

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ПОЛУЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ С ПОКАЗАТЕЛЕМ СТЕПЕНИ В ЗАКОНЕ ГОРЕНИЯ БОЛЬШЕ ЕДИНИЦЫ

С. М. Иванов, Н. А. Цуканов

Госпредприятие «Московский институт теплотехники», 129273 Москва

Рассмотрена задача регулирования давления в полузамкнутом объеме за счет изменения площади критического сечения газоотводящего канала при горении твердых ракетных топлив в условиях изменения давления, скорости горения и свободного объема в широких пределах (не менее чем на порядок). Для системы автоматического регулирования давления выбран алгоритм регулирования и сформулированы условия частичной параметрической инвариантности по отношению к изменяющимся динамическим свойствам объекта регулирования. Приведены результаты экспериментальной отработки системы регулирования для твердых ракетных топлив с показателем степени в законе горения больше единицы. Рассмотрены причины возникновения существенно нестационарных режимов работы этой системы, и предложена упрощенная модель, аппроксимирующая явления нестационарного горения твердого ракетного топлива. Проведена идентификация модели, и приведены результаты математического моделирования. Даны рекомендации по регулированию давления в нестационарных режимах работы.

В энергетических установках ракетно-космической техники в качестве источника энергии широко применяются газогенераторы на твердом ракетном топливе (ГГТТ), благодаря своей способности выделять в течение короткого времени максимальную энергию на единицу массы или объема по сравнению с любыми неядерными источниками энергии. К областям их использования относятся [1–4]: источники питания сервоприводов, системы подачи топлива жидкостных и гибридных ракетных двигателей; системы старта и подготовки старта ракет; стендовые газогенераторы для исследования и отработки новых топлив, теплозащитных материалов и конструкций; системы управления вектором тяги ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) и реактивной стабилизации; гироскопические устройства.

Наиболее существенными недостатками нерегулируемых ГГТТ являются случайные и систематические разбросы давления в камере, расхода продуктов сгорания и времени работы. Эти недостатки в значительной степени устраняются при использовании многорежимных регулируемых ГГТТ. Возрастание требований к баллистическим характеристикам ракет и возникновение в этой связи задачи оптимального распределения импульса тяги двигателя по времени полета ракеты привели к необходимости разработки многорежимных РДТТ, регу-

лирование которых осуществляется аналогично регулированию ГГТТ. В связи с этим большое внимание уделяется вопросам регулирования давления в полузамкнутом объеме (камере сгорания) [1, 2, 5–8]. Задачи регулирования расхода ГГТТ или модуля тяги РДТТ технически можно свести к задаче регулирования давления. Среди реализуемых на практике физических принципов регулирования достаточно часто [1, 2, 5–7] используется изменение площади критического сечения сопла или канала, отводящего продукты сгорания твердого ракетного топлива (ТРТ).

Для регулируемых ГГТТ характерно применение ТРТ с сильной зависимостью скорости горения от давления, что обеспечивает более широкий диапазон регулирования расхода топлива в фиксированном диапазоне изменения давления в камере сгорания [2, 5]. Зависимость скорости горения ТРТ  $u$  от давления  $p$  определяется коэффициентом

$$\nu = \frac{\partial \ln u}{\partial \ln p} = \frac{p \partial u}{u \partial p} \cong \frac{p \Delta u}{u \Delta p}.$$

Обычно в малом интервале изменения давления коэффициент  $\nu$  считают постоянным, и в этом случае зависимость  $u(p)$  выражают степенным законом

$$u = \beta p^\nu, \quad (1)$$

где  $\beta$  — константа, зависящая главным образом от начальной температуры заряда ТРТ. Однако в широком диапазоне давлений коэффициент  $\nu$  — переменная величина [9, 10].

Известно [11], что при использовании ТРТ с  $\nu > 1$  невозможно обеспечить устойчивое горение в полузамкнутом объеме с нерегулируемым критическим сечением газоотводящего канала. Для регулируемых ГГТТ применение таких топлив существенно сужает области устойчивости и предъявляет жесткие дополнительные требования к системе регулирования давления. Высокого значения показателя степени  $\nu$  (в том числе,  $\nu > 1$ ) достигают в случае применения смесевых ТРТ на основе перхлората аммония (ПХА) [12]. Допустимое максимальное значение давления в камере сгорания ГГТТ не превосходит, как правило, 15 МПа и определяется в основном требованиями к прочности конструкции.

Многорегимный ГГТТ — нелинейный существенно нестационарный динамический объект, для регулирования которого необходимы алгоритмы, обеспечивающие устойчивость и требуемую точность системы регулирования давления при изменении параметров газогенератора (особенно давления в камере сгорания и ее свободного объема) в широких пределах (не менее чем на порядок). При проектировании системы регулирования многорегимного ГГТТ обычно стремятся добиться таких условий его работы, чтобы динамика процессов изменения давления хорошо соответствовала квазистационарной математической модели, которая на основе законов сохранения в полузамкнутом объеме массы и энергии продуктов сгорания ТРТ описывает изменение осредненных по объему значений давления и температуры газов. Квазистационарная модель [13] удовлетворительно описывает процессы в камере сгорания ГГТТ, протекающие со скоростью изменения давления до 2 МПа/с. Такая скорость достигается выбором алгоритмов регулирования и вида управляющих сигналов.

В системе регулирования давления ГГТТ часто [6] применяется пропорционально-интегральный закон регулирования

$$U_c = a_0 \Delta p + a_1 \int_0^{t_c} \Delta p dt, \quad (2)$$

где  $\Delta p = p - p_{pr}$  — ошибка регулирования давления;  $p_{pr}$  и  $p$  — заданное и действительное

значения давления в камере сгорания ГГТТ;  $a_0, a_1$  — коэффициенты закона регулирования;  $U_c$  — управляющий сигнал на привод системы в момент времени  $t_c$ .

Выбор значений коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  может быть проведен с помощью частотных методов [14], для постоянных значений параметров ГГТТ, соответствующих стационарному режиму работы при установившихся процессах газообразования и истечения. Этому случаю соответствует передаточная функция ГГТТ [1, 2, 15]:

$$W_{\sigma p}(s) = -\frac{k_{gg}}{\tau_{gg}s + 1}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} k_{gg} &= \varphi B(k) p_0 / S \rho \sqrt{R \chi T_p} \left[ \frac{u_0}{p_0} - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0 \right] = \\ &= A p_0 / S \rho \left[ \frac{u_0}{p_0} - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0 \right]; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\tau_{gg} = V_0 / S \rho R \chi T_p \left[ \frac{u_0}{p_0} - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0 \right];$$

$$A = \varphi B(k) / \sqrt{R \chi T_p};$$

$$B(k) = \sqrt{2k/(k-1)} (\beta_k^{2/k} - \beta_k^{(k+1)/k});$$

$$\beta_k = (2/(k+1))^{k/(k-1)};$$

$\rho, R, k$  — плотность, универсальная газовая постоянная и показатель адиабаты продуктов сгорания ТРТ;  $\varphi$  — коэффициент расхода;  $p_0, V_0$  — стационарные (равновесные) значения давления и свободного объема;  $S$  — площадь поверхности горения ТРТ;  $T_p$  — изобарная равновесная температура;  $\chi$  — коэффициент теплотеря;  $u_0, \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0$  — скорость горения ТРТ и ее частная производная по давлению, соответствующие стационарному давлению  $p_0$ ;  $s$  — оператор Лапласа.

Передаточная функция управляющего устройства для закона регулирования (2) имеет вид

$$W_c(s) = a_1 \frac{(a_0/a_1)s + 1}{s}. \quad (5)$$

Анализируя произведение передаточных функций (3) и (5), приходим к выводу, что для обеспечения стабильности динамических свойств системы регулирования давления при изменении параметров ГГТТ, достаточно выполнить следующие условия:

$$\frac{a_0}{a_1} = \tau_{gg} = V_0 / S\rho R\chi T_p \left[ \frac{u_0}{p_0} - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0 \right], \quad (6)$$

$$k_0 = k_d k_r k_s k_{gg} a_1 =$$

$$= k_d k_r k_s k_{gg} a_1 A p_0 / S\rho \left[ \frac{u_0}{p_0} - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0 \right] = \text{const}, \quad (7)$$

где  $k_d$ ,  $k_r$ ,  $k_s$  — соответственно коэффициенты передачи привода, регулирующего органа ГГТТ и датчика давления;  $k_0$  — общий (круговой) коэффициент усиления контура регулирования давления.

При выполнении этих условий последовательное соединение управляющего устройства и ГГТТ эквивалентно интегрирующему звену с постоянным коэффициентом передачи, что обеспечивает наклон логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАХЧ)  $-20$  дБ на декаду в окрестности частоты среза (точки пересечения оси абсцисс этой характеристикой) и, следовательно, монотонный апериодический характер переходных процессов в системе регулирования давления. (Изменение частоты в 10 раз называют изменением на декаду.) Выбором коэффициента  $k_0$  достигается требуемая частота среза  $\omega_1$ , которая связана с длительностью переходного процесса  $t_p$  известным соотношением  $\omega_1 \approx 2\pi/t_p$  [14].

Следовательно, выбирая параметры закона регулирования в соответствии с соотношениями (6) и (7), можно обеспечить устойчивость и требуемое качество процессов регулирования давления для известных значений параметров ГГТТ. Назовем соотношения (6) и (7) условиями параметрической инвариантности системы регулирования давления, так как при их выполнении в любой момент работы системы достигается независимость ее динамических свойств от значений параметров ГГТТ. Условия параметрической инвариантности выполняются при изменении коэффициентов закона регулирования по соотношениям

$$a_0 = a_0^* \frac{V_0}{p_0}, \quad a_1 = a_1^* \left[ \frac{u_0}{p_0} - \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_0 \right] / p_0, \quad (8)$$

где  $a_0^*$ ,  $a_1^*$  — постоянные коэффициенты, определяемые выражениями

$$a_0^* = \frac{1}{A k_d k_r k_s R \chi T_p} k_0, \quad a_1^* = \frac{S\rho}{A k_d k_r k_s} k_0.$$

Для реализации условий параметрической инвариантности в процессе работы системы регулирования давления необходима априорная информация о параметрах закона горения ТРТ  $u(p)$  и  $\partial u/\partial p$  и текущая информация о значении свободного объема камеры сгорания  $V$  и давления  $p$  в ней.

Свободный объем камеры сгорания ГГТТ вычисляется из выражения

$$\frac{dV}{dt} = Su. \quad (9)$$

С достаточной для практических целей точностью его можно определять по приближенным формулам, так как в регулируемых ГГТТ обычно используются заряды торцевого горения. Когда заранее известна программа изменения управляющего воздействия системы регулирования давления на всё время работы ГГТТ, можно, например, методом моделирования подобрать такое значение коэффициента  $C_V^*$ , которое при вычислении свободного объема по формуле

$$V = V_i + C_V^* \int_0^{t_c} p dt \quad (10)$$

обеспечит точность не хуже 10%. Здесь  $V_i$  — начальное значение свободного объема. Вычисление же постоянной времени  $\tau_{gg}$  в процессе работы ГГТТ с такой точностью может привести к изменению запасов устойчивости по амплитуде на  $2 \div 3$  дБ и по фазе на  $3 \div 5^\circ$ , что практически не окажет заметного влияния на динамические свойства системы регулирования.

Описанный алгоритм регулирования давления обеспечивает параметрическую инвариантность и требуемое качество переходных процессов в системе для расчетных режимов и параметров ГГТТ. При отклонении параметров и режимов работы ГГТТ от расчетных требуются дополнительные меры для сохранения качества процессов регулирования.

Для многорежимных ГГТТ характерной программой изменения давления в камере сгорания являются чередующиеся участки стабилизации заданного уровня и участки переключения стабилизируемых уровней. Наиболее простой формой управляющего сигнала

в этом случае является ступенчатая функция. Из теории автоматического регулирования [14] известно, что ступенчатый сигнал вызывает наибольшее перерегулирование и максимальные динамические ошибки. А к системам регулирования давления ГГТТ, особенно бортовым, предъявляются жесткие требования по величине перерегулирования (обычно не более 10%). Это связано с тем, что повышение допустимого предельного значения давления требует усиления конструкции и вызывает увеличение массы ГГТТ. Экспериментальные исследования показывают, что при отработке системой регулирования входных воздействий  $p_{pr}$ , скорость изменения которых превышает 2 МПа/с, ГГТТ как объект регулирования описывается квазистационарной математической моделью с большой (часто недопустимой) погрешностью. Снизить перерегулирование можно за счет изменения формы управляющего сигнала, выбрав кусочно-линейную функцию вместо ступенчатой [7]. Сигнал такой формы вызывает более плавные переходные процессы и способствует заметному уменьшению перерегулирования, практически не увеличивая при этом длительности переходного процесса.

Величина перерегулирования определяется в основном установившимся значением ошибки регулирования на участке линейно изменяющегося входного сигнала. Величину этой ошибки можно снизить, уменьшая рассогласование  $\Delta p$  за счет формирования сигнала регулирования давления по разомкнутой схеме, который рассчитывается для стационарного режима из закона сохранения массы газов в камере сгорания [13]:

$$S\rho u = A\rho\sigma, \quad (11)$$

где  $\sigma = \sigma(\delta)$  — площадь критического сечения канала, отводящего газы из камеры сгорания,  $\delta$  — координата положения регулирующего органа. В этом случае существует обратная функция  $\delta = \delta(\sigma)$ , позволяющая для известного требуемого значения площади критического сечения  $\sigma_0$  рассчитать соответствующее значение положения регулирующего органа  $\delta_0$ . Таким образом, для каждого заданного значения давления  $p_{pr}$  по соотношению (11) можно рассчитать значение

$$\sigma_0 = \frac{S\rho}{A} \frac{u(p_{pr})}{p_{pr}} \quad (12)$$

и, соответственно, сигнал регулирования давления по разомкнутой схеме:

$$U_2 = U_2^* \delta(\sigma_0), \quad (13)$$

где  $U_2^* = 1/k_d = \text{const}$ .

Закон регулирования (2) с учетом использования сигнала регулирования давления по разомкнутой схеме принимает вид

$$U_c = a_0 \Delta p + a_1 \int_0^{t_c} \Delta p dt + U_2. \quad (14)$$

Закон регулирования (14) обеспечивает полную компенсацию установившейся ошибки регулирования на участке линейного изменения входного управляющего сигнала только для расчетных параметров ГГТТ. При отклонении фактических значений комплекса параметров ГГТТ, определяющих газоприход, от расчетных ошибка системы регулирования давления полностью «обнуляться» не будет. Для повышения точности регулирования в таких условиях в закон регулирования на участке перехода с одного уровня стабилизации давления на другой можно ввести сигнал, пропорциональный двойному интегралу от ошибки  $\Delta p$ .

Для формирования текущих значений временных коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  по соотношениям (8) можно использовать как текущее ( $p$ ), так и заданное ( $p_{pr}$ ) значения давления. Использование текущего значения давления приводит к возникновению в системе регулирования давления дополнительных замкнутых контуров с обратной связью по давлению, что влияет на ее устойчивость, в то время как использование значения  $p_{pr}$  вызывает только появление дополнительного входного сигнала, не влияющего на качество регулирования.

Для многорежимных ГГТТ достаточно часто программа изменения во времени заданного значения давления  $p_{pr}$  известна заранее на все время планируемой работы. Поэтому при реализации рассмотренных алгоритмов регулирования удобно, используя формулы (8), (10), (12), (13) и расчетный стационарный закон горения ТРТ  $u(p)$ , определить программы изменения во времени коэффициентов алгоритма регулирования  $a_0$ ,  $a_1$  и сигнала  $U_2$  и во время работы ГГТТ изменять их по этим программам. На рис. 1 представлена функциональная схема параметрически инвариантной системы регулирования давления, обеспечивающая упрощенную практическую реализацию рассмотренного алгоритма регулирования. На рис. 2 приведены данные экспериментальной

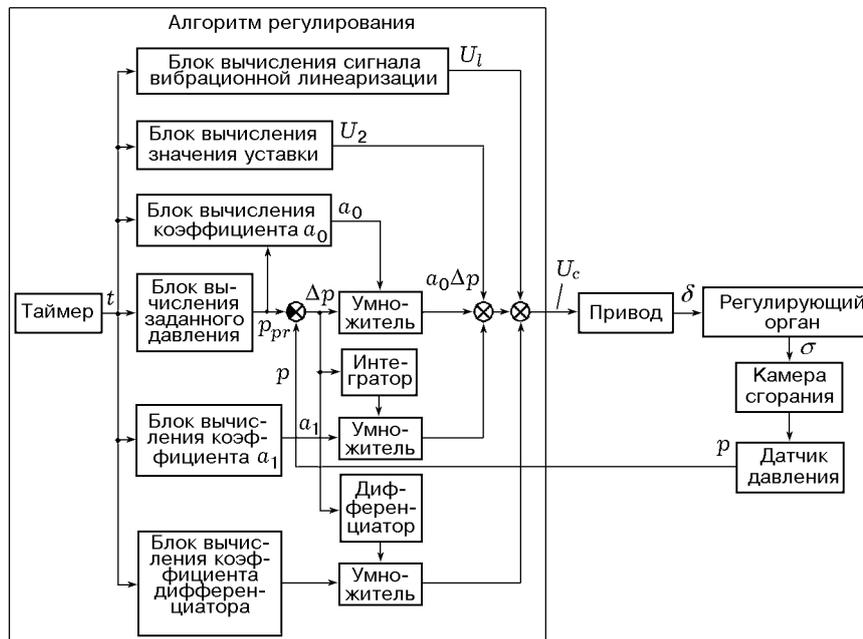


Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования давления

отработки алгоритма регулирования на огневых стендовых испытаниях ГТТ, снаряженного зарядом смесового ТРТ на основе ПХА, для которого зависимость  $\nu(p)$  показана на рис. 3.

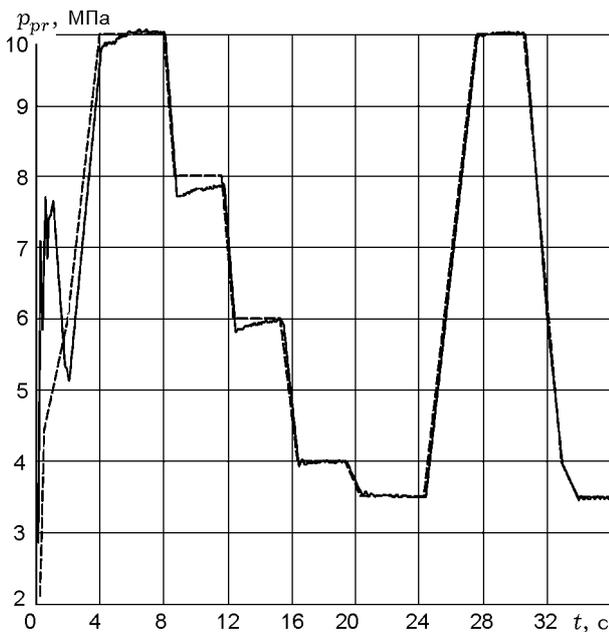


Рис. 2. Экспериментальный процесс изменения давления:

штриховая линия — заданный закон изменения давления, сплошная — результаты огневых стендовых испытаний

На рис. 2 штриховой линией показано изменение заданного значения давления  $p_{pr}(t)$ , а сплошной линией — процесс в камере сгорания во время огневых стендовых испытаний, зафиксированный датчиком давления. Приведенные результаты доказывают эффективность разработанного алгоритма регулирования при отработке типовой программы изменения давления в камере ГТТ.

На рис. 4 показаны расчетные логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) системы регулирования давления и камеры сгорания ГТТ, соответствующие двум уровням

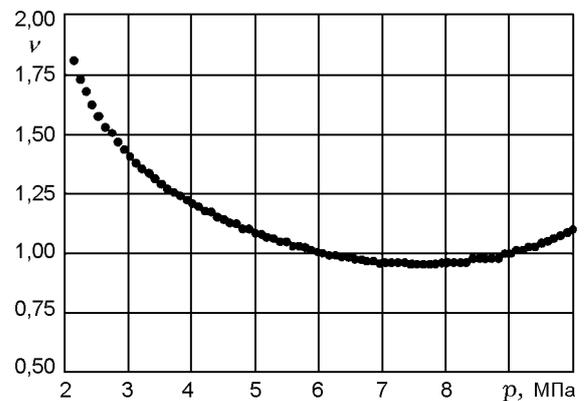


Рис. 3. Расчетная зависимость коэффициента  $\nu$  от давления

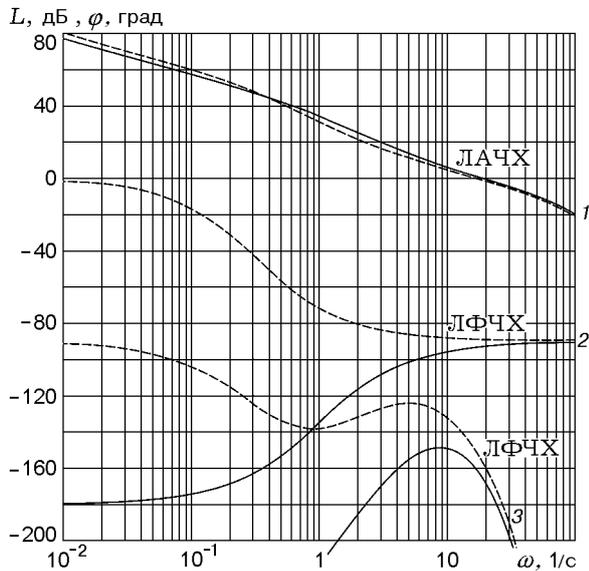


Рис. 4. Логарифмические частотные характеристики системы регулирования (1, 3) и камеры сгорания ГГТТ (2):

сплошные линии —  $p = 4$  МПа,  $\nu > 1$ , штриховые —  $p = 8$  МПа,  $\nu < 1$

стабилизируемого давления для приведенного на рис. 2 экспериментального процесса:  $p = 4$  МПа,  $\nu > 1$  (см. рис. 3) и  $p = 8$  МПа ( $\nu < 1$ ). При  $\nu < 1$  коэффициенты передаточной функции (3)  $k_{gg}$  и  $\tau_{gg}$  принимают положительные значения, а при  $\nu > 1$  — отрицательные, что приводит к изменению на величину  $-180^\circ$  логарифмической фазово-частотной характеристики (ЛФЧХ)  $\varphi(\omega)$  камеры сгорания в области низких частот (неустойчивый объект регулирования) и вызывает появление нижней границы области устойчивости системы регулирования давления по круговому коэффициенту усиления. Как известно [14], система регулирования будет устойчивой, когда ее частота среза лежит в области частот, для которой  $\varphi(\omega) > -180^\circ$ . Из рис. 4 видно, что такая область для ТРТ с  $\nu > 1$  существенно меньше, и в этом случае невозможно обеспечить устойчивую работу системы с постоянными параметрами алгоритма регулирования при изменении давления и свободного объема камеры сгорания в рабочем диапазоне.

В реальной замкнутой системе регулирования давления, несмотря на рассмотренные выше меры повышения качества регулирования, возникают такие динамические режимы работы, которые нельзя описать квазистационарной моделью с приемлемой точностью. Эти режимы характеризуются скачкообразным изменением сигналов в тракте замкнутого контура регулирования давления и возникают из-за наличия в тракте нелинейностей типа «зона нечувствительности» или «люфт» при использовании регуляторов или исполнительных устройств дискретного типа, а также при воздействии на систему регулирования больших внешних управляющих или возмущающих воздействий, по форме близких к ступенчатым. Эти воздействия могут подаваться на регулирующие органы системы регулирования давления, если те одновременно являются регулируемыми органами другой системы управления, для которой система регулирования давления является внутренним контуром регулирования. Такой внешний контур регулирования при использовании ГГТТ на объектах ракетно-космической техники могут образовывать, например, система управления положением летательного аппарата в пространстве, система регулирования пространственной координаты положения контейнера с ракетой при его подъеме в стартовое положение или система управления вектором тяги двигателя [2–4].

Характерным примером функционирования системы регулирования давления в условиях больших возмущающих воздействий является ее работа на этапе воспламенения заряда и выхода на начальный уровень стабилизации давления.

Описанные динамические режимы работы ГГТТ связаны с существенно нестационарным горением ТРТ. Скорость такого горения обычно принято рассматривать в отклонениях от скорости стационарного горения как при использовании линейных моделей, так и при анализе экспериментальных данных. Линеаризация задачи нестационарного горения ТРТ в соответствии с феноменологической теорией Зельдовича — Новожилова [1, 16] с последующим применением преобразования Лапласа приводит к передаточным функциям  $W_{pu}(s)$ , связывающим в отклонениях изменение скорости нестационарного горения с изменением давления [1, 2, 5, 17]. При наличии распределенных параметров в структурных моделях нестационарного горения ТРТ [16] соответствующие передаточные функции являются следствием решения линеаризованного уравнения нестационарной теплопроводности и содержат трансцендентные и иррациональные выражения. Избавившись от иррациональности в знаменате-

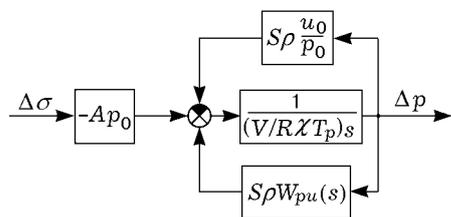


Рис. 5. Структурная схема камеры сгорания ГГТТ

ле, перейдем к более удобному виду передаточной функции [18, 19]:

$$W_{pu}(s) = \nu \frac{1 + c_1(\sqrt{s + 0,25} - 0,5) + c_2s}{1 + (2\lambda s + s^2)/\omega_0^2}, \quad (15)$$

где  $\nu, c_1, c_2, \lambda, \omega_0$  — параметры, определяемые по экспериментальным данным, причем  $\nu$  определяется в условиях стационарного горения.

Структурная схема камеры сгорания представлена на рис. 5. Выражение ее передаточной функции, описывающей изменение давления при изменении площади критического сечения для случая квазистационарной модели (при  $W_{pu}(s) = (\partial u/\partial p)_0$ , имеет вид (3). ЛЧХ камеры сгорания, построенные с использованием данных, приведенных в работе [18] для баллистического топлива, и структурной схемы рис. 5, представлены на рис. 6. Здесь показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ для квазистационарной и

нестационарной моделей ГГТТ. При этом ЛЧХ камеры сгорания преобразуются от привычного для квазистационарной модели ГГТТ вида аperiodического звена (штриховые линии) к более сложному виду (сплошные линии). Причем ЛФЧХ приобретает характерные дополнительные фазовые сдвиги, величина которых, как следует из анализа данных работы [18], зависит от значения равновесного давления. Такое изменение ЛЧХ может сильно повлиять на синтез алгоритма регулирования, особенно если наиболее существенное изменение ЛФЧХ будет лежать в окрестности частоты среза, а ЛАЧХ — в окрестности частоты нулевой фазы системы регулирования давления (значения частоты, при котором  $\varphi(\omega) = -180^\circ$ ).

Для удобства практического применения при синтезе алгоритмов системы регулирования давления и идентификации нестационарной модели ГГТТ по результатам огневых стендовых испытаний передаточные функции камеры сгорания можно аппроксимировать последовательным соединением типовых линейных динамических звеньев. На рис. 6 штрихпунктирными линиями приведены разности ЛЧХ нестационарной и квазистационарной моделей ГГТТ —  $L_p(\omega)$  и  $\varphi_p(\omega)$ . Анализ этих кривых позволяет, используя метод желаемых частотных характеристик [14], предложить упрощенную модель нестационарных процессов в камере сгорания в виде последовательного соединения квазистационарной модели и аппроксимирующего нестационарные явления звена с дробно-рациональной передаточной функцией третьего порядка вида

$$W_a(s) = \frac{(k_1\tau_a)^2s^2 + 2k_1\tau_a\xi_1s + 1}{\tau_a^2s^2 + 2\tau_a\xi_2s + 1} \frac{k_2\tau_as + 1}{k_1^2k_2\tau_as + 1}, \quad (16)$$

где  $\tau_a, \xi_1, \xi_2, k_1, k_2$  — параметры аппроксимации, определяемые по экспериментальным данным. Возможный вариант ЛЧХ такого аппроксимирующего звена приведен на рис. 6 пунктирной линией.

Структура аппроксимирующей передаточной функции (16) выбрана таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточно хорошее совпадение с аппроксимируемой разностью ЛЧХ нестационарной и квазистационарной моделей, а с другой стороны, свести к минимуму количество идентифицируемых по экспериментальным данным параметров упрощенной нестационарной модели.

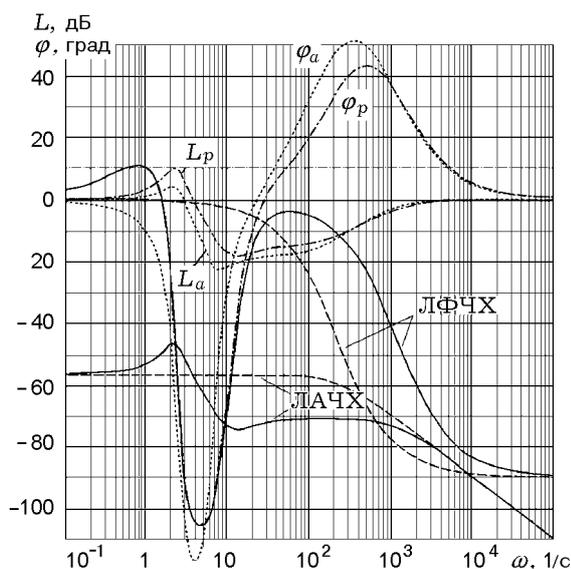


Рис. 6. Логарифмические частотные характеристики квазистационарной (штриховые линии) и нестационарной (сплошные) моделей ГГТТ

Проведем качественный анализ влияния значений параметров аппроксимирующей передаточной функции (16) на характер ЛЧХ. Выбором значения параметра  $\tau_a$  достигается начальная привязка ЛЧХ по частоте: значение  $\omega = 1/\tau_a$ , соответствует примерно максимуму аппроксимирующей ЛАЧХ  $L_a(\omega)$  и середине участка начального спада аппроксимирующей ЛФЧХ  $\varphi_a(\omega)$ . Параметр  $k_1$  определяет протяженность участка спада  $L_a(\omega)$  с наклоном около  $-40$  дБ на декаду, ширину участка отрицательного выброса  $\varphi_a(\omega)$  и величину максимума положительного выброса  $\varphi_a(\omega)$ , а параметр  $k_2$  — положение начала участка подъема  $L_a(\omega)$  с наклоном  $\approx 20$  дБ на декаду и положение максимума положительного выброса  $\varphi_a(\omega)$  в области высоких частот. Параметр  $\xi_2$  определяет скорость спада  $\varphi_a(\omega)$  в области низких частот, величину максимума  $L_a(\omega)$  и ширину участка спада  $\varphi_a(\omega)$ , а параметр  $\xi_1$  — скорость подъема  $\varphi_a(\omega)$ , величину минимума  $L_a(\omega)$  и ширину участка  $\varphi_a(\omega)$  в области средних частот. Параметры приведенного на рис. 6 варианта аппроксимирующей ЛЧХ не являются оптимальными, а сами кривые лишь иллюстрируют возможности передаточной функции вида (16) при аппроксимации ЛЧХ нестационарной модели ГГТТ.

Постановка и проведение экспериментов, подобных описанным в работе [18], для идентификации ЛЧХ нестационарной скорости горения ТРТ вида (15) по результатам огневых стендовых испытаний предполагают прямые измерения давления и скорости горения во время эксперимента. Это сложная техническая задача, требующая значительных материальных и временных затрат, а также специальной аппаратуры и необходимых приборов. Предлагаемая же упрощенная модель нестационарных процессов позволяет использовать для ее идентификации результаты плановых огневых стендовых испытаний по отработке ГГТТ. Это становится возможным, так как предложенная аппроксимация передаточной функции допускает простой переход с использованием обратного преобразования Лапласа от модели, описывающей поведение ГГТТ в частотной области (логарифмические частотные характеристики), к модели, описывающей его поведение во временной области (обыкновенные дифференциальные уравнения). Удобство использования такой модели при синтезе алгоритмов регулирования и ее идентификации по результа-

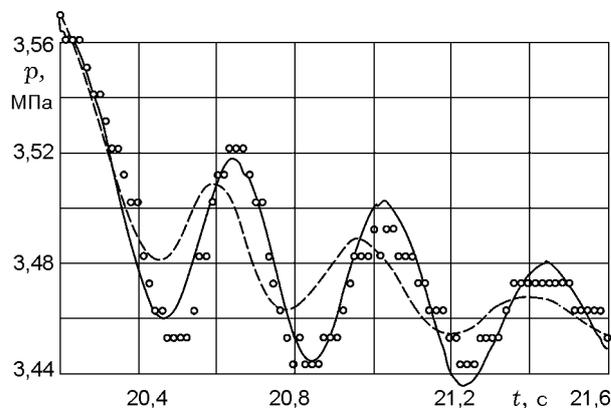


Рис. 7. Переходные процессы регулирования давления:

штриховая линия — квазистационарная модель, сплошная — упрощенная нестационарная модель

там огневых стендовых испытаний очевидно, так как результаты таких плановых испытаний обычно представляют в виде процессов изменения основных рабочих параметров системы регулирования давления (например, давления и хода штока рулевой машины) во времени, а синтез алгоритмов регулирования и анализ устойчивости системы регулирования удобно проводить методом ЛЧХ.

Анализ ЛЧХ камеры сгорания, построенных по данным работы [18] для разных значений давления, показал, что скорость подъема ЛФЧХ, ширина участка ее подъема, положение максимума положительного выброса ЛФЧХ, а также характер минимума ЛАЧХ слабо зависят от значения равновесного давления в камере сгорания, а значит, параметры  $\xi_1$  и  $k_2$  могут быть выбраны на этапе предварительного анализа ЛЧХ разомкнутой системы регулирования давления, что понизит порядок задачи идентификации параметров модели по данным огневых стендовых испытаний.

Задачу идентификации параметров передаточной функции (16) по результатам огневых стендовых испытаний можно решить путем оптимизации специальным образом построенного функционала, обеспечивающего корректность постановки задачи идентификации [20, 21]. На рис. 7 представлены экспериментальные и идентифицированные по результатам испытаний переходные процессы регулирования давления (выбран участок процесса, изображенный на рис. 2, на котором система

регулирования давления работает в малых отклонениях). Изменение давления во время стендовых испытаний показано в виде отдельных отсчетов из-за дискретизации экспериментального сигнала по уровню и времени. Идентифицированный процесс «на выходе» квазистационарной модели показан штриховой линией, а «на выходе» упрощенной нестационарной модели — сплошной линией. В качестве входного сигнала ГГТТ при идентификации модели использован процесс изменения эффективной площади регулируемого критического сечения, рассчитанный методом обратной задачи внутренней баллистики [13], что исключает влияние на результат фазовых сдвигов в контуре регулирования давления из-за нелинейностей кинематических звеньев.

На рис. 7 видны существенные фазовые сдвиги между экспериментальным и моделируемым («выход» квазистационарной модели) процессами. Видно, что предложенная упрощенная нестационарная модель эффективно устраняет это фазовое несоответствие. В данном примере получены следующие значения параметров передаточной функции (16):  $\tau_a = 0,061$  с,  $k_1 = 0,212$ ,  $\xi_2 = 0,223$ . Значения  $k_2 = 0,02$  и  $\xi_1 = 2,0$  выбраны предварительно.

На начальном этапе работы ГГТТ на систему регулирования давления действуют два больших возмущающих воздействия разного знака, которые могут привести к аварийным последствиям, если система не обеспечит их отработку, сохранив изменение давления в допустимых пределах. Первое возмущающее воздействие возникает в момент запуска воспламенителя и поджига основного заряда и может, как следует из экспериментальных данных для рассматриваемого типа ТРТ, вызывать нарастание давления в камере сгорания со скоростью до 100 МПа/с. Если регулятор не обеспечит эффективного снижения скорости изменения давления, конструкция может разрушиться. Характерное большое возмущающее воздействие на систему регулирования давления возникает также в момент окончания работы воспламенителя, что вызывает значительный отрицательный прирост скорости изменения давления и при определенных условиях может способствовать погасанию основного заряда. Согласно феноменологической теории нестационарного горения условия погасания ТРТ при спаде давления определяются в основном начальным уровнем давления и

скоростью уменьшения давления [22]: чем ниже начальный уровень давления и выше скорость уменьшения давления, тем легче погасить заряд.

Таким образом, начальный этап работы ГГТТ соответствует существенно нестационарному процессу изменения давления. Результаты математического моделирования и их сопоставление с полученными нами экспериментальными данными и данными, приведенными в работе [18], показали, что параметры  $\tau_a$  и  $\xi_2$ , определяющие свойства нестационарной модели ГГТТ в области низких и средних частот (около частоты среза системы регулирования давления и левее ее), существенно зависят от уровня стабилизируемого давления. Эти же параметры аппроксимирующей передаточной функции главным образом влияют на синтез алгоритмов регулирования и анализ устойчивости системы регулирования давления при учете явлений нестационарного горения.

Следовательно, для использования упрощенной модели с передаточной функцией вида (16) при исследовании процессов изменения давления в камере сгорания в широких пределах необходимо учитывать изменение динамических свойств нестационарной модели ГГТТ. Для выявления зависимости параметров  $\tau_a$  и  $\xi_2$  от давления  $p$  была проведена их идентификация по экспериментальным процессам стабилизации давления на нескольких уровнях, полученные результаты были использованы для выбора характера функциональных зависимостей  $\tau_a(p)$  и  $\xi_2(p)$ . В результате многократного моделирования были выбраны следующие соотношения:

$$\tau_a = a_\tau \exp(-b_\tau(p - 0,1)) + c_\tau - d_\tau p,$$

$$\xi_2 = -a_\xi \exp(-b_\xi(p - 0,1)) + c_\xi + d_\xi p,$$

где  $a_\tau, b_\tau, c_\tau, d_\tau, a_\xi, b_\xi, c_\xi, d_\xi > 0$  — постоянные для данного заряда ТРТ коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным, размерность давления — МПа. При обработке данных рассмотренного выше эксперимента получены следующие значения коэффициентов:

$$a_\tau = 0,51 \text{ с}; \quad b_\tau = 1,5 \text{ МПа}^{-1}; \quad c_\tau = 0,05 \text{ с};$$

$$d_\tau = 0,0015 \text{ с/МПа}; \quad a_\xi = 0,4; \quad b_\xi = 0,7 \text{ МПа}^{-1};$$

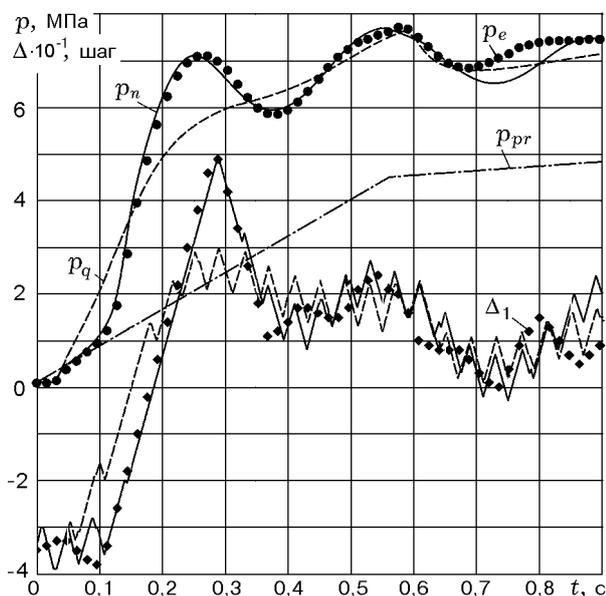


Рис. 8. Процессы регулирования давления в камере сгорания: экспериментальный и полученные по квазистационарной и нестационарной моделям

$$c_{\xi} = 0,4; \quad d_{\xi} = 0,00284 \text{ МПа}^{-1};$$

$$\xi_1 = 1,6; \quad k_1 = 0,21; \quad k_2 = 0,2.$$

Идентифицированной аппроксимирующей передаточной функции с переменными параметрами соответствуют результаты моделирования процесса изменения давления  $p_n(t)$  на начальном участке работы ГГТТ, приведенные на рис. 8. Там же показаны полученные во время огневых стендовых испытаний изменения давления в камере сгорания  $p_e(t)$  (кружки, регистрация экспериментальных процессов дискретная), изменения положения штока рулевой машины  $\Delta_1(t)$  (ромбы), а также изменения заданного значения давления  $p_{pr}(t)$  (штрихпунктирная линия).

В рассматриваемом примере огневых стендовых испытаний использовалась конструкция ГГТТ с несколькими регулируемы соплами, через которые истекают продукты сгорания ТРТ. Изменение положения штока рулевой машины первого регулирующего органа  $\Delta_1(t)$  для случая моделирования работы замкнутой системы регулирования давления с нестационарной моделью ГГТТ показано на рис. 8 сплошной линией. Этот процесс имеет пилообразный характер из-за использования (для компенсации влияния нелинейностей типа

«люфт» в кинематических передачах) вибрационной линеаризации, широко известной в практике реализации нелинейных систем автоматического регулирования. Линеаризующие колебания подавались на каждую пару регулирующих органов в противофазе, что обеспечивало неизменность суммарной площади критических сечений всех сопел и не вносило дополнительных возмущений в контур регулирования давления. На рис. 8 показаны также изменения давления  $p_q(t)$  в камере сгорания и соответствующие ему изменения положения штока рулевой машины (штриховая линия), полученные для случая моделирования работы замкнутой системы регулирования давления с квазистационарной моделью ГГТТ. Сравнение зависимостей  $p_q(t)$ ,  $p_n(t)$  с  $p_e(t)$  и соответствующих процессов изменения положения штока рулевой машины позволяет утверждать, что предложенная упрощенная модель лучше отражает реальный процесс изменения давления при нестационарном горении ТРТ, чем квазистационарная модель. Идентификация параметров модели ГГТТ проводилась для замкнутой системы регулирования давления, что позволило избежать некоторых ошибок, характерных для идентификации моделей «разомкнутого» объекта регулирования. Характер процессов изменения давления, полученных из нестационарной модели и в эксперименте, по отношению к процессу, воспроизводимому квазистационарной моделью, позволяет считать нестационарные процессы отклонением от квазистационарного режима горения ТРТ. Это подтверждает рациональность выбранной структуры модели и возможность аппроксимации явлений нестационарного горения дробно-рациональной передаточной функцией, описывающей поведение давления в нестационарном режиме в отклонениях от квазистационарного.

Следовательно, для обеспечения частичной параметрической инвариантности системы регулирования давления по отношению к режимам нестационарного горения ТРТ можно использовать фильтр с дробно-рациональной передаточной функцией, обратной (16), включаемый последовательно в контур регулирования давления. Применение такого фильтра должно обеспечить приближение экспериментальных процессов регулирования давления в камере сгорания к процессам, воспроизводимым квазистационарной моделью. Но эта гипотеза требует экспериментального подтверждения.

Обобщая изложенный в статье материал, отметим следующее.

Сформулированные условия параметрической инвариантности системы регулирования давления могут служить основой для синтеза алгоритмов регулирования давления в камере сгорания многорежимных ГГТТ независимо от области их применения и закона горения используемого ТРТ. Предложенные алгоритмы позволяют обеспечить частичную инвариантность свойств системы регулирования по отношению к изменяющимся во время работы параметрам ГГТТ, а также по отношению к нестационарным режимам работы. Опыт практической отработки системы регулирования давления ГГТТ, в том числе для ТРТ с показателем степени в законе горения больше единицы, позволяет сделать вывод об универсальности предложенных алгоритмов и рекомендовать их к применению на регулируемых многорежимных ГГТТ и РДТТ различного назначения. Особый интерес, по нашему мнению, представляет возможность создания экспериментальных установок по исследованию в широком диапазоне изменения давления законов горения таких ТРТ, для которых осуществление устойчивого горения при постоянном давлении без регулирования давления невозможно.

Предложенная упрощенная математическая модель нестационарных процессов регулирования давления в полузакнутом объеме, представляющая собой совокупность нелинейной квазистационарной модели газодинамических процессов в камере сгорания и дробно-рациональной передаточной функции с переменными параметрами, позволяет удовлетворительно описывать отклонения давления, возникающие вследствие явлений нестационарного горения ТРТ, от его значения, соответствующего квазистационарной модели. Рассмотренная аппроксимация нестационарных процессов допускает простой переход с использованием обратного преобразования Лапласа от модели, описывающей поведение ГГТТ в частотной области (ЛЧХ), к модели, описывающей его поведение во временной области (обыкновенные дифференциальные уравнения), что создает удобства для использования такой модели при синтезе алгоритмов регулирования и ее идентификации по результатам огневых стендовых испытаний, которые обычно представляют в виде процессов изменения рабочих параметров во времени, а синтез алгоритмов регу-

лирования и анализ устойчивости системы регулирования давления удобно проводить методом ЛЧХ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Абугов Д. И., Бобылев В. М.** Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива: Учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1987.
2. **Бобылев В. М.** Ракетный двигатель твердого топлива как средство управления движением ракет. М.: Машиностроение, 1992.
3. **Шишков А. А., Румянцев Б. В.** Газогенераторы ракетных систем. М.: Машиностроение, 1981.
4. **Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В.** Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. М.: Машиностроение, 1988.
5. **Присняков В. Ф.** Динамика ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1984.
6. **Петренко В. И., Попов В. Л., Русак А. М., Феофилактов В. И.** РДТТ с регулируемым модулем тяги. Миасс: Изд-во Гос. ракетного центра «КБ имени академика В. П. Макеева», 1994.
7. **Electronic Valve Control for Gas Generator Outflow.** US Pat. 5172547. 22.12.1992.
8. **Петренко В. И., Попов В. Л.** Регулируемый ракетный двигатель на твердом топливе с местным форсированием горения // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 102–106.
9. **Петрова Л. Б., Перегудова Т. В., Струнин В. А., Манелис Г. Б.** О методах расчета экспериментальной зависимости скорости горения от давления // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 36–39.
10. **Струнин В. А., Петухова Л. Б., Манелис Г. Б.** Закономерности изменения коэффициента давления для смесевых топлив // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 68–72.
11. **Григорьев А. И.** Твердые ракетные топлива. М.: Химия, 1969.
12. **Струнин В. А., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г., Манелис Г. Б.** Закономерности гетерогенного горения слоевой системы // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 25–32.
13. **Соркин Р. Е.** Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. М.: Наука, 1983.
14. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. 3-е изд. М.: Наука, 1975.
15. **Основы теории автоматического управления ракетными двигательными установками / А. И. Бабкин, С. И. Белов, Н. Б. Рутовский, Е. В. Соловьев.** 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986.

16. **Новожилов Б. В.** Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973.
17. **Бобылев В. М.** Об исследовании нестационарного горения пороха как замкнутой динамической системы // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 4. С. 454–464.
18. **Романов О. Я., Тархов В. С.** Динамические параметры массовой скорости горения конденсированного вещества // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 3–11.
19. **Романов О. Я., Тархов В. С.** Использование опытных динамических параметров в задачах нестационарного горения конденсированных веществ // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 5. С. 27–33.
20. **А. с. 1385122 СССР, МКИ G05B 13/02, 1988.** Система идентификации параметров многомерного нелинейного динамического объекта / Иванов С. М., Перфильев Л. М., Цуканов Н. А., Шустов И. Н.
21. **Цирлин А. М., Балакирев В. С., Дудников Е. Г.** Вариационные методы оптимизации управляемых объектов. М.: Энергия, 1976.
22. **Ерохин В. Т., Федоров Ю. И., Синдюков А. В.** Нестационарные процессы при гашении комбинированным способом конденсированных систем в полужамкнутом объеме // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 2. С. 208–213.

*Поступила в редакцию 12/XI 1998 г.,  
в окончательном варианте — 19/I 1999 г.*

---