УДК 536:621.455

А. В. Плюснин, Л. А. Бондаренко

СПОСОБЫ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВЫБРОСА

Рассмотрены схемы крупномасштабного моделирования выброса тела из контейнера за счет давления пороховых газов твердотопливного газогенератора или двигателя, которые позволяют проводить оперативную и надежную экспериментальную отработку натурных систем выброса.

E-mail: fs11@mx.bmstu.ru

Ключевые слова: *газодинамика, крупномасштабное моделирование, твердотопливный газогенератор.*

Под системами газодинамического выброса понимают технические системы, в которых некоторое тело, например ЛА, выбрасывается из содержащего его контейнера за счет давления пороховых газов твердотопливного газогенератора (ГГ) или ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ), создающего также тягу. В качестве устройства для выброса тела будем рассматривать ГГ, поскольку обычно тяга РДТТ в контейнере намного меньше силы, создаваемой поршнем за счет избыточного давления пороховых газов.

Для снижения рисков в процессе эксплуатации целесообразно экспериментально проверять правильное функционирование таких систем. Однако подготовка модельных экспериментов, их проведение и пересчет результатов на натурные условия затягивают общие сроки проектирования системы. Кроме того, при обычном моделировании пропорционально масштабируют модель, при этом приходится масштабировать и процесс по времени. Но тогда нельзя гарантировать, что характеристики натурного ГГ будут удовлетворительно соответствовать его модельному прототипу. Разброс параметров движения тела в контейнере в основном связан именно с параметрами работы ГГ, в первую очередь с разбросом скорости горения твердого топлива [1]. Следует также иметь в виду, что форма выбрасываемого тела практически не влияет на характеристики его движения в контейнере, а большое значение имеет правильное воспроизведение газодинамических параметров в замкнутом объеме (ЗО) контейнера за телом.

В связи с этим практический интерес представляет крупномасштабное моделирование с использованием натурного ГГ. Макет натурного тела должен лишь упрощенно воспроизводить геометрию кормовой части ЛА. Однако для размещения макета также требуется контейнер. Опыт газодинамической отработки системы [2] показал, что хорошие результаты можно получить, используя контейнеры, отличающиеся размерами. Это позволяет определить масштаб и способ моделирования. В настоящей работе этот подход рассмотрен применительно к моделированию натурных систем газодинамического выброса, функционирующих в условиях противодействия столба воды.

Идея применения натурного ГГ в крупномасштабной отработке принадлежит П.М. Соколову, а общая концепция крупномасштабного моделирования разработана Ю.Л. Якимовым совместно с авторами настоящей работы [2].

Моделирование продольного движения тела. Выпишем и сопоставим между собой уравнения продольного движения тела для натурных условий и предполагаемой схемы крупномасштабного моделирования, полагая, что в последнем случае движение тела осуществляется на наземном стенде в горизонтальном направлении [2].

Для натурных условий продольное движение тела (рис. 1) описывается уравнением

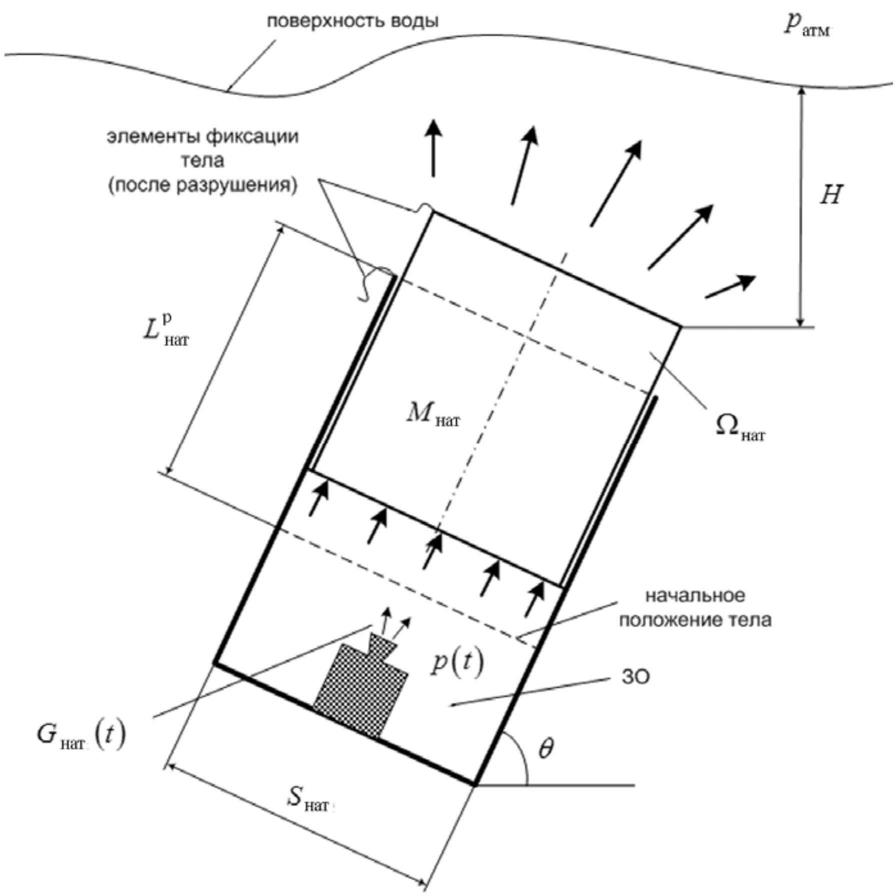


Рис. 1. Схема движения тела в натурных условиях

$$\left(M_{\text{нат}}+\mu\right)\frac{dV_{\text{нат}}}{dt_{\text{нат}}}=\left(p_{\text{нат}}-p_H\right)S_{\text{нат}}-M_{\text{нат}}\,g\sin\vartheta-F_{\text{нат}}^{\text{ф}}-F_{\text{нат}}^{\text{тр}}+$$

$$+\rho_{\text{ж}}\,\Omega_{\text{нат}}\left(L_{\text{нат}}\right)g\sin\vartheta-C_X\left(L_{\text{нат}}\right)\frac{\rho_{\text{ж}}V_{\text{нат}}^2}{2}S_{\text{нат}}, \tag{1}$$

а модельный аналог движения (рис. 2) — уравнением

$$M_{\text{мод}}\frac{dV_{\text{мод}}}{dt_{\text{мод}}}=\left(p_{\text{мод}}-p_{\text{атм}}\right)S_{\text{мод}}-F_{\text{мод}}^{\text{ф}}-F_{\text{мод}}^{\text{тр}}-R_{\text{мод}}. \tag{2}$$

В уравнениях (1), (2) и далее использованы следующие обозначения: нат и мод — индексы, обозначающие движение натурного тела и его модельного аналога соответственно; M — масса тела; μ — присоединенная масса натурного тела при продольном движении; L, $\frac{dL}{dt}=V$, $\frac{dV}{dt}=A$ — путь, скорость и ускорение тела; t — время; p — давление газа в ЗО; p_H — гидростатическое давление на уровне выходного сечения контейнера в натурных условиях; g — ускорение свободного падения; ϑ – угол выброса тела в натурных условиях; S — площадь (по внутреннему диаметру) поперечного сечения контейнера; $F^{\text{ф}}$ — сила, с которой тело фиксируется относительно контейнера; $F^{\text{тр}}$ — сила трения, приложенная к телу; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости (воды); $\Omega\left(L\right)$ — объем вышедшей из контейнера части тела; $C_X\left(L\right)$ — коэффициент лобового сопротивления

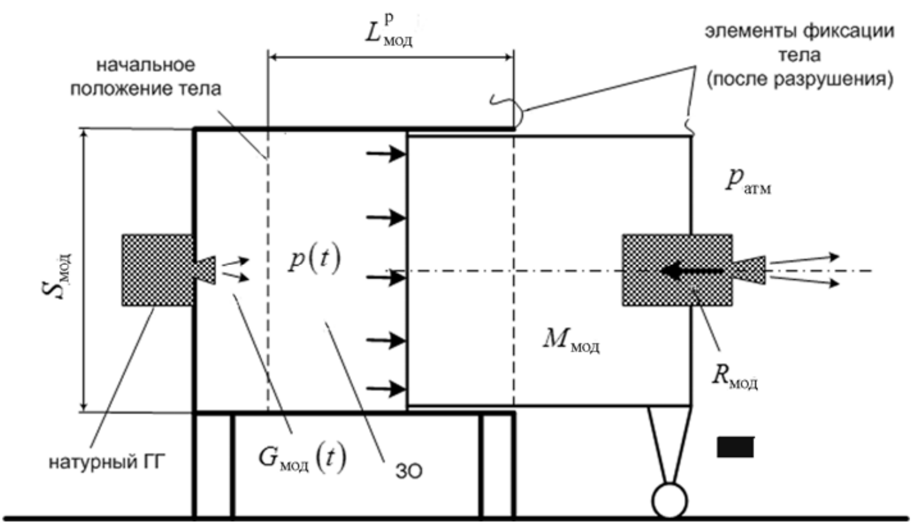


Рис. 2. Движение тела в модельных условиях

натурного тела; $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; R — искусственно создаваемая в модельных условиях сила, действующая в направлении, противоположном движению тела.

Согласно принятому подходу, в схеме крупномасштабного моделирования используется натурный ГГ. Следовательно, для модельных условий масштабы временных процессов и термодинамических параметров равны масштабам при натурных условиях:

$$\frac{t_{\text{нат}}}{t_{\text{мод}}} = \frac{T_{\text{нат}}}{T_{\text{мод}}} = \frac{p_{\text{нат}}}{p_{\text{мод}}} = 1, \tag{3}$$

где T — температура газовой среды в ЗО. Масштаб моделирования определим с помощью отношения поперечных размеров натурного и модельного контейнеров:

$$\lambda = \sqrt{\frac{S_{\text{нат}}}{S_{\text{мод}}}}. \tag{4}$$

Отметим, что в этой схеме в отличие от пропорционального моделирования масштаб моделирования продольного движения отличается от значения λ. Введем параметр

$$k = \frac{L_{\text{нат}}}{L_{\text{мод}}} = \frac{dL_{\text{нат}}/dt}{dL_{\text{мод}}/dt} = \frac{d^2 L_{\text{нат}}/dt^2}{d^2 L_{\text{мод}}/dt^2} = \frac{V_{\text{нат}}}{V_{\text{мод}}} = \frac{A_{\text{нат}}}{A_{\text{мод}}}. \tag{5}$$

Используя уравнение состояния газа

$$p = \frac{m_{\text{г}} R_{\text{г}} T}{\Omega_{\text{г}}}, \tag{6}$$

где $m_{\text{г}}$, $R_{\text{г}}$ — масса и газовая постоянная смеси газов в ЗО; $\Omega_{\text{г}}$ — текущий объем ЗО, и геометрическое соотношение

$$\frac{d\Omega_{\text{г}}}{dt} = \frac{dL}{dt} S = VS,$$

имеем

$$\frac{(m_{\text{г}})_{\text{нат}}}{(m_{\text{г}})_{\text{мод}}} = \frac{(\Omega_{\text{г}})_{\text{нат}}}{(\Omega_{\text{г}})_{\text{мод}}} = \frac{d(\Omega_{\text{г}})_{\text{нат}}/dt}{d(\Omega_{\text{г}})_{\text{нат}}/dt} = \frac{V_{\text{нат}} S_{\text{нат}}}{V_{\text{мод}} S_{\text{мод}}} = k\lambda^2.$$

Обозначим через $G_{\text{нат}} = \dfrac{d(m_{\text{г}})_{\text{нат}}}{dt}$ массовый расход газа натурного ГГ, а через $G_{\text{мод}} = \dfrac{d(m_{\text{г}})_{\text{мод}}}{dt}$ — часть расхода газа натурного ГГ в ЗО контейнера при проведении модельных испытаний. Тогда из последнего соотношения следует, что в модельных испытаниях для правильного моделирования продольного движения натурного тела необходимо обеспечить выполнение следующего условия:

$$\frac{G_{\text{нат}}}{G_{\text{мод}}} = \frac{d\left(m_{\text{г}}\right)_{\text{нат}}/dt}{d\left(m_{\text{г}}\right)_{\text{мод}}/dt} = \frac{\left(m_{\text{г}}\right)_{\text{нат}}}{\left(m_{\text{г}}\right)_{\text{мод}}} = k\lambda^2. \tag{7}$$

Умножая уравнение (1) на величину $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}$ и вычитая уравнение (2), получаем

$$\left[\left(M_{\text{нат}} + \mu\right)\frac{k}{\lambda^2} - M_{\text{мод}}\right] A_{\text{мод}}(t) = \left[F^{\text{ф}}_{\text{мод}}\left(L_{\text{мод}}\right) - F^{\text{ф}}_{\text{нат}}\left(L_{\text{нат}}\right)\frac{1}{\lambda^2}\right] +$$

$$+\left\{R_{\text{мод}}(t) - \left[\left(p_H - p_{\text{атм}}\right)S_{\text{мод}} + \frac{M_{\text{нат}}\, g \sin\vartheta}{\lambda^2}\right] -\right.$$

$$\left. - \left[\frac{C_X\left(L_{\text{нат}}\right)\rho_{\text{ж}} V^2_{\text{нат}}}{2} S_{\text{мод}} - \frac{\rho_{\text{ж}}\,\Omega_{\text{нат}}\left(L_{\text{нат}}\right) g \sin\vartheta}{\lambda^2} + \frac{F^{\text{тр}}_{\text{нат}}}{\lambda^2} - F^{\text{тр}}_{\text{мод}}\right]\right\}. \tag{8}$$

Уравнение (8) также является необходимым условием правильного моделирования продольного движения натурного тела. Оно устанавливает баланс трех слагаемых, резко различающихся характером их изменения, и действие практически независимых сил. Действительно, выражение в левой части пропорционально ускорению тела и является сильно нелинейной функцией времени, характер изменения которой определяется в основном давлением газа в ЗО (следовательно, в конечном счете, расходной характеристикой ГГ). Первое выражение в правой части уравнения (8) определяется силами фиксации тела в контейнере. Эти силы достаточно большие, но действуют лишь на очень малом участке пути тела (порядка нескольких миллиметров), пока не произойдет разрушение фиксирующего устройства. В выражение в фигурных скобках входят большие постоянные силы: давления гидростатического столба воды и веса натурного тела. Кроме того, это выражение содержит существенно меньшие и частично компенсирующие друг друга переменные силы лобового сопротивления, Архимеда и трения. Из независимости указанных членов следуют соотношения

$$M_{\text{мод}} = \left(M_{\text{нат}} + \mu\right)\frac{k}{\lambda^2} = \left(M_{\text{нат}} + \mu\right)k\frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}, \tag{9}$$

$$F_{\text{мод}}^{\text{ф}} = F_{\text{нат}}^{\text{ф}} \frac{1}{\lambda^2} = F_{\text{нат}}^{\text{ф}} \frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}, \tag{10}$$

$$R_{\text{мод}} = \left[p_H - p_{\text{атм}} + \frac{C_X\left(L_{\text{нат}}\right)\rho_{\text{ж}} V_{\text{нат}}^2}{2} \right] S_{\text{мод}} - F_{\text{мод}}^{\text{тр}} +$$

$$+ \left\{ \left[M_{\text{нат}} - \rho_{\text{ж}} \Omega_{\text{нат}}\left(L_{\text{нат}}\right) \right] g \sin\vartheta + F_{\text{нат}}^{\text{тр}} \right\} \frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}. \tag{11}$$

Уравнение (9) определяет подвижную массу модельного тела, уравнение (10) — силу фиксации в контейнере модельного тела, уравнение (11) — силу, которую в модельном эксперименте следует приложить в направлении, противоположном движению тела. Возможность выполнения первых двух требований очевидна. На практике условие (11) обусловливает требование, что сила $R_{\text{мод}}$ — слабо изменяющаяся функция времени. Для реализации такой силы удобно использовать РДТТ с постоянной или слабо прогрессивной поверхностью горения [2].

Будем считать, что масштаб моделирования (4) в конкретных условиях является заданным, что однозначно определяет требования (10) и (11). Но у нас остается свобода выбора коэффициента (5). Перепишем соотношение (7) в виде

$$\frac{1}{k} = \lambda^2 \frac{G_{\text{мод}}}{G_{\text{нат}}}. \tag{12}$$

Используя выражение (12) и варьируя пропорции продуктов сгорания натурного ГГ, перепускаемых в ЗО модельного контейнера, можно влиять на выбор значения k. Это существенно, так как, согласно соотношению (5), участок разгона модельного тела в контейнере не должен быть меньше величины

$$L_{\text{мод}}^{\text{р}} = \frac{1}{k} L_{\text{нат}}^{\text{р}}. \tag{13}$$

При значении $\lambda^2 \sim 1$ (площади поперечных сечений натурного и модельного контейнеров близки) естественно принять

$$\frac{G_{\text{нат}}}{G_{\text{мод}}} = 1,$$

что дает $k = \dfrac{1}{\lambda^2} = \dfrac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}$. В этом случае условие (9), накладываемое на массу макета, принимает вид

$$M_{\text{мод}} = \left(M_{\text{нат}} + \mu\right)\left(\frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}\right)^2,$$

а минимальный участок разгона модельного тела в контейнере определяется формулой

$$L^{\text{р}}_{\text{мод}} = L^{\text{р}}_{\text{нат}} \frac{S_{\text{нат}}}{S_{\text{мод}}}.$$

Таким образом, схема моделирования определена [2].

Однако если $\lambda^2 \gg 1$, при соблюдении предыдущих условий $L^{\text{р}}_{\text{мод}} = L^{\text{р}}_{\text{нат}} \dfrac{S_{\text{нат}}}{S_{\text{мод}}} = \lambda^2 L^{\text{р}}_{\text{нат}} \gg L^{\text{р}}_{\text{нат}}$, что нецелесообразно. Приняв для этого случая $k = 1$, получим следующие соотношения:

$$\frac{G_{\text{мод}}}{G_{\text{нат}}} = \frac{1}{\lambda^2} = \frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}},$$

$$M_{\text{мод}} = \left(M_{\text{нат}} + \mu\right)\frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}},$$

$$L^{\text{р}}_{\text{мод}} = L^{\text{р}}_{\text{нат}}.$$

С учетом последнего условия и различия площадей $S_{\text{нат}}$ и $S_{\text{мод}}$ такую схему называют «дольным» моделированием.

В случае если модельный контейнер имеет большую длину, чем натурный, принимая $k = \dfrac{L^{\text{р}}_{\text{нат}}}{L^{\text{р}}_{\text{мод}}}$, можно увеличить долю продуктов сгорания, перепускаемых из натурного ГГ в ЗО модельного контейнера:

$$\frac{G_{\text{мод}}}{G_{\text{нат}}} = \frac{1}{\lambda^2}\frac{L^{\text{р}}_{\text{мод}}}{L^{\text{р}}_{\text{нат}}}.$$

При этом масса макета определяется соотношением

$$M_{\text{мод}} = \left(M_{\text{нат}} + \mu\right)\frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{нат}}}\frac{L^{\text{р}}_{\text{нат}}}{L^{\text{р}}_{\text{мод}}}.$$

Погрешности способа крупномасштабного моделирования. Основными источниками погрешностей рассмотренных схем моделирования при условии соблюдения требований (7), (9) и (10) являются неточное воспроизведение противотяги (11) и погрешности моделирования тепловых процессов.

Уравнение баланса энергии продуктов сгорания в ЗО контейнера можно приближенно описать следующим соотношением:

$$\frac{dT}{dt}=\frac{G_{\text{ГГ}}\left(c_{p\text{ГГ}}\,T_{\text{к.с ГГ}}-c_{v\text{ГГ}}\,T\right)-pVS-\dot{Q}_{\text{тп}}}{m_{\text{г}}c_v}, \tag{14}$$

где $G_{\text{ГГ}}$ — расход натурного ГГ в ЗО контейнера; $T_{\text{к.сГГ}}$ — температура в камере сгорания ГГ; $c_{p\text{ГГ}}$ — теплоемкость продуктов сгорания ГГ в камере сгорания при постоянном давлении; c_v — теплоемкость смеси в ЗО при постоянном объеме; $\dot{Q}_{\text{тп}}$ — мощность теплопотерь в стенки ЗО.

Давление и температура смеси связаны между собой уравнением (6). Отметим, что в действительности в отличие от давления температура среды в каждый момент времени распределена по ЗО с большой неоднородностью. Поэтому совместное использование уравнений (6) и (14) означает отождествление усреднений температуры в ЗО по текущим значениям полной энергии и давления.

Величина $G_{\text{ГГ}}c_{p\text{ГГ}}\,T_{\text{к.с ГГ}}$ характеризует мощность притока полной энергии в ЗО контейнера, обусловленного переносом кинетической и внутренней энергии продуктами сгорания, а также работой проталкивания. Вместо явного учета теплопотерь слагаемым $\dot{Q}_{\text{тп}}$ можно ввести коэффициент потерь

$$\chi_{\text{тп}}=\frac{\dot{Q}_{\text{тп}}}{G_{\text{ГГ}}c_{p\text{ГГ}}\,T_{\text{к.с ГГ}}} \tag{15}$$

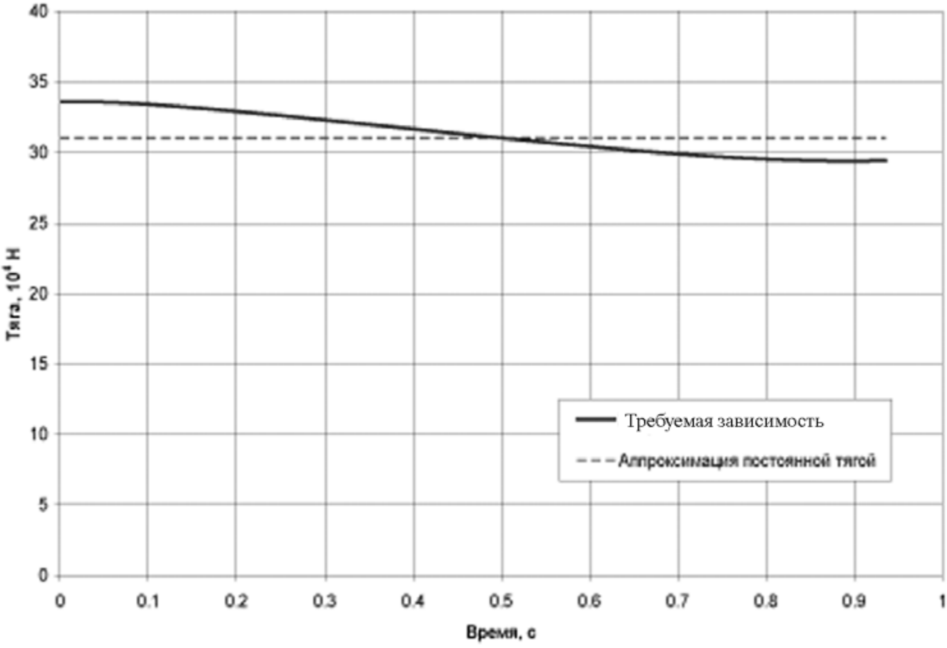
и переписать уравнение (14) в виде

$$\frac{dT}{dt}=\frac{G_{\text{ГГ}}\left[\left(1-\chi_{\text{тп}}\right)c_{p\text{ГГ}}\,T_{\text{к.с ГГ}}-c_v\,T\right]-pVS}{m_{\text{г}}\,c_v}.$$

Полагая, что противотяга в модельном эксперименте в точности соответствует условию (11), и приравнивая коэффициенты (15) для натурного и модельного движений, получаем, что расчетные значения параметров этих движений полностью соответствуют друг другу согласно формулам пересчета (3) и (5).

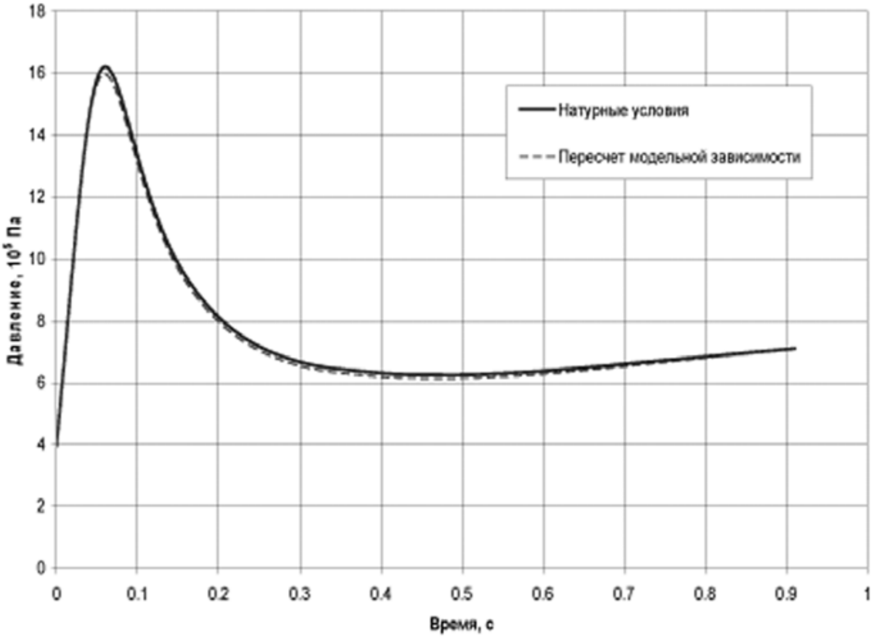
Влияние неточной реализации противотяги $R_{\text{мод}}$ (11) на погрешности моделирования давления в ЗО и скорости движения тела при $\chi_{\text{тп}} = 0,3$ иллюстрирует рис. 3, *а* — *в*.

Рис. 4, *а*, *б* демонстрирует оценку влияния тепловых процессов на погрешность моделирования давления в ЗО и скорости тела при $\lambda \approx 1,2$ и $k = \dfrac{1}{\lambda^2}$ (результаты расчетов). Неизбежные погрешности моделирования, связанные с влиянием тепловых процессов, можно уменьшить, дополняя экспериментальное исследование численным моделированием газодинамических процессов.

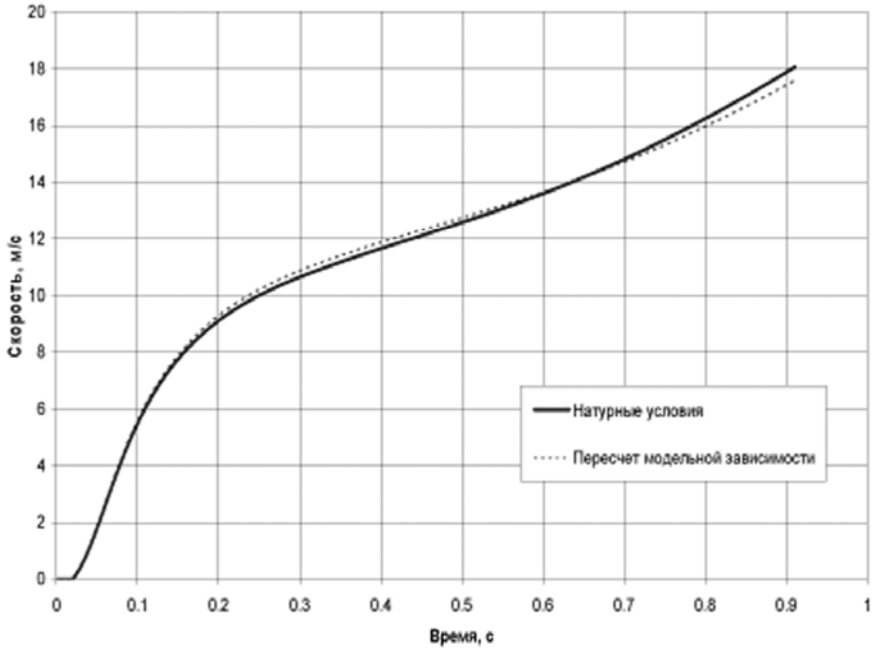


а

Рис. 3 (начало). Результаты расчета противотяги $R_{\text{мод}}$ для модельного эксперимента (*а*), давления в ЗО контейнера (*б*) и скоростей движения тела (*в*)

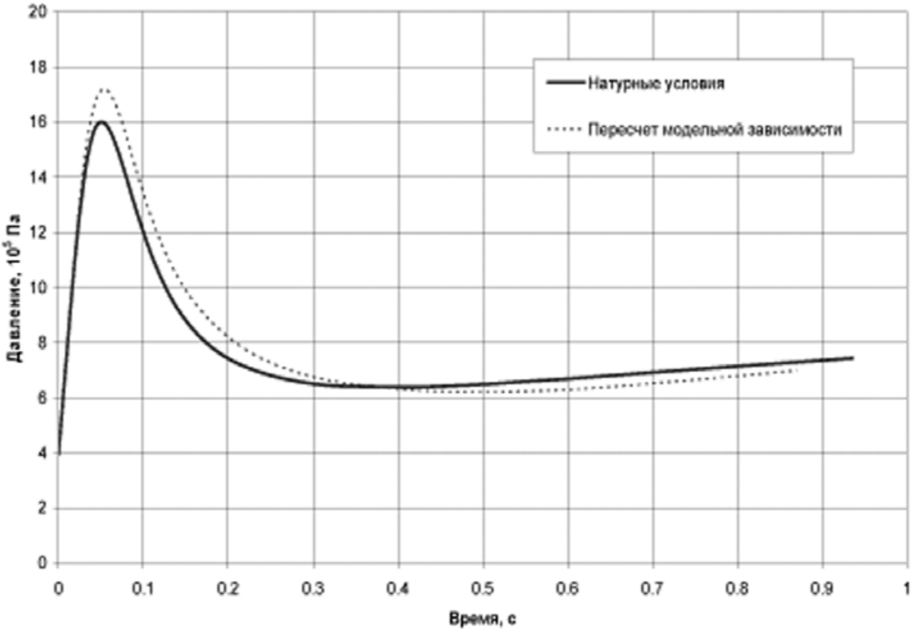


б

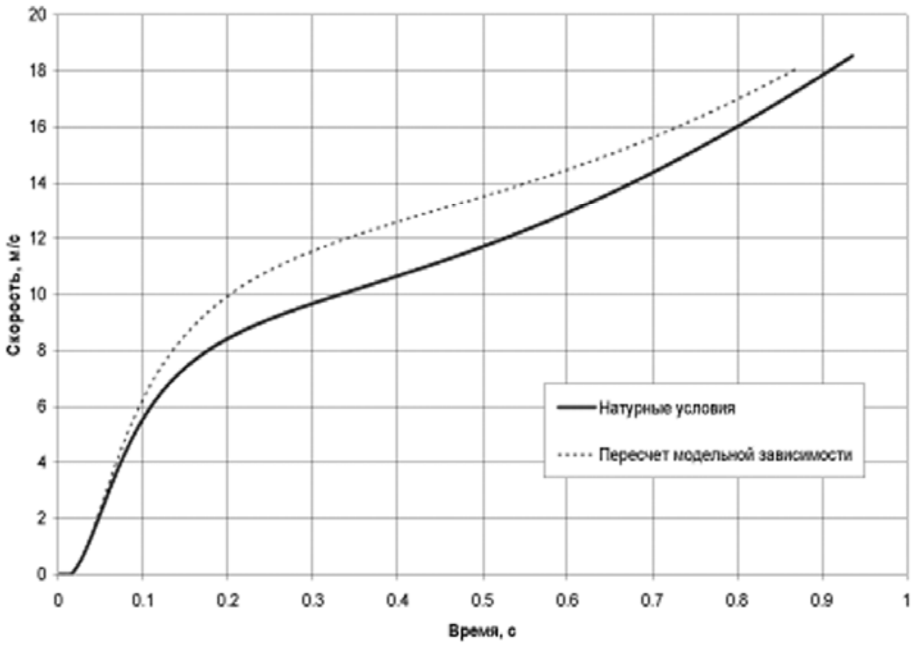


в

Рис. 3 (окончание). Результаты расчета противотяги $R_{\text{мод}}$ для модельного эксперимента (*а*), давления в ЗО контейнера (*б*) и скоростей движения тела (*в*)



а



б

Рис. 4. Оценка давления в ЗО контейнера (*а*) и скоростей движения тела (*б*)

Способы крупномасштабного моделирования, рассмотренные в работе, можно успешно применять для экспериментальной отработки систем газодинамического выброса взамен испытаний на малых масштабах. Это позволяет повысить точность прогнозирования натурных параметров и сократить сроки разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соркин Р. Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. М.: Наука, 1983.

2. Ефремов Г. А., Минасбеков Д. А., Модестов В. А., Страхов А. Н., Бондаренко Л. А., Якимов Ю. Л., Плюснин А. В., Крупчатников И. В., Соколов П. М., Говоров В. В. Способ имитации условий старта ракеты из подводной лодки и система для его осуществления. Патент РФ № 2082936. Бюл. № 18, 27.06.97.

Статья поступила в редакцию 03.07.2012.