерговыделении и разогреве в объеме нейтронопоглощающего газа ^3He в результате экзотермической $n-p$ ядерной реакции.

В соответствии с описанным ранее принципом работы и конструкционным исполнением детектора для дальнейших расчетов воспользуемся схемами, показанными на рис. 4. Введем следующие обозначения: p , V , m , $\bar{T}$, $\bar{V}_a$, $\bar{\rho}$ — давление, объем, масса, усредненные по радиусу температура, объем и плотность газа в чувствительном элементе детектора; $\dot{m}$ — расход газа через дроссель проводимостью z ; φ — плотность нейтронного потока; $\dot{\varphi}$ — скорость нарастания плотности нейтронного потока; q , λ — плотность объемного энерговыделения и коэффициент теплопроводности в газе чувствительного элемента.

Нагрев газа в чувствительном элементе определяется объемным энерговыделением и теплообменом со стенками путем теплопроводности. Вклад конвекции незначителен, поскольку комплекс $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ — критерий подобия Грасгофа и Прандтля ниже необходимого для заметной конвекции: $\text{Gr} \cdot \text{Pr} \sim 10^2 \ll 10^3$ [8]. В этом случае (температура стенки $T_c = T_0 = \text{const}$, внутренние источники тепла) устанавливается параболическая зависимость $T(r)$ с максимумом температуры на оси чувствительного элемента [8]:

$$T(r) = T_c + (1 - r^2/r_0^2) q r_0^2 / 4\lambda.$$

Определим динамические характеристики детектора, приняв за расчетную модель схему рис. 4, а.

Зависимость $p_{\text{вых}}(p_{\text{вх}})$ выражается дифференциальным уравнением

$$\dot{p}_{\text{вых}} = \dot{p}_{\text{вх}} - \dot{p}_{\text{др}}, \quad (1)$$

где $\dot{p}_{\text{др}}$ — изменение сигнала из-за перетекания газа через дроссель; $\dot{p}_{\text{др}} = \dot{m} R \bar{T} N$.

Для малого изменения сигнала при ламинарном изотермическом режиме течения характеристика дросселя линейна: $\dot{m} = z \delta p_{\text{вых}}$.

Введя обозначение $z R \bar{T} / V = B$, получим $\dot{p}_{\text{др}} = B \delta \dot{p}_{\text{вых}}$.

Приращение давления в чувствительном элементе $\delta p_{\text{вх}}$ пропорционально изменению плотности нейт-

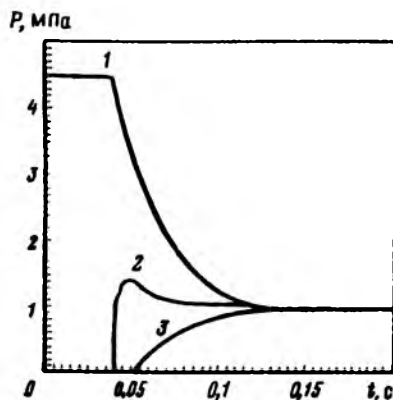


Рис. 3. Зависимость давления в резервуаре (1), на входе (2) и в конце приемной полости (3) модуля пассивной аварийной защиты

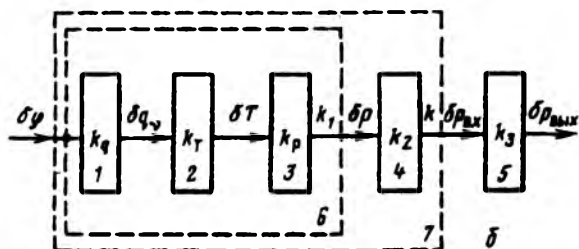
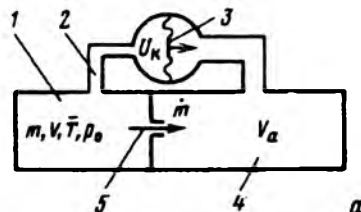


Рис. 4. Принципиальная схема детектора: 1 — чувствительный элемент; 2 — капилляр; 3 — мембрана; 4 — аккумулятор; 5 — дроссель (а); 1 — звено преобразования нейтронного потока в энерговыделение; 2, 3, 4 — звено, отображающее нагрев газа, формирование и передачу импульса давления соответственно; 5 — дифференцирующее звено; 6, 7 — звено, отображающее преобразование нейтронного потока в импульс давления в чувствительном элементе и на входе звена 5 соответственно (б)

ронного потока: $\delta p_{\text{вх}} = k \delta \varphi$, и поскольку звенья 1—4 безынерционны, справедливо соотношение $\delta p = k \delta \varphi$.

Подставив выражения для $\dot{p}_{\text{др}}$ и $\dot{p}_{\text{вх}}$ в уравнение (1), получим

$$\dot{p}_{\text{вых}} + B \delta p_{\text{вых}} = k \dot{\varphi}. \quad (2)$$

На начальном участке разгона реактора изменение плотности нейтронного потока имеет линейный характер

$$\delta \varphi = \dot{\varphi} t, \quad \delta p_{\text{вх}} = k \dot{\varphi} t. \quad (3)$$

В этом случае при нулевом начальном условии (при $t = 0$ $\delta p_{\text{вых}} = 0$) решение уравнения (2) дает выражение для $\delta p_{\text{вых}}$:

$$\delta p_{\text{вых}} = k \dot{\varphi} B^{-1} [1 - \exp(-Bt)], \quad (4)$$

являющееся уравнением дифференцирующего звена детектора.

Параметр $1/B = V/zRT = \tau$ есть постоянная времени дифференцирующего звена 5. Используя соотношение (3), перпишем уравнение (4): $\delta p_{\text{вых}} = \delta p_{\text{вх}} [1 - \exp(-t/\tau)] \tau$, откуда получаем передаточную функцию звена 5: $k_t = \delta p_{\text{вых}} / \delta p_{\text{вх}} = [1 - \exp(-t/\tau)] \tau / t$. При $t \rightarrow \infty$ $\delta p_{\text{вых}} \rightarrow k \dot{\varphi} \tau$; производная выходного сигнала $\delta p_{\text{вых}} = k \dot{\varphi} \exp(-t/\tau)$ и при $t = 0$ $\delta p_{\text{вых}} = k \dot{\varphi} = \delta p_{\text{вх}}$.

Зависимость k_t (τ/t) (частотная характеристика детектора), приведенная на рис. 5, обеспечивает его максимальную чувствительность при аварийно-быстром нарастании нейтронного потока (при $t \rightarrow 0$ $k_t \rightarrow 1$) и вместе с тем предотвращает ложные срабатывания аварийной защиты, снижает реакцию детектора на медленные колебания нейтронного потока и температуры (при пуске и регулировке реактора, перегрузке твэлов) ниже порога срабатывания (при $t \rightarrow \infty$ $k_t \rightarrow 0$).

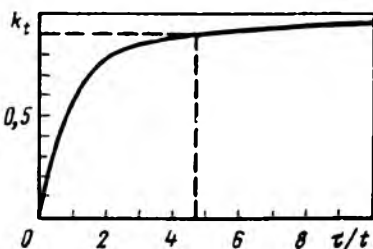


Рис. 5. Характеристика $k_t(\tau/t)$

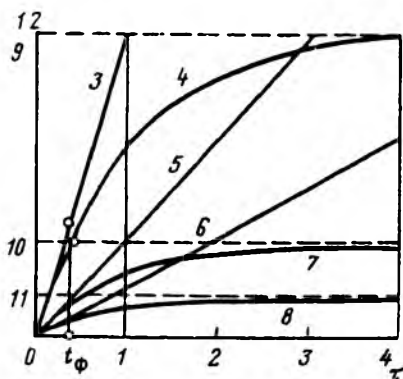


Рис. 6. Зависимость $\delta p_{\text{вх}} / \delta p_{\text{вх}}(t)$ для разных $\delta \varphi$: 1, 2 — оси $\delta p_{\text{вх}}$, $\delta p_{\text{вх}}(t)$; 3 — $\delta p_{\text{вх}} \text{ макс}$; 4 — $\delta p_{\text{вх}} \text{ макс}$; 5 — $\delta p_{\text{вх}} \text{ мин}$; 6 — $\delta p_{\text{вх}} \text{ раб}$; 7 — $\delta p_{\text{вх}} \text{ мин}$; 8 — $\delta p_{\text{вх}} \text{ раб}$; 9 — $\delta p_{\text{раз г макс}}$; 10 — $\delta p_{\text{ср}}$; 11 — $\delta p_{\text{раб макс}}$

На рис. 6 показаны входные и выходные сигналы детектора с коэффициентом передачи k и k_t для заданных постоянной времени τ и уставки срабатывания пассивной аварийной защиты $\delta p_{\text{вых ср}}$, соответствующие трем граничным значениям и скорости изменения плотности нейтронного потока. Интервал $t_{\text{ф}}$ — время формирования сигнала $\delta p_{\text{вых ср}}$, приводящего к срабатыванию аварийной защиты при разгоне, в этом случае φ возрастает на уставку $\delta \varphi_2$.

Возможность удержания газа-поглотителя в модуле при разгерметизации. Такой недостаток газовой пассивной аварийной защиты, как возможность утечки газообразного поглотителя в случае разгерметизации модуля при аварии, устраним, если каждый модуль снабжен хемосорбентом, переводящим BF_3 в твердую фазу на стенках полости после ее заполнения. Хемосорбент должен быстро реагировать с BF_3 , иметь малое сечение захвата тепловых нейтронов и быть химически стойким при рабочей температуре. Этим требованиям отвечают фториды щелочных металлов и прежде всего фторид натрия, для которого было измерено время реакции с BF_3 в зависимости от начальной температуры слоя $T_{\text{сл}}$ и удельной поверхности S_0 . Характерные $p-t$ кривые приведены на рис. 7.

Оказалось, что на образцах порошка с $S_0 = 0,053 \text{ м}^2/\text{г}$ реакция не идет из-за образующейся

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 ~ 20 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., Градецкий 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. Rept. ORNL-TM-2316, 1968, August, 2.p.
10. Griemes W. Molten-salt reactor chemistry. — Nucl. Appl. Technol., 1970, v.8, № 2, p. 137.

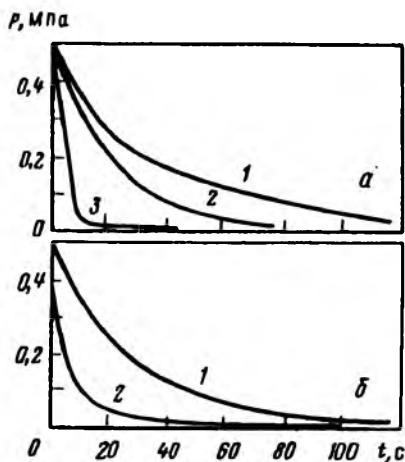


Рис. 7. Зависимость давления BF_3 от времени для фторида натрия при температуре слоя 315°C (1), 340°C (2), 400°C (3) (а)

Поступила в Редакцию 24.06.91

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