

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА С АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Д. А. Горькаев, М. И. Крылова, И. А. Никитин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Описана конструкция исполнительного механизма с автономным источником энергии на основе пиротехнического газогенератора, предназначенного для прекращения цепной ядерной реакции при нарушении нормальной работы реактора. Рассмотрены особенности конструкции газогенератора и газогенерирующие пиротехнические составы на основе азиды натрия. Приведены результаты испытаний образцов автономных источников энергии и экспериментальные данные по исследованию макета исполнительного механизма аварийной защиты с газогенератором. Предложен алгоритм и расчетная модель определения расходной характеристики газогенератора. Проведены расчеты динамических характеристик макета исполнительного механизма. Результаты свидетельствуют, что в исполнительном механизме аварийной защиты ядерного реактора в качестве эффективного источника энергии можно использовать пиротехнический газогенератор.

Ключевые слова: ядерный реактор, аварийная защита, пневматический исполнительный механизм, пиротехнический состав, пиротехнический газогенератор.

ACTUATING MECHANISM OF REACTOR SAFETY SYSTEM WITH INDEPENDENT ENERGY SOURCE ON THE BASE OF PYROTECHNIC GAS GENERATOR / D. A. GOR'KAEV, M. I. KRYLOVA, I. A. NIKITIN // There is described the design of actuating mechanism with independent energy source on the base of pyrotechnic gas generator aimed at chain nuclear reaction termination at abnormal reactor operation. There are considered the peculiarities of gas generator design as well as gas-generating pyrotechnic compositions on the base of sodium azide. There are presented the results of independent energy source models testing and the experimental data on studying the model of safety system actuating mechanism with gas generator. The algorithm and calculation model of gas generator consumption characteristic determination is proposed. The calculations of the actuating mechanism dynamic characteristics are performed. The results testify to the fact that pyrotechnic gas generator can be used as efficient energy source in the actuating mechanism of the nuclear reactor safety system.

Key words: nuclear reactor, safety system, pneumatic actuating mechanism, pyrotechnic composition, pyrotechnic gas generator.

Введение

В настоящее время ядерные реакторы нашли широкое применение в различных сферах науки и техники. Независимо от назначения ядерного реактора, аварийная защита (АЗ)

представляет собой структурную часть системы безопасности, которая посредством системы управления и защиты (СУЗ) обеспечивает быстрый ввод рабочим органом (РО) или группой РО отрицательной реактивности в активную зону для прекращения цепной ядер-

ной реакции при нарушении нормальной работы установки.

Традиционный подход построения АЗ реактора основан на использовании пассивного принципа, когда срабатывание АЗ производится в момент наступления аварийного события. Конструкция исполнительного механизма (ИМ) АЗ предусматривает, как правило, независимый источник энергии (например, потенциальная энергия силы тяжести), который воздействует на подвижную часть РО в сторону уменьшения реактивности активной зоны [1]. Проектное быстроедействие ИМ АЗ должно обеспечивать надежную остановку реактора для всех возможных аварийных ситуаций.

В настоящее время совершенствование и развитие систем АЗ реактора связано с внедрением дополнительных устройств, работа которых основана на нетрадиционных принципах. К таким системам относится, например, прямодействующая аварийная защита (ПАЗ). Отличие таких систем от традиционной АЗ состоит в том, что устройство, ответственное за срабатывание АЗ, расположено внутри ИМ. В работе [2] приведено значительное количество технических решений по ПАЗ и их конструктивные схемы. На исследовательских ядерных реакторах (ИЯР) также иногда используют нетрадиционные способы остановки реактора. К ним можно отнести АЗ импульсного реактора БИР-2М на мгновенных нейтронах деления [3], ускоренный вывод блока безопасности посредством теплового удара в топливных элементах на реакторах БАРС-2 и БАРС-3, а также быстродействующую защиту с применением пневматического ускорителя на реакторе БАРС-5 [4] и стенде критических сборок ИКАР-С [5].

В большинстве случаев дополнительная система является последней ступенью в АЗ, поэтому для обеспечения эффективности к ней предъявляют повышенные требования по надежности и быстрдействию срабатывания. Обычно конструктивные решения в таких системах рассчитаны на одноразовое действие.

Особое место среди реакторных установок занимают ядерные реакторы на быстрых нейтронах, в которых небольшие размеры активной зоны достигаются путем повышения

в топливе процентного содержания изотопа урана-235. Реакторы такого типа находят применение:

- в качестве исследовательских импульсных реакторов для получения контролируемых и повторяемых вспышек деления атомных ядер на запаздывающих и мгновенных нейтронах [6];

- в качестве ядерных энергетических установок (ЯЭУ), используемых на атомных надводных и подводных кораблях, а также в составе космических аппаратов [7]. В первом случае – силовая установка транспортного средства; во втором – электрический генератор на основе термоэмиссионного преобразователя, где рабочим телом являются радиоизотопы (стронций-90, цезий-137 и др.);

- в перспективных проектах в качестве ядерных двигателей для самолетов и ракет различного назначения (ЯРД) [8, 9].

Одним из важных моментов при эксплуатации ЯЭУ и ЯРД является возможность эффективного использования в ИМ АЗ потенциальной энергии силы тяжести. По мере увеличения угла наклона реактора относительно поверхности земли эффективность такого способа АЗ снижается, а в условиях космического базирования такой способ не применим.

Учитывая данные обстоятельства, такие ИМ АЗ оснащают дополнительным источником потенциальной энергии, например, упругим элементом (пружина сжатия) [1], который независимо от пространственного положения ядерного реактора обеспечивает срабатывание АЗ. К недостаткам такого источника энергии можно отнести следующее:

- наличие механизмов взвода, удержания и срабатывания;

- уменьшение силы по мере раскрытия пружины;

- существенное ухудшение массогабаритных характеристик при увеличении силы и рабочего хода;

- негативное влияние температуры на механические свойства материала пружины и др.

Чтобы исключить перечисленные недостатки, следует рассмотреть другие источники энергии, использование которых в ИМ АЗ может обеспечить высокую надежность сраба-

тывания, быстродействие и способность механизма развивать значительное тяговое усилие. Опыт разработки и эксплуатации импульсных ядерных реакторов [6], в которых для генерации импульсов делений применяются пневматические ИМ, показывает, что подобные ИМ можно также использовать в системах АЗ других ядерных установок.

В настоящей работе рассматривается быстродействующая пассивная АЗ ядерных реакторов на основе одного из вариантов пневматического механизма [10], в котором источником энергии является пиротехнический газогенератор.

Подходы проектирования пневматического привода ИМ АЗ

Характерной особенностью пневматических механизмов являются надежность, реализация высоких скоростей перемещения РО, передача значительных тяговых усилий на перемещение подвижных частей независимо от их пространственного положения. Важным достоинством такого механизма является способность сохранять работоспособность при значительном уровне радиационного воздействия, а также в условиях как высокой, так и низкой температур.

В общем случае пневматический привод ИМ АЗ представляет собой устройство, в котором источник энергии связан с пневматическим цилиндром трубопроводом, а поршень – через шток с РО. Конструктивная схема пневматического привода ИМ АЗ приведена на рис. 1. Механизм состоит из термодинамической и механической подсистем.

На схеме рис. 1 показано, что в подвижных соединениях пневматического цилиндра отсутствуют уплотняющие элементы. Такое техническое решение обеспечивает работоспособность механизма в условиях низкой и высокой температур. Утечки рабочей среды через подвижные сопряжения можно снизить за счет увеличения гидравлического сопротивления в зазоре и быстродействия срабатывания механизма.

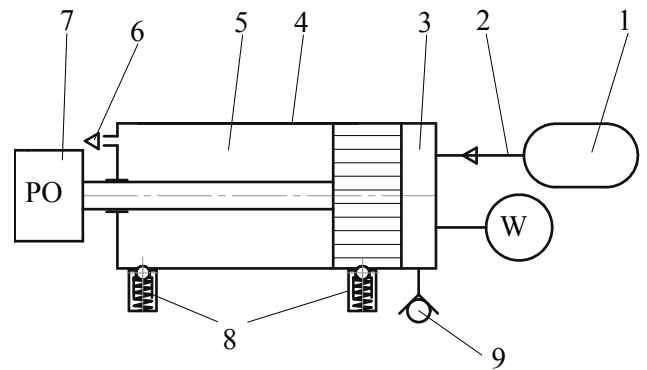


Рис. 1. Конструктивная схема пневматического привода ИМ АЗ: 1 – источник энергии; 2 – трубопровод; 3 – рабочая полость цилиндра; 4 – пневмоцилиндр; 5 – выхлопная полость цилиндра; 6 – дроссель (выход в атмосферу); 7 – подвижная часть; 8 – фиксатор; 9 – клапан предохранительный; W – датчик давления

В приводе ИМ АЗ установлены фиксаторы 8, которые исключают перемещение подвижной части независимо от положения механизма в пространстве. Время начала перемещения РО зависит от быстродействия срабатывания источника энергии и скорости изменения давления в рабочей полости цилиндра (тяговое усилие), направленного на преодоление сил инерции подвижной части и сопротивления, оказываемого фиксатором.

В пневматическом приводе в качестве источника энергии можно использовать ресивер, небольшой объем газа под давлением или автономное устройство, которое вырабатывает газ (газогенератор). Конструктивная схема привода с ресивером используется для многократного применения. Ресивер наполняется газом от баллонной системы, подача в пневмоцилиндр осуществляется по трубопроводу через электропневмоклапан (ЭПК). Схема с газогенератором предназначена для одноразового срабатывания, выделяемый газ непосредственно по трубопроводу поступает в пневмоцилиндр.

Тип и конструкция источника энергии для пневматического привода ИМ выбирается из условий эксплуатации ядерного реактора и назначения РО или группы РО.

При использовании газогенератора, в приводе ИМ необходимо устанавливать предохранительный клапан 9, предназначенный для

сброса избыточного давления из рабочей полости цилиндра 3 в случае невозможности перемещения подвижной части, например, при заклинивании. Максимальное тяговое усилие, действующее на поршень, определяется прочностью наиболее слабого элемента или узла в конструкции подвижной части.

В конечной фазе работы пневматический привод должен обеспечивать поджатие подвижной части в крайнем положении, величина усилия зависит от давления газа в рабочей полости 3.

Особенности конструкции газогенератора

Газогенератор (ГГ) представляет собой энергетическое устройство, вырабатывающее газ в результате протекания химических реакций. Разновидностью ГГ являются пиротехнические ГГ, в которых газ образуется в результате горения пиротехнического состава (ПТС).

Пиротехнические ГГ применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую надежность, быстроедействие срабатывания устройства, небольшие массовые и габаритные параметры, длительные сроки хранения и эксплуатации, в течение которых не требуется дополнительное обслуживание.

Основными областями применения пиротехнических ГГ являются:

- устройства пассивной безопасности пассажиров автотранспорта;
- устройства вытеснения жидкостей;
- газодинамические лазеры;
- устройства для создания дыхательных смесей и инертной атмосферы;
- системы пожаротушения;
- аварийное пневматическое оборудование.

Исходя из условий эксплуатации ИМ АЗ реактора, в качестве рабочего газа предпочтительно использовать азот. Этот газ пожаро-взрывобезопасен, физиологически инертен, имеет низкую температуру конденсации.

Большинство азотогенерирующих ПТС в качестве горючего и соединения-носителя азота содержат азид натрия [11]. К важным достоинствам азидов натрия можно отнести то, что они, в отличие от других азидов (щелочных

или щелочноземельных металлов), устойчивы, малочувствительны к трению и удару [12]. При термическом распаде азидов натрия в газовую фазу переходит только азот. Кроме того, азид натрия производится в промышленных масштабах, чем обуславливается его невысокая стоимость.

Используя различные окислители и варьируя соотношения компонентов, на базе азидов натрия можно реализовать газогенерирующий ПТС с температурой горения 500–2700 °С, удельным газовыделением 200–465 см³/г и скоростью послойного горения 1–300 мм/с [13].

Опыт создания ГГ показал, что для пневматического ИМ реактора наиболее подходящими являются ПТС на основе азидов натрия и оксида железа(III). Такие составы имеют высокую температуру горения 500–1000 °С, температуру воспламенения 280–400 °С, скорость их послойного горения составляет от 5 до 30 мм/с, энтальпия сгорания 1,2–1,6 кДж/г, удельное газосодержание 300–370 см³/г. При горении ПТС выделяется практически чистый азот, в продуктах горения отсутствует вода и легкоконденсирующиеся вещества, шлак после сгорания сохраняет форму исходного заряда [14–16].

Горение ПТС на основе азидов натрия с оксидом железа(III) может быть описано [17] следующими химическими уравнениями:

- 1) $2\text{NaN}_3 \rightarrow 2\text{Na} + 3\text{N}_2$;
- 2) $6\text{Na} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{Na}_2\text{O} + 2\text{Fe}$;
- 3) $\text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{NaFeO}_2$.

Расчетно-экспериментальным путем подобран ПТС для ГГ. Массовая доля азидов натрия в нем составляет 68 %, оксида железа(III) – 32 %.

Конструктивная схема пиротехнического ГГ [18] представлена на рис. 2.

Газогенератор представляет собой цилиндрическую сборку, в корпусе 2 которой размещен газогенерирующий заряд 1 с осесимметричным зазором 3. Заряд закреплен гайкой 5. Между газогенерирующим зарядом (ГГЗ) и гайкой 5 установлен фильтрующий элемент 6. С одного торца сборки ГГ расположено иницирующее устройство 7, на другом – канал вывода газа 4 в гайке 5.

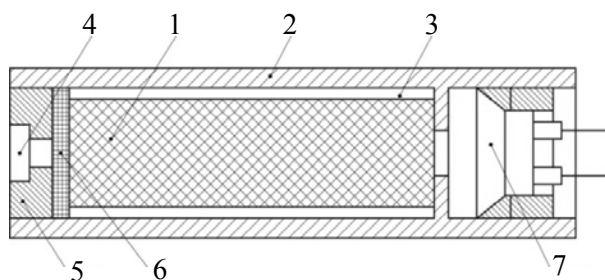


Рис. 2. Конструктивная схема пиротехнического газогенератора: 1 – газогенерирующий заряд; 2 – корпус; 3 – зазор; 4 – канал вывода газа; 5 – гайка; 6 – фильтрующий элемент; 7 – иницирующее устройство

При подаче электрического импульса на иницирующее устройство 7 локальный тепловой импульс через воздушный зазор поджигает торцевую поверхность ГГЗ. Выделившийся газ, протекая по зазору 3 к каналу вывода газа 4, поджигает внешнюю цилиндрическую поверхность заряда. Фильтрующий элемент 6 охлаждает и очищает газ. Процесс термохимической реакции самораспространяется за счет собственной энергии до полного сгорания газогенерирующего заряда 1.

В конструкции ГГ использована схема депрессивного горения заряда, которая обеспечивает высокую начальную скорость газогенерации и быстродействие срабатывания ИМ АЗ.

Представленную конструкцию ГГ характеризуют следующие свойства:

- автономность;
- малые габариты;

– высокая степень очистки генерируемого газа от конденсированных продуктов горения газогенерирующего ПТС;

– высокое быстродействие (время срабатывания менее 1 с);

– высокая надежность (не менее 0,9999 при доверительной вероятности 0,9);

– стабильные параметры срабатывания (среднее квадратическое отклонение времени срабатывания в диапазоне начальных температур от минус 50 °С до плюс 50 °С не превышает 5 %);

– генерация газа с температурой не более 50 °С от начальной температуры устройства;

– гарантийный срок не менее 25 лет.

Параметры ГГ определялись при срабатывании устройства на приемник постоянного объема. В процессе исследований определялось время начала поступления газа в приемник и достижения максимального давления, проводилась оценка состояния конденсированных продуктов горения.

Давление газа в полости приемника измерялось датчиком DMP 333, электрический сигнал с которого регистрировался осциллографом Tektronix TDS3014В. Суммарная погрешность измерения давления газа составляла ±1,0 %. Точность измерения времени срабатывания ГГ составляла 2 мс.

Параметры исследуемых ГГ приведены в таблице.

Параметры газогенераторов

| Наименование | ГГ-1 (рис. 3) | ГГ-2 – | ГГ-3 (рис. 3) | ГГ-4 (рис. 4) |
|--|------------------|-----------|------------------|------------------|
| Закладка ПТС по азоту, л* | 3,5 | 2,4 | 3,7 | 28,9 |
| Относительная плотность ГГЗ** | 0,75 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Объем приемника, л | 0,085 | 0,220 | 0,085 | 0,306 |
| Время начала поступления газа в приемник, мс | 39 | 21 | 32 | 13 |
| Время срабатывания ГГ, мс | 300 | 360 | 340 | 570 |
| Максимальное давление в приемнике, МПа | 6,23 | 1,25 | 6,45 | 23,2 |
| Размеры ГГЗ (диаметр×высота), мм | 12×50 | 12×30 | 12×50 | 50×130 |
| Масса ГГ, кг | 0,2 | 0,15 | 0,2 | 1,2 |

* Объем азота при температуре 0 °С и давлении 101,3 кПа (760 мм рт. ст.).

** Отношение фактической плотности ГГЗ к максимальной плотности.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости изменения давления от времени в приемнике объемом 0,085 л при срабатывании ГГ с различной относительной плотностью ГГЗ.

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость изменения давления от времени в приемнике объемом 0,306 л при срабатывании ГГ-4.

Особенности расчета пневматического привода ИМ АЗ с пиротехническим газогенератором

Испытания ГГ проводились с использованием макета пневматического ИМ АЗ. Испол-

нительный механизм перемещал имитатор РО массой 16 кг в горизонтальном направлении на расстояние 220 мм. Диаметр пневмоцилиндра – 0,05 м (площадь поршня – $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$). Газовая магистраль пневматической системы представляла собой трубопровод с внутренним диаметром 6 мм и длиной 2 м. В стартовом положении подвижная часть удерживалась фиксатором, усилие отрыва с которого составляло ~900 Н. Торможение подвижной части осуществлялось с помощью пневматического демпфера (выхлопная полость цилиндра). В конечном положении подвижная часть фиксировалась на устройстве захвата, в пределах которого допускалась незначительная осцилляция.

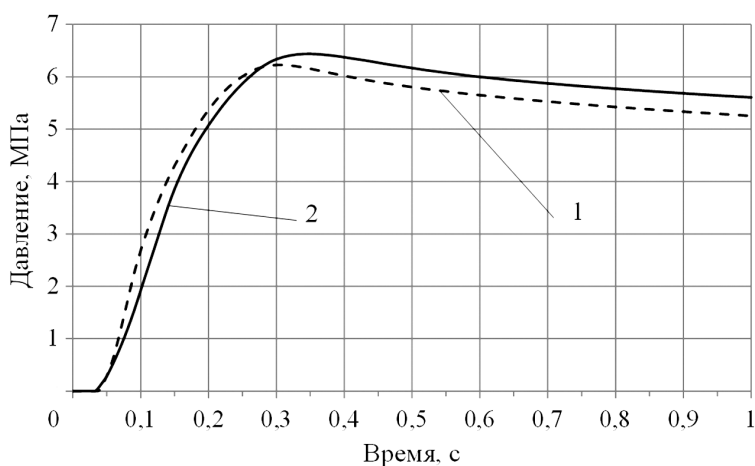


Рис. 3. Экспериментальная зависимость изменения давления от времени в приемнике объемом 0,085 л при срабатывании ГГ с различной относительной плотностью ГГЗ: 1 – ГГ-1 (0,75); 2 – ГГ-3 (0,8)

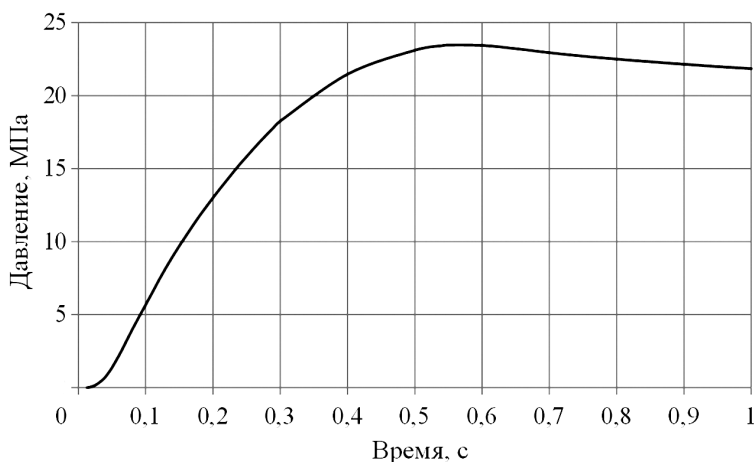


Рис. 4. Экспериментальная зависимость изменения давления от времени в приемнике объемом 0,306 л при срабатывании ГГ-4

Экспериментальные зависимости изменения давления от времени в рабочей полости цилиндра макета ИМ АЗ при срабатывании ГГ с различной закладкой ПТС по азоту представлены на рис. 5. Давление газа в рабочей полости цилиндра измерялось датчиком DMP 331, электрический сигнал с которого регистрировался осциллографом Tektronix TDS3052B.

Передний фронт графика на рис. 5 соответствует наполнению газом буферного объема цилиндра, задний фронт – перемещению подвижной части механизма, движению РО из одного крайнего положения в другое. Дальнейший процесс характеризует уравнивание давления в пневматической системе.

Результаты испытаний ИМ АЗ с автономным источником энергии показали, что время перемещения подвижной части составляет ~100 мс, а усилие поджатия ее в конечном положении – от 1200 до 1300 Н в течение ~1 с.

В работе [19] приведена расчетная модель пневматического механизма, в котором источником энергии является ресивер с газом (воздух) под давлением.

Выше показано, что режим горения ГГЗ определяется особенностью конструкции конкретного ГГ. Поэтому в расчете пневматиче-

ского механизма с автономным источником энергии для учета влияния ГГ предлагается в качестве исходного параметра использовать экспериментальную зависимость изменения давления от времени $p(t)$ при срабатывании ГГ на приемник, полагая, что для данного устройства эта характеристика постоянна. Зависимость $p(t)$ позволяет определить функцию наработки массы газа $W(t)$ и скорость выделения газа $\delta W/\delta t$. Последний параметр можно рассматривать как массовый расход газа некоего формализованного источника энергии (аккумулятора), который поступает в рабочую полость пневматического цилиндра (см. рис. 1).

При этом приняты следующие допущения:

- газ является идеальным;
- процесс течения газа в полость приемника адиабатический, теплообмен отсутствует;
- изменение скорости горения состава на основе азидата натрия от внешнего давления незначительное [11];
- температура генерируемого газа – 50 °С;
- конструктивные размеры и физико-механические свойства материала соединительного трубопровода в схемах газогенератор–приемник, газогенератор–пневмоцилиндр близки.

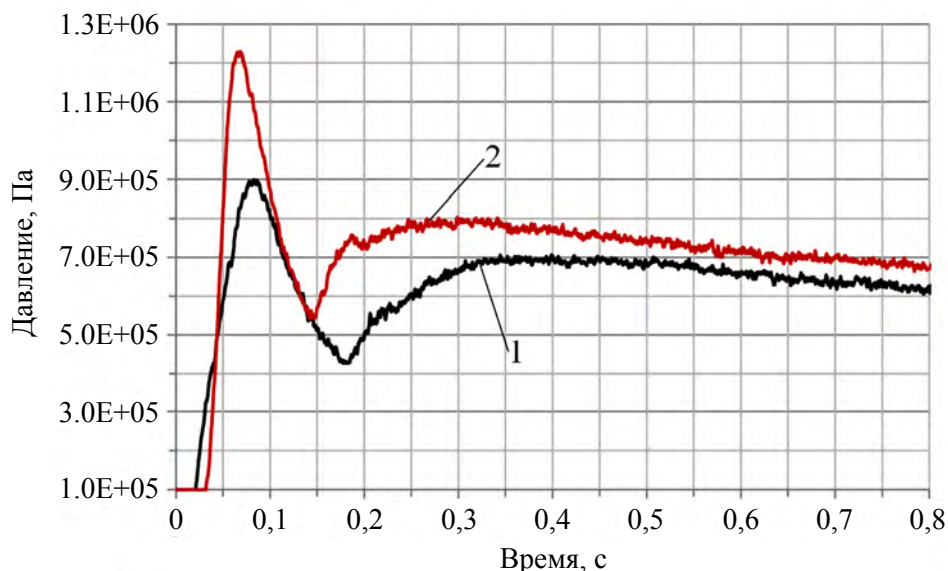


Рис. 5. Экспериментальная зависимость изменения давления от времени в рабочей полости цилиндра макета ИМ АЗ при срабатывании ГГ с различной закладкой ПТС по азоту: 1 – 2,4 л (ГГ-2); 2 – 3,7 л (ГГ-3)

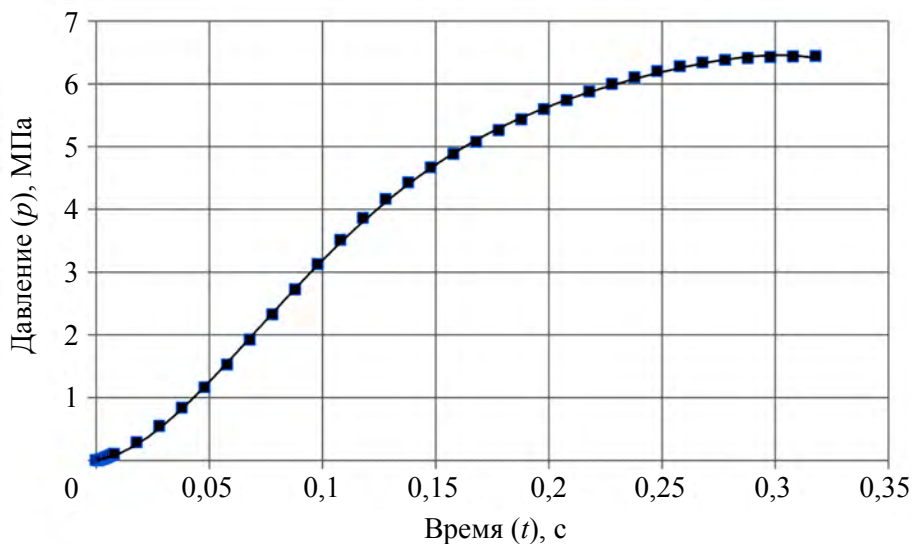


Рис. 6. Экспериментальные данные (■) изменения давления от времени в приемнике при срабатывании ГГ-3

На рис. 6 показана часть одной из зависимостей рис. 3 (кривая 2).

Зависимость давления от времени, приведенную на рис. 6, можно описать функцией

$$p(t) = -13751t^5 + 12970t^4 - 4495,5t^3 + 610,75t^2 + 4,0612t + 0,011. \quad (1)$$

Для идеального газа зависимость изменения массы азота $W(t)$ от времени можно определить из уравнения

$$p(t) = \rho(t)RT = \frac{W(t)}{V}RT, \quad (2)$$

где ρ – плотность; V – объем приемника; R – газовая постоянная; T – температура газа.

Зависимости изменения массы газа $W(t)$ и скорости выделения газа $\delta W/\delta t$ от времени в приемнике при срабатывании ГГ-3 приведены на рис. 7.

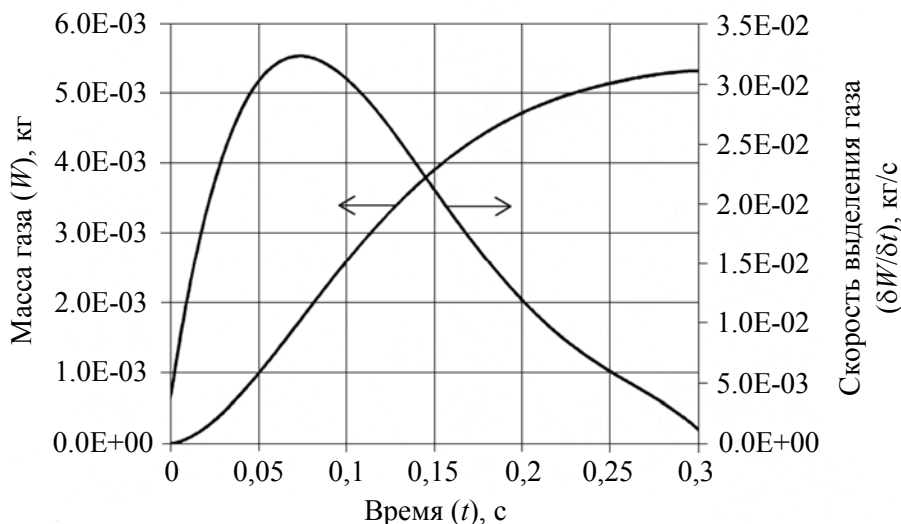


Рис. 7. Зависимости изменения массы газа и скорости выделения газа от времени в приемнике при срабатывании ГГ-3

Расчет динамических характеристик макета ИМ АЗ, оснащенного ГГ-3, проводился с использованием математической модели, представленной в работе [19], при этом массовый расход поступления газа в рабочую полость цилиндра описывался функцией $\delta W/\delta t$. Результат расчета изменения давления от времени в рабочей полости пневматического цилиндра ИМ АЗ приведен на рис. 8 (кривая 2). Кривая 1 на рис. 8 представляет собой экспериментальные данные (см. кривую 2 на рис. 5).

Из приведенных на рис. 8 результатов видно хорошее согласие экспериментальных

и расчетных данных в описании характера термодинамического процесса и времени перемещения подвижной части, расхождение значений давления в точках экстремума составляет не более 7 %.

Расчетные характеристики работы термодинамической и механической подсистем макета ИМ АЗ с ГГ-3 представлены на рис. 9.

Таким образом, с помощью предложенной модели можно проводить расчеты по определению оптимальных параметров конструкции и динамических характеристик ИМ с автономным источником энергии.

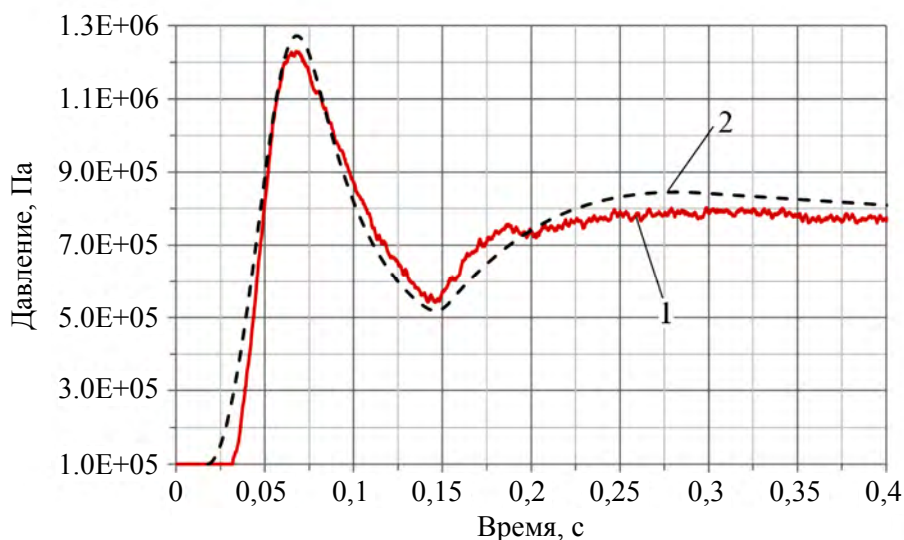


Рис. 8. Зависимость изменения давления от времени в рабочей полости пневматического цилиндра ИМ АЗ при срабатывании ГГ-3: 1 – эксперимент; 2 – расчет

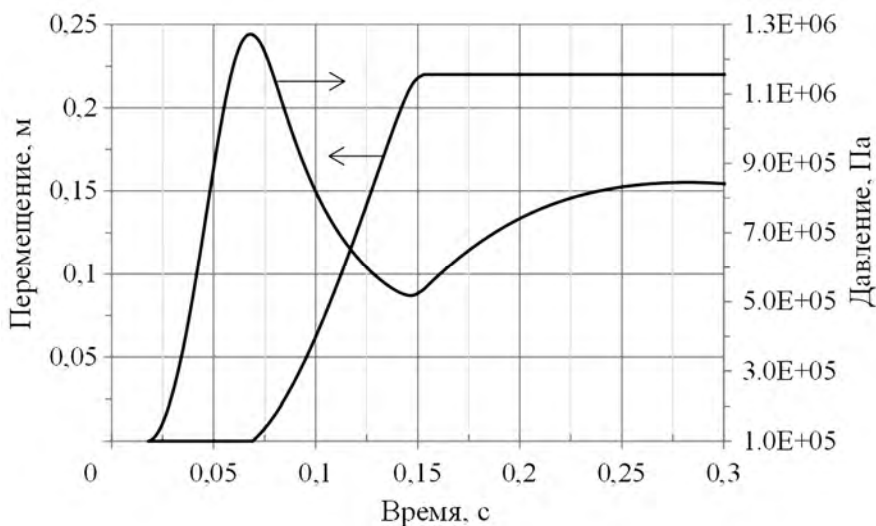


Рис. 9. Расчетные зависимости перемещения и давления от времени при срабатывании макета ИМ АЗ с ГГ-3

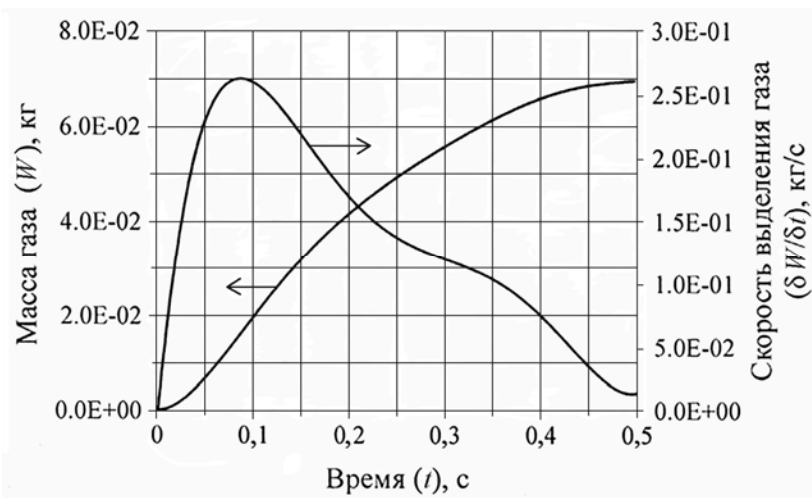


Рис. 10. Зависимости изменения массы газа и скорости выделения газа от времени в приемнике при срабатывании ГГ-4

Цель разработки ГГ-4 состояла в создании источника энергии с коротким временем срабатывания и высокой скоростью выделения газа. Особенность данного генератора состоит в конструкции ГГЗ. Воспламенение поверхности горения основного заряда проводилось посредством дополнительного заряда, выполненного из пиротехнического эластичного материала [20], скорость горения которого составляет ~ 2,5 м/с.

Начальный участок представленной на рис. 4 зависимости давления от времени (до максимума) можно аппроксимировать функцией

$$p(t) = 20790t^6 - 37038t^5 + 25538t^4 - 8516,3t^3 + 1302,1t^2 - 2,8393t. \quad (3)$$

Зависимости изменения массы газа $W(t)$ и скорости выделения газа $\delta W/\delta t$ от времени в приемнике при срабатывании ГГ-4 приведены на рис. 10.

В результате испытаний ГГ-4 (таблица, рис. 4 и 10) определено быстроедействие устройства, а именно: промежуток времени от момента подачи сигнала на срабатывание до поступления газа в приемник (около 13 мс), и отработана конструкция ГГЗ, обеспечивающая высокую скорость выделения газа (массовый расход).

Испытания макета ИМ АЗ с ГГ-4 не проводились, расчеты показали, что скорость подвижной части при перемещении из одного

крайнего положения в другое в два раза выше, чем при срабатывании ГГ-3. При этом тормозное устройство макета (пневматический демпфер) не обеспечивает эффективного гашения кинетической энергии.

В заключение следует отметить, что создание ИМ АЗ с автономным источником энергии на основе пиротехнического ГГ для каждого конкретного случая не вызывает существенных трудностей, так как одной из основных задач разработки ГГ является обеспечение подачи газа с заданными расходом и давлением [21].

Заключение

Рассмотрен исполнительный механизм аварийной защиты ядерного реактора с автономным источником энергии на основе пиротехнического газогенератора. Описана конструкция газогенератора, предложен пиротехнический состав газогенерирующего заряда. Приведены результаты испытаний автономных источников энергии и экспериментальные данные по испытанию макета исполнительного механизма аварийной защиты, оснащенного газогенератором. Предложен алгоритм и расчетная модель, позволяющая определять скорость выделения рабочего газа (массовый расход), производимый газогенератором. Проведены расчеты макета исполнительного меха-

низма аварийной защиты с пиротехническим газогенератором. Показано хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных. Расчетную модель рекомендуется использовать на стадии проектирования пневматического привода для определения его оптимальной конструкции и динамических характеристик.

Список литературы

1. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Масленок Б. А. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов. – М.: Энергоиздат, 1987.

2. Ионайтис Р. Р., Шведов Н. Л. Прямодействующая аварийная защита // Атомная техника за рубежом, 1988, вып. 1, с. 10–16.

3. Кувшинов М. И., Смирнов И. Г., Воинов А. М., Довбыш Л. Е. Прямодействующая быстрая аварийная защита реактора с датчиком нейтронов на основе ядерно-оптического преобразователя // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, вып. 2/3, с. 117–119.

4. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

5. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В. и др. Стенд критических сборок ИКАР-С. Результаты физического пуска // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2007, вып. 2, с. 29–33.

6. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 1.

7. Бойко В. И., Кошелев Ф. П. Ядерные технологии в различных сферах деятельности человека. – Томск: ТПУ, 2006.

8. Бассард Р., Делауэр Р. Ядерные двигатели для самолетов и ракет. – М.: Изд-во МО, 1967.

9. Демянко Ю. Г., Конюхов Г. В., Коротева А. С. и др. Ядерные ракетные двигатели. – М.: Норма-Информ, 2001.

10. Пат. РФ № 2086010, МПК⁶ G21C7/12. Устройство аварийной защиты ядерного реактора / Э. С. Степанов, В. А. Леонов, Ю. И. Краснощеков, В. В. Воскобойников // Изобретения. 1997, № 21.

11. Шидловский А. А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973.

12. Fair H. D., Walker R. F. Energetic Materials. – New York: Plenum Press, 1977. V. 1. P. 214.

13. Алешин В. В., Широкова Г. Н. Пиротехнические составы для получения азота на основе азидов // Химическая физика, 1999, Т. 18, № 2, с. 72–79.

14. Lechoslaw A. M. Azide and doped iron oxide gas generating composition: Patent 4229290 USA, 1981, ru.espacenet.com.

15. Pietz J. F. Method and composition for generating nitrogen gas: Patent 3895098 USA, 1975, ru.espacenet.com.

16. Knowlton G. D., Pietz J. F. Method and compositions for generating nitrogen gas: Patent 4604151 USA, 1986, ru.espacenet.com.

17. Исмаилов М. Б., Леонов А. Н. Исследование стадийности взаимодействия натрия с оксидами железа в волне горения // Физика горения и взрыва, 1990, № 3.

18. Пат. RU 2234364 C2, 7 В 01 J 7/00, С 06 D 5/06. Газогенератор / Е. В. Леваков, В. Н. Решетников, Н. А. Костюк, Д. А. Горькаев // Изобретения. Полезные модели. 2004, № 23.

19. Никитин И. А. Особенности конструкции и расчета пневматического исполнительного механизма импульсного ядерного реактора // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 4, с. 124–134.

20. Пат. RU 2306306 C2, МПК C06B 33/12. Состав для изготовления пиротехнического эластичного материала (варианты) / А. Ю. Постников, В. Е. Леваков, А. А. Татынов // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 26.

21. Вспомогательные системы ракетно-космической техники / Под ред. И. В. Тишунина. – М.: Издательство «МИР», 1970.

Контактная информация –

Никитин Игорь Александрович,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2017.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 4, с. 101–111.