

АНАЛИЗ ОШИБОК В МЕТОДИКАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

Р. О. Хесслер, Р. Л. Глик*

35670 Сомервиль, Алабама, США
*47978 Ренсселаер, Индиана, США

Сравниваются методики определения скорости горения по заданному набору расчетных кривых давление — время в модельном ракетном двигателе, принципиально разделяющихся по критерию мгновенного либо растянутого во времени погасания. Определяются и количественно оцениваются компоненты погрешностей двух исторически сложившихся методов. Показано, что итерации с использованием метода наименьших квадратов улучшают результаты этих методик путем устранения влияния переменности давления во времени. Показано, что новый комбинированный метод обработки кривых давление — время позволяет избежать погрешностей при работе с использованными наборами модельных данных.

ВВЕДЕНИЕ

С помощью численного моделирования были получены зависимости давления от времени горения для десяти модификаций твердотопливных ракетных двигателей. Эти данные рассматриваются в качестве третьей части (RR3) сравнительного анализа методов обработки результатов по скоростям горения твердых топлив, предпринятого рабочей группой НАТО [1]. Моделировался реактивный двигатель с зарядом, прочно скрепленным с корпусом размерами $50,8 \times 111,6$ мм с цилиндрическим отверстием и толщиной свода $12,7$ мм [2]. В используемой модели предполагалось, что горение изотропного топлива равномерно, давление и скорость газа постоянны по всей длине двигателя, газ идеален, а тепловые потери отсутствуют [3].

Программа расчета в явной форме учитывает смещение цилиндрического отверстия или внутреннего канала от осевой линии. Смещение канала приводит к переменности толщины свода в зависимости от углового положения по окружности. Переменность толщины свода приводит к неодновременному выгоранию топлива по окружности камеры двигателя и используется для моделирования различной толщины свода, которая может быть вызвана деформацией заряда топлива в реальных двигателях при отверждении и термической усадкой (бочкообразность («barrel-shape»), [4]) или из-за смещения оси канала при изготовлении.

Десять модельных двигателей разделены на две группы по пять. Различные размеры

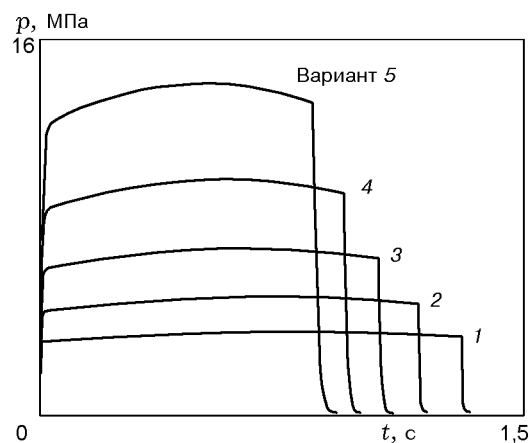


Рис. 1. Диапазон рабочих давлений двигателей 1-й группы

сопел в двигателях первой группы, имеющих нулевое смещение канала, обеспечивают необходимый диапазон рабочих давлений (рис. 1). Двигатели второй группы идентичны двигателям первой группы за исключением того, что задано постоянное ненулевое смещение канала. Таким образом, группу 1 представляют «идеальные» двигатели с мгновенным по всей горячей поверхности погасанием, а в группе 2 представлены двигатели, отличающиеся погасанием вначале только с одной стороны и требующие некоторого времени для полного погасания топлива. Таким образом, характеристики двигателей обеих групп с одинаковыми размерами сопел идентичны вплоть до стадии погасания. На рис. 2 приведены кривые давления для одной такой пары двигателей во время по-

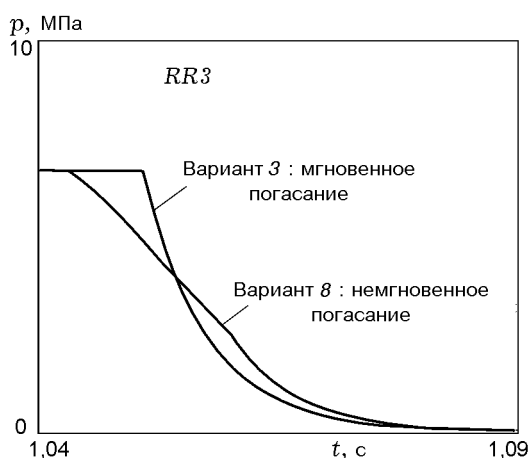


Рис. 2. Падение давлений в двигателе при мгновенном и немгновенном погасании

гасания и последующего спада давления. Для определения ошибок, характерных для различных методов анализа, и для определения влияния немгновенности погасания на эти ошибки из кривых давления, рассчитанных по математической модели работы двигателя, были получены данные по скорости горения твердого топлива.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже обсуждаются определения, используемые в методиках анализа скорости горения, ошибки, содержащиеся в различных определениях, и сравниваются результаты расчетов скорости горения по используемым комбинациям методов с известным уравнением скорости горения.

Определения терминов, используемых в методиках

Методика получения скорости горения в двигателе из зависимости давления от времени $p(t)$ в общем случае требует введения пяти типов определений:

- толщины горящего свода топлива,
- характерных моментов времени,
- скорости горения,
- характеристического давления,
- поправки для базового давления.

Различия результатов применения методик существенно зависят от степени адекватности определений и допущений, сопутствующих конкретному двигателю. Применение методик при расчете по математической модели двигателя, где точно известны все свойства и процессы, позволяет оценить ошибки, обусловленные используемыми определениями.

Принято, что исходная толщина горящего свода 12,7 мм. Сравнение с представленной геометрией заряда показало, что это именно «проектная» или «номинальная» толщина свода, которая в большинстве случаев доступна исследователю. Однако поскольку исходные размеры определены при температуре эксперимента, номинальная толщина свода фактически является средней толщиной \bar{r} .

В описании набора модельных данных задан также вид уравнения скорости горения

$$r = bp^n, \quad (1)$$

и указано, что коэффициент b и показатель степени n являются константами. Это определяет конкретный вид поправки на базовое давление:

$$r_{ref} = r_{meas} \left(\frac{p_{ref}}{p(r_{meas})} \right)^n, \quad (2)$$

где $p(r_{meas})$ — давление, связанное с измеряемой скоростью r_{meas} , — еще не определено.

Методики измерения скорости горения, основанные на интерпретации зависимости $p(t)$, требуют определения времени горения t_b :

$$t_b = t_E - t_B, \quad (3)$$

что, в свою очередь, требует определения моментов времени начала (t_B) и конца (t_E) горения.

Определения времен начала и конца горения наиболее многочисленны. Почти каждый тип экспериментальной установки имеет свой собственный уникальный набор (или наборы) определений характерных моментов времени.

Большинство определений t_B основано на условии достижения в двигателе давления, составляющего определенную долю характеристического или некоторого заданного уровня. Определения t_E прежде всего связывают с точкой «излома кривой» в конце работы двигателя, когда давление начинает быстро снижаться. Ряд определений t_E основан на падении давления до некоторого уровня относительно

характеристического давления. За характеристическое давление принимается максимальное либо среднее давление. Большинство этих определений как-то обосновывается, но все объяснения, по существу, произвольны, и их использование будет приводить к произвольным результатам.

Физика работы двигателя описывается дифференциальными уравнениями, а начало и конец горения требуют специфического описания. Это приводит к классу определений моментов времени, основанных на производных [5–10]. Набор определений, предлагаемый в работах [9, 10] (по-видимому, строгий для моделируемых данных [5] и, по меньшей мере, достаточно хорошо описывающий реальные данные [3]), в настоящей работе используется с небольшими усовершенствованиями (изменения в определениях выделены курсивом):

- Начало горения t_B — *средняя точка временного интервала*, непосредственно предшествующего первому заметному увеличению dp/dt на последнем участке устойчивого роста давления перед равновесной работой двигателя.
- Начало погасания t_{E_i} — *средняя точка временного интервала*, непосредственно предшествующего «отрицательному переходу» к отрицательному значению d^2p/dt^2 в период спада давления после завершения равновесной работы двигателя.
- Завершение погасания t_{E_f} — *средняя точка временного интервала*, непосредственно предшествующего «положительному переходу» к положительному значению d^2p/dt^2 в конце или сразу после завершения равновесной работы двигателя.

В ранних версиях этих определений [9, 10] использован *предыдущий момент времени*. Настоящее изменение сделано на основе статистического анализа, согласно которому если событие не произошло в один момент времени, но произошло в следующий, то с наименьшей вероятной ошибкой в качестве промежуточной следует брать среднюю точку. Изменение значительно улучшит результаты для данных с низким (относительно желаемой точности) разрешением по времени, но мало что даст, для разрешения, намного меньшего желаемой точности, как в рассматриваемом случае.

Этот набор определений моментов времени отличается от большинства других тем, что погасание рассматривается как процесс, происходящий в течение определенного промежутка времени, т. е. немгновенное погасание. Каждая из точек окончания процесса погасания определяется как специфическое скачкообразное событие в работе двигателя. Начало погасания t_{E_i} соответствует началу процесса, т. е. моменту времени, когда волна горения на основной горячей поверхности достигает стенки корпуса и площадь горячей поверхности начинает резко уменьшаться. Точка завершения погасания t_{E_f} соответствует концу процесса, когда прекращается газификация, или моменту, когда плавно уменьшающаяся площадь горячей поверхности достигает нулевого значения и становится постоянной, или моменту, когда горение прекращается на оставшейся поверхности из-за неустойчивости горения или теплопотерь.

Скорость горения — это мгновенная скорость распространения волны горения по топливу. Средняя скорость горения за время горения t_b может быть определена интегрированием. Это приводит непосредственно к определению скорости горения r_{tot} через соотношение толщина/время:

$$r_{tot} = \frac{\tau_E - \tau_B}{t_E - t_B} = \frac{\tau_b}{t_b}, \quad (4)$$

где τ — толщины слоя, сгоревшего за различные периоды времени.

Толщина τ_b указывает, что слой выгорел в течение времени горения t_b . Следовательно, можно ожидать, что такое определение корректно представляет среднюю толщину свода, если только погасание происходит мгновенно. Для немгновенного погасания $t_E = t_{E_i}$ и толщина слоя, сгоревшего за время t_{E_i} , несколько меньше, чем средняя толщина. Следовательно, можно ожидать, что результаты расчета по r_{tot} могут быть завышенными при использовании средней толщины.

Среднюю скорость горения можно определить также и при помощи массового баланса в двигателе:

$$r_{MB} = \frac{\tau_G - \tau_A}{t_E - t_B} \frac{\int_{t_B}^{t_E} p dt}{\int_{t_A}^{t_G} p dt} = \frac{\bar{\tau}}{t_b} \alpha_m \quad (5)$$

(запасом массы газа в объеме двигателя пренебрегаем; α_m — корректирующий фактор).

Толщина свода в первом равенстве уравнения (5) является, по сути, полной толщиной свода, сгоревшего в течение полного времени работы двигателя t_{tot} , ограниченного крайними точками t_A и t_G . Однако на практике, как правило, используется средняя толщина свода \bar{r} , в соответствии со вторым равенством. Хотя первоначальный вывод уравнения (5) неизвестен, его реконструкция в [4, 5] показала, что кажущаяся несогласованность компенсируется ошибкой в допущениях, необходимых для вывода уравнения. Конкретнее, необходимо предположить, что средняя площадь поверхности горения является той же самой для t_b и t_{tot} [5], что, очевидно, не так. Неизвестно, было ли это допущение случайным или обдуманым. Конечный результат, однако, заключается в том, что r_{MB} компенсирует противоречие за счет того, что $t_E = t_{E_i}$ и за счет использования средней толщины свода.

Временные точки, соответствующие полному времени t_{tot} работы двигателя, определяются следующим образом.

- Начало работы двигателя t_A — средняя точка временного интервала, предшествующего первому заметному повышению давления в камере.
- Конец работы двигателя t_G — средняя точка временного интервала, предшествующего последнему заметному снижению давления в камере.

Определение скорости горения по массовому балансу, в заведомо иной форме, часто приписывают Бруксу [11], но есть и более ранние ссылки [12]. Использовались несколько вариантов уравнения (5), прежде всего, с поправкой на неучет массы газа в камере двигателя. Последняя вызывает принципиальную ошибку при использовании массового баланса для определения скорости горения топлива [5].

Характерное допущение метода определения скорости по массовому балансу заключается в том, что горение происходит в течение всего времени работы двигателя. Таким образом, скорость расхода массы из сопла может использоваться как поправка к уравнению (4) при мгновенном погасании. Корректирующий фактор α_m может интерпретироваться как поправка либо к толщине свода [4, 12], либо к времени горения [11].

Давление в двигателе, соответствующее измеренной скорости горения, является осредненным по времени:

$$p_b = \frac{\int_{t_B}^{t_E} p dt}{t_E - t_B}. \quad (6)$$

Однако найденная пара значений r_{meas} , $p(r_{meas})$ для любого определения скорости должна в то же время удовлетворять уравнению скорости горения (1), которое требует использования давления, осредненного по скорости горения [13, 14]:

$$p(r_{meas}) \equiv p_{nb} = \left(\frac{\int_{t_B}^{t_E} p^n dt}{t_E - t_B} \right)^{1/n}. \quad (7)$$

Для показателя n меньше единицы, что типично для большинства топлив, представляющих прикладной интерес, давление, осредненное по скорости, меньше давления, осредненного по времени. Следовательно, использование осредненного по времени давления приводит к скоростям, скорректированным на низкое базовое давление.

Как для поправки скорости на базовое давление по уравнению (2), так и для давления, осредненного по скорости согласно уравнению (7), необходимо знать величину показателя степени n . Обычно это достигается путем обработки экспериментальных данных по скорости горения методом наименьших квадратов по уравнению (1) в виде

$$\ln r_{meas} = \ln b + n \ln p(r_{meas}). \quad (8)$$

В процедурах, использующих осредненное по времени давление, спрямление данных с использованием метода наименьших квадратов применяется однократно. В методах, использующих осредненное по скорости давление, необходимо итерационным способом совместно решать уравнения (7) и (8), используя данные по набору двигателей (если таковой имеется) с идентичным уравнением скорости. Итерации начинаются с осредненного по времени давления в качестве начальной точки (которая соответствует начальной гипотезе $n = 1$) и, как правило, сходятся за три-пять шагов.

Фактически все измерения скорости горения зависят от одного из двух определений скорости горения ((4) или (5)) с различными определениями моментов времени. Каждое из этих определений скорости имеет своих апологетов, и дискуссия относительно того, какое из них

лучше, продолжается по сей день. В основе дискуссии лежит наблюдение, что r_{tot} будет содержать ошибку, если погасание немгновенно (каким оно почти всегда и является). В то же время известно, что r_{MB} всегда будет содержать погрешность при неучете массы газа в камере двигателя.

Обеих ошибок можно избежать при использовании модифицированного r_{tot} -метода, основанного на явной обработке данных по немгновенному погасанию [5, 9, 10]. Для этого следует провести два измерения r_{tot} с использованием средней толщины свода: r_{b_i} — с использованием определения времени начала погасания t_{E_i} и r_{b_f} — с использованием определения времени окончания погасания t_{E_f} . Оба результата после приведения к общему давлению и проведения итерационной процедуры с подобными двигателями (с целью определения соответствующего показателя степени) все же будут ошибочны, потому что $\bar{\tau}$ еще не та толщина свода, которую следует использовать в этих случаях. Однако знаки ошибок *противоположны* в этих двух методиках измерения, так что ошибка среднего значения стремится к нулю. Для процессов погасания, в которых скорость изменения горячей поверхности $dA_s/d\tau$ является нечетной функцией, имеет место полная компенсация ошибки [5].

Результат комбинированного метода измерения можно сформулировать как новое определение скорости горения:

$$r_{HG}(p_{nb_i}) = \frac{1}{2} \left(r_{tot_i} + r_{tot_f} \left(\frac{p_{nb_i}}{p_{nb_f}} \right)^n \right). \quad (9)$$

В следующем параграфе обсуждается применение сделанных выше определений для обработки данных и сопоставляются полученные результаты.

Анализ ошибок

Данные для двух групп моделируемых двигателей были обработаны в соответствии с пятью методиками.

- Скорость горения r_{tot} , определяемая по соотношению толщина/время.
- Итерационная скорость горения r_{tot_n} .
- Скорость r_{MB} , определяемая по массовому балансу.

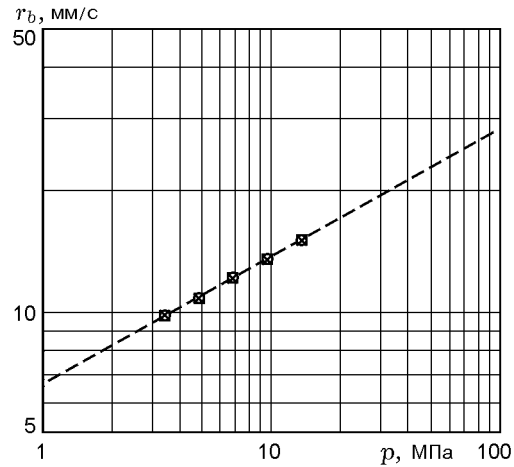


Рис. 3. Зависимость скорости горения от давления для двигателей 1-й группы:

в логарифмических координатах невозможно различить 2 %-й разброс данных

- Итерационная скорость r_{MB_n} , определяемая по массовому балансу.
- Итерационная скорость r_{HG} , определяемая по соотношению толщина/время и осредняемая по результатам обработки данных по двум методикам.

В каждой из методик использованы определения момента времени, приведенные выше и соответствующие специфике конкретного метода. Значения моментов времени, детали алгоритмов и результаты приведены в приложении.

Данные для первой группы двигателей представлены в логарифмических координатах на рис. 3. Как оказалось, они близки к исходной скорости. Однако разрешающая способность представленных результатов в логарифмических координатах не позволяет определить малые различия. Чтобы повысить разрешающую способность, полученные данные были нормированы на исходную скорость горения при соответствующем давлении, а затем ошибка выражена в процентах:

$$Error [\%] = 100 \left(\frac{r_{meas}(p_{meas})}{r_{input}(p_{meas})} - 1 \right). \quad (10)$$

Ошибки для двух методов определения скорости горения по соотношению толщина/время представлены на рис. 4. Для первой группы (без смещения центрального канала) применение обычного r_{tot} -метода, который использует в качестве характеристиче-

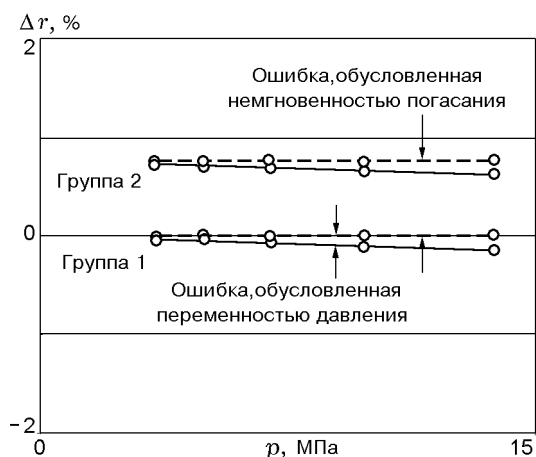


Рис. 4. Ошибки методик определения скорости горения по соотношению толщина/время:

r_{tot} — сплошные линии, r_{tot_n} — штриховые линии (осредненное по скорости давление в качестве характеристического)

ского осредненное по времени давление, дает ошибку несколько меньше нуля. Второй метод (r_{tot_n}), в котором используется осредненное по скорости давление и итерации по группе двигателей для определения требуемого показателя давления, дает отклонение меньшее, чем разрешающая способность по времени. Различие между этими двумя методами определяет ошибку, связанную с переменностью давления в двигателе, приблизительно равную 0,01 %/МПа для данной конкретной модели двигателя¹. Хотя в r_{tot} -методе ошибка в связи с переменностью давления в моделируемых двигателях невелика, можно ожидать, что она будет порядка 0,05 %/МПа для реальных двигателей из-за теплопотерь в процессе роста давления. Для двигателей, характеризующихся в целом переменной (прогрессивной или регрессивной) зависимостью давления от времени, ошибки из-за переменности давления будут значительно больше.

Сравнение результатов двух групп исходных данных показывает (см. рис. 4), что в методе толщина/время смещение канала от оси заряда приводит к систематическому изменению скорости горения в сторону увеличения из-за немгновенного погасания. Эта ошибка возникает в r_{tot} -методе потому, что толщина сгоревшего топлива к моменту начала по-

¹Отметим, что согласно рис. 1 рабочее давление в двигателе приблизительно постоянно (прим. переводчика)

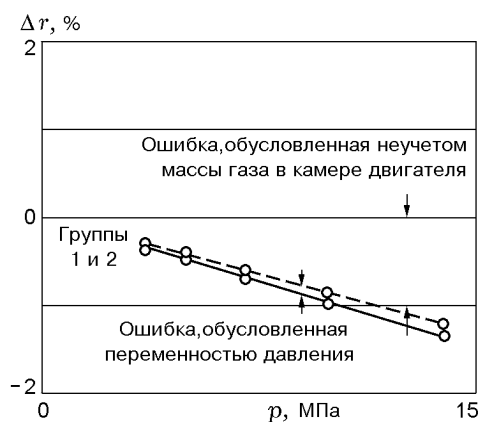


Рис. 5. Ошибки методик определения скорости горения по массовому балансу:

r_{MB} — сплошная линия, r_{MB_n} — штриховая линия (пренебрежение массой газа в камере двигателя, осредненное по скорости давление в качестве характеристического, итерации для нахождения показателя степени n)

гасания меньше, чем средняя толщина свода, обычно используемая для вычислений. В этом случае расчетные скорости смещены в сторону увеличения (на $\approx 0,76$ % в группе 2).

Результаты применения метода массового баланса представлены на рис. 5. В этом методе определения скорости горения весьма эффективно компенсируется немгновенность погасания, вследствие чего на графике результаты для двух исследуемых групп накладываются друг на друга. Наиболее часто используемый метод определения скорости по балансу массы (r_{MB}) в качестве характеристического использует осредненное по времени давление. В модифицированном алгоритме (r_{MB_n}) используются осредненное по скорости давление и итерационный метод получения показателя степени, чтобы устранить ошибку, вызванную переменностью давления. Различие между этими двумя методами дает такую же ошибку из-за переменности давления (0,01 %/МПа), какая была найдена в методе определения скорости по соотношению толщина/время.

Ошибка среднего значения в модифицированном методе r_{MB_n} составляет $\approx 0,09$ %/МПа для конкретной конструкции двигателя. Поскольку ошибка из-за неучета массы газа в двигателе зависит от объема камеры, она будет меняться в зависимости от модели двигателя. Эта ошибка приблизительно пропорциональна давлению, что приводит к нелинейности регистрируемой зависимости $\ln r - \ln p$. Этот эф-

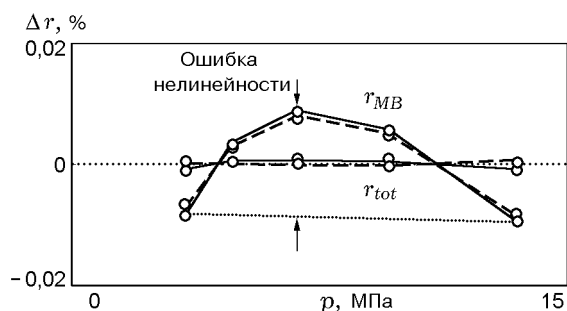


Рис. 6. Отклонения от аппроксимирующей кривой скорость горения — давление

фект показан на рис. 6 как систематическое отклонение от аппроксимирующей линии в виде кривой выпуклостью вверх. Ошибка из-за переменности давления, также будучи пропорциональной давлению, производит аналогичный эффект. Для данной конструкции двигателя она заметно меньше, чем ошибка, связанная с неучетом массы газа в камере двигателя, и, следовательно, вносит малую нелинейную погрешность. Об этом свидетельствует близость к нулю линии для r_{tot} на рис. 6. Однако следует ожидать, что относительные масштабы этих двух ошибок будут заметно варьироваться в различных конструкциях двигателей и при вариации законов скорости горения.

На рис. 7 представлена ошибка скорости горения, определенной с использованием комбинированного r_{HG} -итерационного метода толщина/время. Ошибки из-за немгновенности погасания и из-за переменности давления в двигателе в методе определения скорости горения по соотношению толщина/время были эффективно скомпенсированы при помощи этого метода. Как отклонение, так и погрешность r_{HG} -метода меньше, чем номинальная разрешающая способность по времени, равная 0,01 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения скорости горения в реальных двигателях почти всегда основаны на одном из двух определений скорости горения: либо из соотношения толщина/время (r_{tot}), либо из массового баланса (r_{MB}). При этом измерения практически всегда основаны на номинальной или средней толщине свода и связаны с осредненным по времени давлением p_b .

Два этих исторически сложившихся метода использовались, чтобы определить скорости горения в двигателе по расчетным кри-

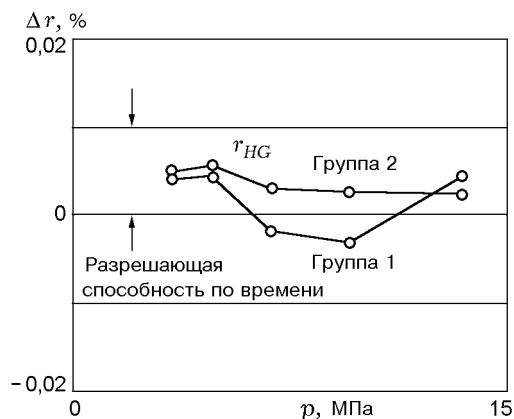


Рис. 7. Ошибки скорости горения, определяемой по итерационной комбинированной методике по соотношению толщина/время

вым, используемым в качестве исходных данных в процедуре идентификации наилучшего метода обработки экспериментальных кривых (комиссия НАТО AVT/RTO WG016, в прошлом комиссия AGARD PEP WG27). Набор данных RR3 состоял из группы двигателей с мгновенным погасанием и группы идентичных двигателей, имеющих немгновенное погасание.

Для анализа набора данных RR3 также применялись два модифицированных метода (r_{totn} и r_{MBn}). Модификации состояли в связывании измеренных скоростей с осредненным по скорости давлением p_{nb} , как это требуется по теории, и в использовании итераций для определения показателя степени при давлении n .

Данные были также обработаны с помощью итерационного комбинированного метода измерения скорости по соотношению толщина/время (r_{HG}), который специфически трактует немгновенное погасание и включает осредненное по скорости давление и итерации для определения показателя степени при давлении.

Результаты применения различных методов сравнивали с уравнением для скорости горения, используемым для построения расчетных кривых по давлению, а также между собой, чтобы идентифицировать и оценить количественно следующие систематические ошибки, свойственные различным процедурам.

- Ошибка, обусловленная переменностью давления в двигателе. Имеет место (0,01 %/МПа для данной конструкции двигателя) в случае, когда в качестве характеристического давления используется осредненное

по времени давление (в методах r_{tot} и r_{MB}). Обусловлена непостоянством давления во время горения. Корректируется использованием осредненного по скорости давления в качестве характеристического (в методах r_{totn} , r_{MBn} и r_{HG}).

- **Ошибка из-за немгновенности погасания.** Присуща (в процентах от изменения толщины свода) методам определения скорости по отношению толщина/время (r_{tot} и r_{totn}). Обусловлена вариациями толщины свода внутри конкретных двигателей. Исключается при использовании методов массового баланса (r_{MB} и r_{MBn}). Компенсируется при использовании итерационного комбинированного метода толщина/время (r_{HG}).

- **Ошибка из-за неучета массы газа в камере двигателя.** Присуща (0,09 %/МПа для данной модели) методам определения скорости по массовому балансу (r_{MB} и r_{MBn}). Обусловлена пренебрежением массой газа в камере двигателя при определении скорости по массовому балансу. Устраняется применением методов толщина/время (r_{tot} , r_{totn} , и r_{HG}). Может быть скорректирована путем учета массы газа в камере двигателя, но остается неизвестная остаточная ошибка из-за необходимого допущения, что камера сгорания находится при температуре пламени.

Ошибки из-за переменной давления в двигателе и из-за неучета массы газа в камере двигателя, будучи приблизительно пропорциональными давлению, приводят к нелинейности в данных, представленных в логарифмических координатах скорость — давление. Эта нелинейность является причиной того, что появляется слабая зависимость от давления измеренного показателя степени n при давлении.

Итерационная комбинированная методика толщина/время (r_{HG}) лишена всех вышеперечисленных ошибок, что позволяет получать данные с точностью до разрешающей способности по времени исходных расчетных данных.

Уровни ошибок в полученных данных по скорости горения заметно меньше, чем ожидаемая погрешность при работе реальных двигателей. Непосредственные измерения подтверждают, что скорость горения в небольших по размеру двигателях обычно на $\approx 5\%$ меньше, чем в крупномасштабных двигателях. Следует также учесть, что мы работали с *математи-*

ческими моделями, в которых не учтены некоторые явления, происходящие в реальных двигателях.

В частности, в программе численного моделирования предполагалось мгновенное воспламенение в адиабатических условиях с последующим мгновенным переходом к горению в равновесных условиях для основной массы топлива. В случае реальных топлив и двигателей тепловые потери и переходные процессы, связанные с развитием равновесного горения, удлиняют стадию начального роста давления в двигателе в 2–5 раз. Более медленная скорость нарастания давления приведет к увеличению ошибки из-за переменной давления в двигателе примерно во столько же раз. Аналогичные переходные явления будут удлинять процесс погасания, повышая ошибку из-за неучета массы газа в камере двигателя.

Замечание, что обе ошибки ведут к занижению скорости горения, заставляет предполагать, что они могут вносить более значительный вклад в наблюдаемый масштабный фактор скорости, чем это показано в данной работе.

По этим причинам представляются обоснованными попытки дальнейших исследований моделей, более приближенных к реальности.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Детали методик расчета и результаты

В таблице П0 даны значения моментов времени, используемых для обработки исходных данных. Определения приведены выше в тексте статьи. На рис. П1–П5 схематично представлены алгоритмы пяти исследованных методик получения скорости горения. В соответствующих таблицах, использующих данные RR3, приведены результаты, полученные с помощью этих методик.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fry R. S.** (Private communication) NATO working group burning rate measurement analysis // JHU/CPIA, NATO RTO WG27: Burning Rate Measurement, 22 October 1998.
2. **Hessler R. O. and Glick R. L.** Simulated motor data: group 1 concentric bore, group 2 offset bore // Note to NATO RTO WG27: Burning Rate Measurement, October 1998.
3. **Hessler R. O. and Glick R. L.** A ballistic prediction for burning rate motors with non-instantaneous burnout // Ibid.

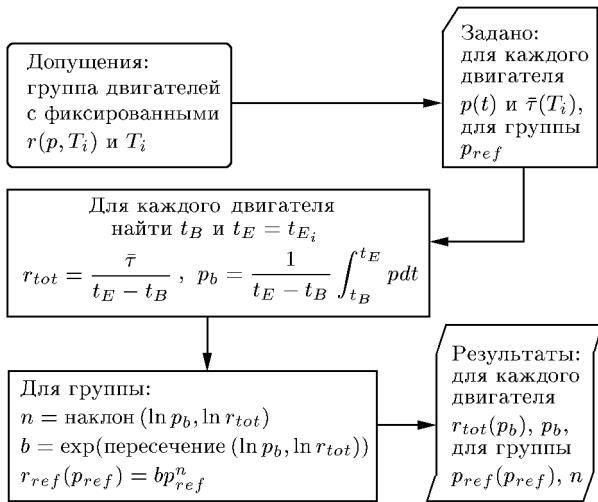


Рис. П.1. Алгоритм метода определения скорости горения по соотношению толщина/время (r_{tot}): простейший и наиболее фундаментальный метод определения скорости горения

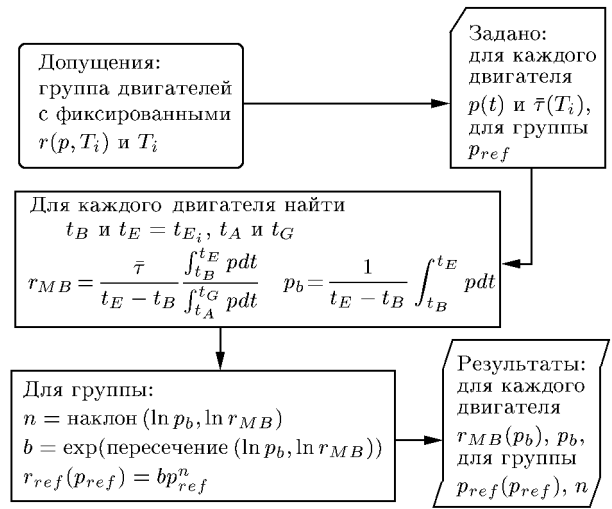


Рис. П.3. Алгоритм метода определения скорости горения по массовому балансу (r_{MB}): отличается от метода r_{tot} определением точки начала и конца работы двигателя и включением отношения интегралов в определение скорости горения

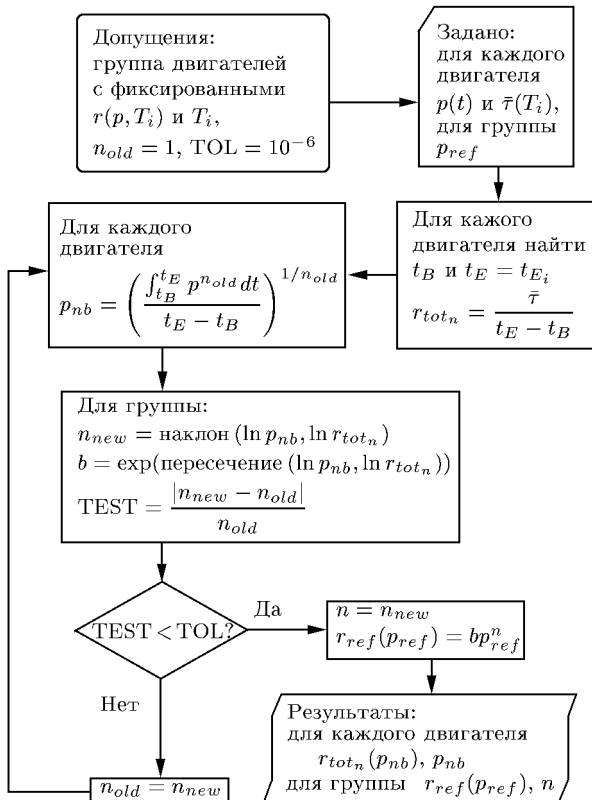


Рис. П.2. Алгоритм метода итерационного определения скорости горения по соотношению толщина/время (r_{totn}):

отличается от метода r_{tot} использованием p_{nb} в качестве характеристического давления и применением итераций для определения показателя степени n ; итерации обычно сходятся за 4 шага

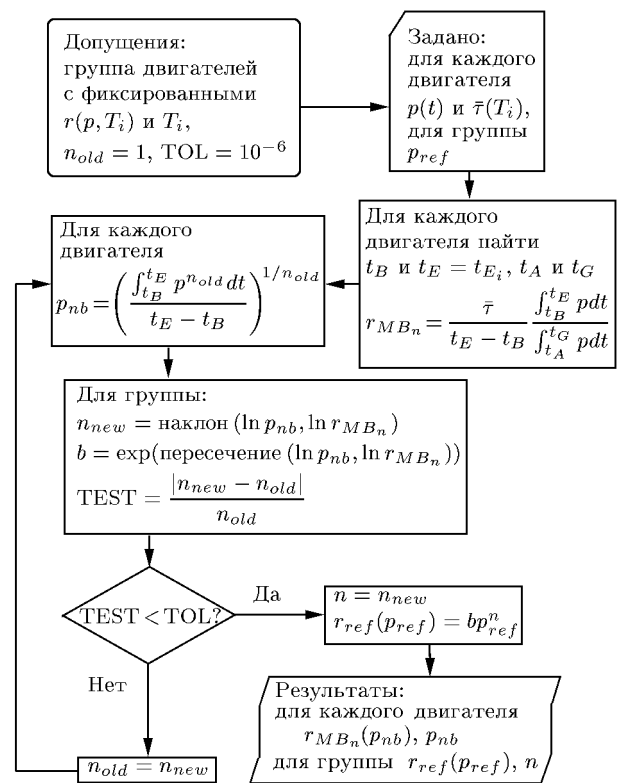


Рис. П.4. Алгоритм итерационного определения скорости горения по массовому балансу (r_{MBn}):

отличается от метода r_{MB} использованием p_{nb} в качестве характеристического давления и применением итераций для определения показателя степени n

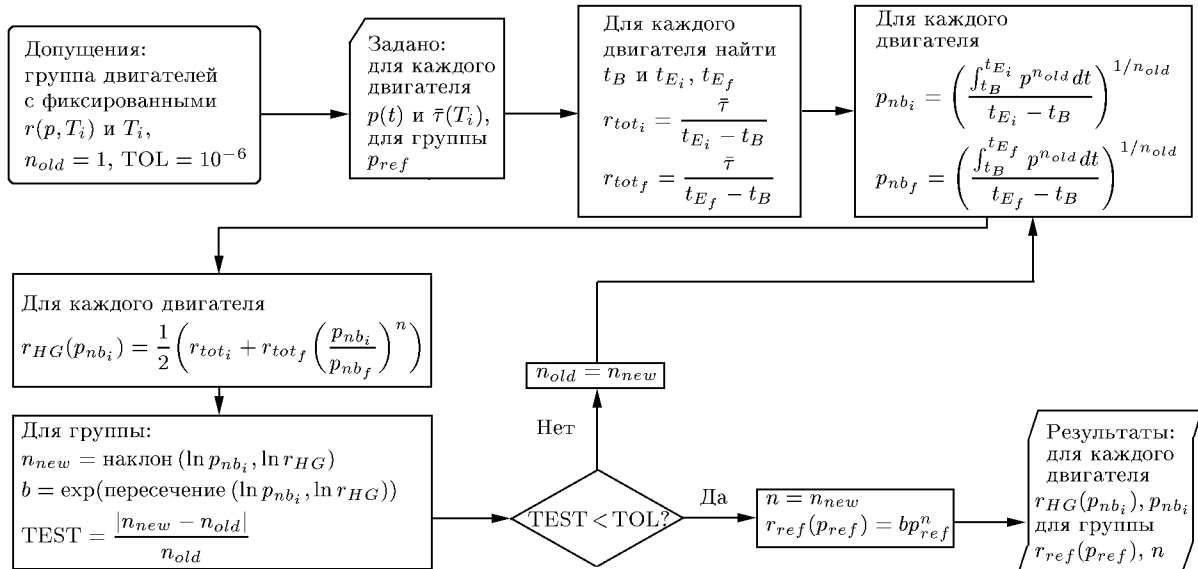


Рис. П.5. Алгоритм комбинированного метода итерационного определения скорости горения по соотношению толщина/время (r_{HG}):

отличается от метода r_{tot_n} включением результатов второго измерения, основанного на времени конца погасания t_{E_f} , и использованием промежуточной корректировки второго измерения на давление p_{nb_i}

Таблица П0

Характеристические временные точки,
использованные для обработки данных по давлению

Вариант	t_A, c	t_B, c	t_{E_i}, c	t_{E_f}, c	t_G, c
Группа 1					
1	0,00005	0,00005	1,30565	1,30565	1,32235
2	0,00005	0,00005	1,17135	1,17135	1,19475
3	0,00005	0,00005	1,05105	1,05105	1,08365
4	0,00005	0,00005	0,94375	0,94375	0,98885
5	0,00005	0,00005	0,84795	0,84795	0,91025
Группа 2					
6	0,00005	0,00005	1,29575	1,32055	1,32865
7	0,00005	0,00005	1,16245	1,18375	1,19865
8	0,00005	0,00005	1,04305	1,06135	1,08595
9	0,00005	0,00005	0,93655	0,95245	0,99025
10	0,00005	0,00005	0,84155	0,85545	0,91105

Таблица П1

Результаты обработки с помощью методики определения скорости горения по соотношению толщина/время (r_{tot}): $r_7 = r_{ref}$ ($p_{ref} = 7$ МПа)

Вариант	Группа 1		Вариант	Группа 2	
	r_{tot} , мм/с	p_{b_i} , МПа		r_{tot} , мм/с	p_{b_i} , МПа
1	9,7273	3,4292	6	9,8017	3,4300
2	10,8427	4,8385	7	10,9257	4,8394
3	12,0837	6,8258	8	12,1764	6,8271
4	13,4577	9,6099	9	13,5611	9,6114
5	14,9782	13,5035	10	15,0921	13,5052

Примечание. Результат по группе 1: $n = 0,31492$, $a = 6,5990$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,1793$ мм/с. Результат по группе 2: $n = 0,31493$, $a = 6,6491$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,2718$ мм/с.

Таблица П2

Результаты обработки с помощью итерационной методики определения скорости горения по соотношению толщина/время (r_{tot_n}): $r_7 = r_{ref}$ ($p_{ref} = 7$ МПа)

Вариант	Группа 1		Вариант	Группа 2	
	r_{tot_n} , мм/с	p_{nb_i} , МПа		r_{tot_n} , мм/с	p_{nb_i} , МПа
1	9,7273	3,4251	6	9,8017	3,4258
2	10,8427	4,8306	7	10,9257	4,8315
3	12,0837	6,8103	8	12,1764	6,8115
4	13,4577	9,5792	9	13,5611	9,5805
5	14,9782	13,4427	10	15,0921	13,4438

Примечание. Результат по группе 1: $n = 0,31568$, $a = 6,5948$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,1894$ мм/с. Результат по группе 2: $n = 0,31569$, $a = 6,6448$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,2821$ мм/с.

Таблица П3

Результаты обработки с помощью методики определения скорости горения по массовому балансу (r_{MB}): $r_7 = r_{ref}$ ($p_{ref} = 7$ МПа)

Вариант	Группа 1		Вариант	Группа 2	
	r_{MB} , мм/с	p_{b_i} , МПа		r_{MB} , мм/с	p_{b_i} , МПа
1	9,6978	3,4292	6	9,6996	3,4300
2	10,7958	4,8385	7	10,7978	4,8394
3	12,0102	6,8258	8	12,0123	6,8271
4	13,3416	9,6099	9	13,3436	9,6114
5	14,7937	13,5035	10	14,7955	13,5052

Примечание. Результат по группе 1: $n = 0,30821$, $a = 6,6386$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,0933$ мм/с. Результат по группе 2: $n = 0,30817$, $a = 6,6398$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,0946$ мм/с.

Таблица П4

Результаты обработки с помощью итерационной методики определения скорости горения по массовому балансу (r_{MBn}): $r_7 = r_{ref}$ ($p_{ref} = 7$ МПа)

Вариант	Группа 1		Вариант	Группа 2	
	r_{MBn} , мм/с	p_{nb_i} , МПа		r_{MBn} , мм/с	p_{nb_i} , МПа
1	9,6978	3,4251	6	9,6996	3,4258
2	10,7958	4,8305	7	10,7978	4,8314
3	12,0102	6,8101	8	12,0123	6,8113
4	13,3416	9,5788	9	13,3436	9,5801
5	14,7937	13,4418	10	14,7955	13,4430

Примечание. Результат по группе 1: $n = 0,30896$, $a = 6,6344$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,1032$ мм/с. Результат по группе 2: $n = 0,30893$, $a = 6,6355$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,1046$ мм/с.

Таблица П5

Результаты обработки с помощью итерационной комбинированной методики определения скорости горения по соотношению толщина/время (r_{HG}): $r_7 = r_{ref}$ ($p_{ref} = 7$ МПа)

Вариант	Группа 1		Вариант	Группа 2	
	r_{HG} , мм/с	p_{nb_i} , МПа		r_{HG} , мм/с	p_{nb_i} , МПа
1	9,7273	3,4251	6	9,7280	3,4258
2	10,8427	4,8306	7	10,8434	4,8315
3	12,0837	6,8103	8	12,0849	6,8115
4	13,4577	9,5792	9	13,4590	9,5805
5	14,9782	13,4427	10	14,9783	13,4438

Примечание. Результат по группе 1: $n = 0,31568$, $a = 6,5948$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,1894$ мм/с. Результат по группе 2: $n = 0,31568$, $a = 6,5950$ мм/(с·МПаⁿ), $r_7 = 12,1896$ мм/с.

- Hessler R. O. Minimizing the snowflake effect in burning rate measurement // Burning Rate Measurement Workshop, JANNAF Combustion Meeting, NASA Marshall Center, October 1995.
- Hessler R. O. and Glick R. L. Comparisons of burning rate calculation methods // JANNAF Combustion Meeting, West Palm Beach, October 1997.
- Brimhall K., circa 1980, in Brooks W. T. "Workshop Report: Burn Rate Determination Methodology", CPIA Publication 347, V. II, October 1981, P. 183–191, Brimhall's method was included, dating the definition as about 1980.
- Rivkin S. Rocket motor end-of burn analysis // JANNAF Combustion Meeting, 1990.
- Hessler R. O. and Glick R. L. Behavior of pressure derivatives during burnout of simulated rocket motors // JANNAF Combustion Meeting, West Palm Beach, October 1997.
- Hessler R. O. An analysis of burning rate round-robin data // Ibid.
- Hessler R. O. and Glick R. L. Consistent definitions for burning rate measurement in solid propellant motors // Intern. Workshop on Measurement of Thermophysical and Ballistic Properties of Energetic Materials, Milano, June 1998.
- Brooks W. T. A method for more reproducible burning rate determination // J. Spacecraft and Rockets. 1970. V. 7, N 12.
- Whitney C. K., Owens T. F., Paskind J., and Rubin M. B. Scout motor performance and prediction study (PAPS) // NASA-CR-336, NASA Langley Research Center, December 1965.
- Brock F. H. Average burn rate, average pressure relationships in solid rockets // J. Spacecraft and Rockets. 1966. V. 3. P. 1802–1803.
- Glick R. L. Reduction of solid rocket data when pressure-time history is non-neutral // J. Spacecraft and Rockets. 1975. V. 12, N 6. P. 383–384.

Поступила в редакцию 26/VII 1999 г.