

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА МАРШЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАЗГОННЫХ БЛОКОВ ДМ КАК ТИПОВАЯ ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

© 2018 г. Киренков В.В., Микитенко В.Г., Сирош А.Н.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Одним из важнейших параметров средств выведения (в т.ч. и разгонных блоков ДМ), подлежащих определению по результатам летных испытаний, является параметр $P_{уд}$ — фактическое значение удельного импульса маршевой двигательной установки. Значимость этого параметра обусловлена тем, что, с одной стороны, от него зависит выполнение требований тактико-технического задания по массе выводимого полезного груза, а с другой — он является одним из основных диагностических характеристик двигательных установок.

Традиционным, наиболее распространенным методом решения такой задачи в условиях, когда невозможны прямые измерения этого параметра, является использование классической формулы Циолковского с привлечением данных массово-веса анализа. Практика показывает, однако, что такой метод из-за невысокой достоверности последних не обеспечивает требуемых точностей оценки $P_{уд}$, а в ряде случаев вообще оказывается неприменимым.

В настоящей статье показано, как использование особенностей механики тел переменной массы позволяет решить такую задачу. Это достигается постановкой классической обратной задачи, где массовые характеристики воспринимаются не в качестве исходных данных, а как возмущающие, относительно расчетных, факторы.

Рассмотренная методология — составление и решение обратных задач — может быть рекомендована и для других подобных задач оценки результатов испытаний, когда невозможны прямые измерения контролируемых параметров. Она применялась для оценки $P_{уд}$ для блоков, аналогичных ДМ, а также параметров другого физического смысла, по которым при имеющемся составе измерений оказалось возможным сформулировать обратную задачу.

Ключевые слова: разгонный блок, массовые характеристики, удельный импульс, обратная задача.

DETERMINING THE ACTUAL VALUES OF SPECIFIC IMPULSE FOR THE MAIN ENGINES OF THE BLOCK DM UPPER STAGES AS A ROUTINE INVERSE PROBLEM

Kirenkov V.V., Mikitenko V.G., Sirosh A.N.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

One of the most important parameters for space launcher vehicles (including Block DM upper stages) to be determined from flight test results is P_{sp} , which is the actual value of the main engine specific impulse. The importance of this parameter lies in the fact that, on the one hand, it is what meeting the upmass performance requirements depends on, and on the other hand, it is one of the main diagnostic parameters of propulsion systems.

Traditionally, the most common method for solving such a problem under conditions where direct measurements of this parameter are impossible is the use of the classical Tsiolkovsky formula with inputs from mass-weight analysis. However, experience has shown

that this method, due to the low accuracy of such inputs does not provide the required accuracy of the P_{sp} estimates, and in some cases is not applicable at all.

This paper shows how the use of some peculiar aspects of the variable-mass mechanics permits to solve such a problem. This is achieved through stating a classical inverse problem where mass properties are treated not as inputs, but rather as perturbing factors with respect to design values.

The discussed methodology of stating and solving inverse problems can also be recommended for other similar problems in evaluating test results when direct measurements of monitored parameters are impossible. It was used for evaluating P_{sp} for upper stages similar to Block DM, as well as parameters with other physical meaning, for which the available measurements made it possible to state an inverse problem.

Key words: upper stage, mass properties, specific impulse, inverse problem.



КИРЕНКОВ В.В.



МИКИТЕНКО В.Г.



СИРОШ А.Н.

КИРЕНКОВ Вениамин Васильевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник РКК «Энергия»

KIRENKOV Veniamin Vasilyevich — Candidate of Science (Engineering), Lead research scientist at RSC Energia

МИКИТЕНКО Валериан Григорьевич — заместитель начальника отдела РКК «Энергия», e-mail: valerian.mikitenko@rsce.ru

MIKITENKO Valerian Grigoryevich — Deputy Head of Department at RSC Energia, e-mail: valerian.mikitenko@rsce.ru

СИРОШ Андрей Николаевич — ведущий инженер-программист РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru

SIROSH Andrey Nikolaevich — Lead software engineer at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

Введение. Исходная математическая модель

Есть основания считать удельный импульс $P_{уд}$ одним из параметров, необходимых как для оценки состояния двигательной установки (ДУ) в режиме функционального диагноза [1], так и для выполнения требований технического задания на разгонный блок (РБ) по массе полезного груза. В качестве исходной математической модели определения $P_{уд}$ может быть принята известная формула Циолковского [2, 3] для прироста кажущейся скорости при движении РБ в пустоте (влиянием изменения силы тяжести для условий полета РБ можно пренебречь, как величиной второго порядка малости):

$$W = P_{уд} \ln \frac{M_0}{M_k} = P_{уд} \ln \frac{M_0}{M_0 - \int_{t_0}^t \dot{M} dt}, \quad (1)$$

где $W = W_t - W_0$ — прирост кажущейся скорости в интервале времени $(t - t_0)$; $P_{уд}$ — подлежащий оценке удельный импульс ДУ; M , M_0 , M_k — текущая, начальная и конечная массы блока, соответственно; $\dot{M} = dM/dt$ — секундный расход массы.

Традиционным, обычно используемым на практике, методом определения $P_{уд}$ (назовем его прямым) является следующее соотношение:

$$P_{уд} = \frac{W_t - W_0}{\ln \frac{M_0}{M_t}}. \quad (2)$$

Для реализации этого соотношения имеются следующие данные и телеметрические измерения. Прямые измерения прироста кажущейся скорости $W_t - W_0$ на разгонных блоках ДМ последних модификаций (ДМ-SL, ДМ-SL Б) не предусмотрены, и для их определения требуется пересчет других телеметрируемых параметров СУ. Значения начальной

M_0 и конечной $M_t = M_0 - \int_{t_0}^t \dot{M} dt$ масс могут

быть определены только по данным массового анализа (полетно-массовая сводка (ПМС)) и измерений расходов обоих компонентов топлива системой управления маршевым двигателем (СУМД). Громоздкость и невысокая точность проведения такого массового анализа определяется целым рядом факторов [3]. Например, необходимостью определения текущих плотностей компонентов топлива (среднебаковых или на входе в ДУ), что вызывает целый ряд как методических трудностей, так и трудностей обеспечения необходимых измерений. В ряде же случаев конструкция РБ вообще не представляет возможным обеспечить необходимые измерения массовых и расходных данных.

$$\frac{\partial W}{\partial P_{уд}} \delta P_{уд} + \frac{\partial W}{\partial M_0} (\delta M_0 - \delta \dot{M}_c) = \Delta W - P_{уд} \frac{\int_{t_0}^t \Delta \dot{M}_c dt}{M} = \Delta W_{прив}. \quad (3)$$

Здесь $\Delta \dot{M}_c$, $\delta \dot{M}_c = \Delta \dot{M}_c / \dot{M}$ — возмущения по переменной (вследствие регулирования и других причин) и постоянной вариациям секундного расхода относительно расчетного \dot{M} , соответственно; W — расчетный прирост кажущейся скорости; M — расчетная масса РБ.

Левая часть соотношения (3) свидетельствует о характерной особенности механики тел переменной массы — эквивалентности в линейной постановке возмущений по начальной массе δM_0 и постоянной составляющей секундного расхода $\delta \dot{M}_c$. Ввиду этого в дальнейшем они могут быть объединены в одно приведенное (назовем его массово-расходным) возмущение $\delta M = \delta M_0 - \delta \dot{M}_c$ [3]. Эта особенность, не позволяя проведения раздельной оценки возмущений по M_0 и M , в то же время весьма благоприятно сказывается на точности оценки ключевого параметра $P_{уд}$, поскольку позволяет понизить порядок системы (3) с трех до двух. С учетом этого замечания принимаем два следующих ключевых параметра, характеризующих возмущение кажущегося движения, — $\delta P_{уд}$ и δM .

1. Уравнение возмущенного движения и обратная задача

Сказанное выше обуславливает невысокую точность метода определения $P_{уд}$, основанного на весовом (массовом) анализе и прямом использовании формулы Циолковского (2). Его погрешности, как показывает практика, соизмеримы или даже могут превышать его возможный естественный разброс в несколько единиц $P_{уд}$. Это требует поиска других методов его определения, и одним из возможных путей является обращение к методологии обратных задач [4, 5]. Возможность и целесообразность такого пути применительно к рассматриваемой задаче в общем виде показаны в работе [3].

Математическая модель такой обратной задачи строится на определении возмущенных, относительно расчетных, параметров движения, соответствующих соотношению (1). Приняв в качестве этих параметров прироста кажущейся скорости $W = W_t - W_0$ на интервале $(t - t_0)$, получим следующее соотношение для их вариации ΔW [3]:

Методология решения поставленной задачи состоит в определении по возмущенным параметрам $\Delta W_{прив}$ не только вариации $\delta P_{уд}$, но и функционально связанных с ним вариаций массово-расходных характеристик δM_0 , $\delta \dot{M}_c$, оценка которых по прямым измерениям и данным ПМС, как указывалось выше, не обладает необходимой точностью. Предполагается, что на интервале $(t - t_0)$ можно составить n соотношений типа (3).

Дальнейший путь их определения состоит в использовании классической методологии решения обратных задач — метода «квазирешений» [3–5], который в рассматриваемой задаче аналогичен стандартному методу наименьших квадратов. Его алгоритм решения определяется следующим матрично-векторным соотношением:

$$\delta \mathbf{Y} = (F^T F)^{-1} F^T \Delta \mathbf{Z}, \quad (4)$$

где $\delta \mathbf{Y}(2 \times 1) = \begin{bmatrix} \delta P_{уд} \\ \delta M \end{bmatrix}$ — вектор оцениваемых параметров (компоненты вектора ясны из соотношения (8)); $F(n \times 2)$ и $\Delta \mathbf{Z}(n \times 1)$ — матричный оператор и вектор правых частей

(данных измерений), определяемые правыми и левыми частями соотношения (3), соответственно.

2. Особенности решения обратной задачи для РБ типа ДМ-SL, ДМ-SL Б

Соотношения типа (3) с вариациями кажущейся скорости W могут быть составлены для первых модификаций разгонных блоков ДМ, где задачи точности выведения решались классическими системами нормальной и боковой стабилизации и регулирования кажущейся скорости с соответствующими телеметрическими измерениями. Для блоков ДМ-SL, ДМ-SL Б уравнение в вариациях целесообразно составить не относительно этих данных, по которым не предусмотрены прямые измерения, а относительно адекватных им параметров системы терминального наведения t_{gq} . Эти параметры, регистрируемые в цифровом потоке комплекса программ управлением движением (КПУД), определяют расчетный вес израсходованного топлива в секундах работы маршевого двигателя при номинальном расходе, необходимые для достижения измеренного прироста кажущейся скорости W , и вычисляются следующим образом:

$$t_{gq} = T(1 - e^{-W/U}), \tag{5}$$

где $T = M_0 / \dot{M}_{ном}$; $U = P_{уд} g$ — скорость истечения.

Невязки расчетного и фактического приростов времени t_{gq} позволяют, по аналогии с формулой (3), составить n условных уравнений относительно оцениваемых параметров:

$$\frac{\partial t_{gq}}{\partial P_{уд}} \delta P_{уд} + \frac{\partial t_{gq}}{\partial M_0} \delta \bar{M} = \Delta t_i - \Delta t_{gqi} + \int_{t_0}^{t_i} \frac{\Delta \dot{M}_c}{\dot{M}_{ном}} dt = dT_{gq}, \tag{6}$$

где Δt_i , Δt_{gqi} — приросты фактического и расчетного времени t_{gq} относительно начального момента t_0 ; $\Delta \dot{M}_c$ — как и в соотношении (3), переменная составляющая отклонения массового расхода; dT_{gq} — приведенное к номинальному секундному расходу рассогласование действительного времени t и времени t_{gq} .

Поскольку как соотношение (6), так и (3) составлены в вариациях, целесообразно выражение, учитывающее относительное отклонение массового расхода от расчетного значения $\delta \dot{M} = \Delta \dot{M} / \dot{M}_{ном}$, определять не по измерениям расходов системы СУМД, непригодным для решения задачи в отклонениях, а по пропорционально связанным отклонениям давления ΔP_i от номинала датчика ДУ ДКС2, принимая $\Delta \dot{M}_c = \frac{d\dot{M}}{dP_i} \Delta P_i$.

Постоянная составляющая возникающей при этом ошибки влияет только на параметр $\delta \bar{M}$, а случайные составляющие полагаются идентичными.

Составив в интервале времени $(t - t_0)$ n уравнений типа (3) или (6), определив выражения для входящих в них частных производных [3] и введя обозначения:

$$\partial W / \partial P_{уд} = W = A_i;$$

$$\partial W / \partial M_0 = -P_{уд} ((M_0 / M) - 1) = B_i - \text{для}$$

соотношения (3) и

$$\frac{\partial t_{gq}}{\partial P_{уд}} = -T \left(1 - \frac{t_{gq}}{T} \right) \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{t_{gq}}{T}} \right) = A_i; \tag{7}$$

$$\partial t_{gq} / \partial M_0 = t_{gq} = B_i - \text{для выражений (6), (7),}$$

получим систему нормальных уравнений, решение которых дается матричным соотношением (4). Оно сводится к линейной системе (2×2) алгебраических уравнений с правыми частями ΔZ , определяемыми значениями $\Delta W_{прив}$ и dT_{gq} :

$$\sum_1^n A_i^2 \delta P_{уд} + \sum_1^n A_i B_i \delta \bar{M} = \sum_1^n A_i \Delta W_{прив} (dT_{gqi}), \tag{8}$$

$$\sum_1^n A_i B_i \delta P_{уд} + \sum_1^n B_i^2 \delta \bar{M} = \sum_1^n B_i \Delta W_{прив} (dT_{gqi}).$$

3. Анализ точностных характеристик метода

3.1. Систематические ошибки. Основными систематическими ошибками, определяющими вариации правой части соотношений (3) и (6), являются сдвиг нуля измерений отклонения давления δP_i , инструментальные ошибки δW_i акселерометров, измеряющих приросты кажущейся скорости, и подлежащие контролю функционально связанные с ними параметры терминального наведения Δt_{gqi} . Поскольку при этом ошибки в определении dT_{gq} пропорциональны весовым коэффициентам B и A , то происходит «расщепление» влияния этих ошибок на параметры $\delta P_{уд}$ и $\delta \bar{M}$, а именно:

$$\delta P_{уд} \approx \delta W_i; \delta \bar{M} \approx -\delta P_i. \tag{9}$$

Отсюда следует, что с точки зрения влияния систематических ошибок определение удельного импульса $P_{уд}$ находится в весьма благоприятном положении — на него влияют только ошибки командных акселерометров δW_i , составляющие весьма малые величины — порядка сотых долей процента [3].

3.2. Случайные ошибки. Эквивалентность массовых и расходных возмущений, позволившая понизить порядок системы условных уравнений метода наименьших квадратов (8) с 3 до 2, дает возможность использовать известную в линейной алгебре методологию учета влияния случайных ошибок путем оценки обусловленности этой системы. Ее принято характеризовать числом Тодда H , которое в функции собственных значений такой линейной системы λ выражается следующим образом [3]:

$$H = \sqrt{\frac{\max \lambda}{\min \lambda}}. \quad (10)$$

Собственные значения λ (max и min) определяются решением следующего характеристического уравнения:

$$\left(\sum_1^n A_i^2 - \lambda\right)\left(\sum_1^n B_i^2 - \lambda\right) - \left(\sum_1^n A_i B_i\right)^2 = 0. \quad (11)$$

На рис. 1 показана зависимость числа Тодда H от относительной конечной массы μ_k (при $n \gg 2$).

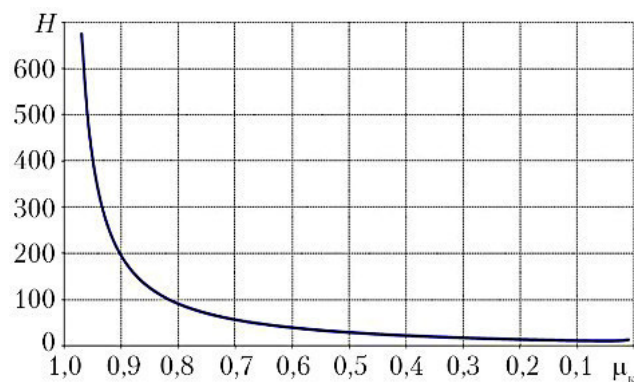


Рис. 1. Зависимость числа Тодда H матрицы системы нормальных уравнений в функции от относительной конечной массы μ_k

Из представленных данных может быть сделан вывод, что эффект подавления случайных ошибок может быть достигнут только при $\mu_k \leq 0,5...0,6$, так как только при этих значениях происходит «затухание» функции $H(\mu_k)$. Это условие определяет ограничение метода, что является своего рода «платой» за отказ использовать прямые массово-расходные данные. Поэтому на коротких по времени активных участках, где μ_k может быть близко к 1, рассматриваемый метод неприменим.

Статистика применения рассмотренного метода для средств выведения различных типов показала, что при выполнении условий этого раздела по составу и конечной массе ($\mu_k \leq 0,5...0,6$) его достоверность составляет примерно $\pm 0,3\%$ от номинала.

4. Примеры опытных данных

На рис. 2–4 в качестве примеров показаны фактические и аппроксимированные реализации приведенных рассогласований dT (соотношение (6)) для трех блоков ДМ-SL: № 9, 15 и 22. В соответствии с требованиями, вытекающими из данных разд. 3 (обеспечение min обусловленности), оценки для этих РБ производились на втором включении маршевого двигателя (МД).

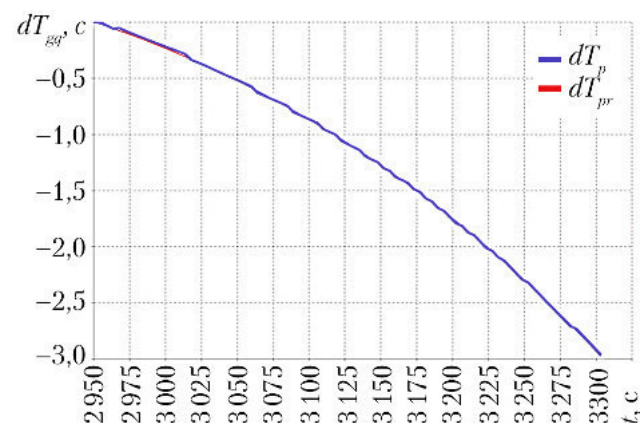


Рис. 2. РБ ДМ-SL № 9Л. Второе включение маршевого двигателя. Фактические (dT_p) и аппроксимированные (dT_{pr}) значения вариации израсходованного топлива

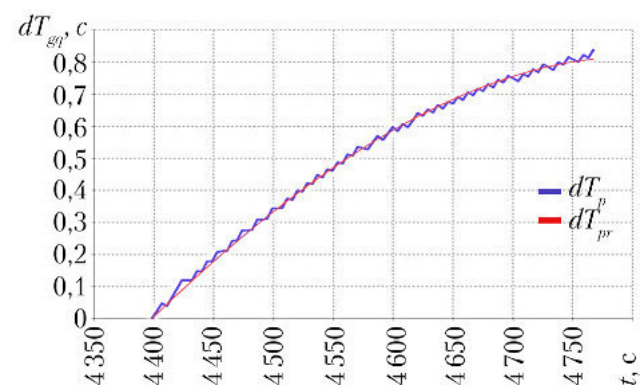


Рис. 3. РБ ДМ-SL № 15Л. Второе включение маршевого двигателя. Фактические (dT_p) и аппроксимированные (dT_{pr}) значения вариации израсходованного топлива

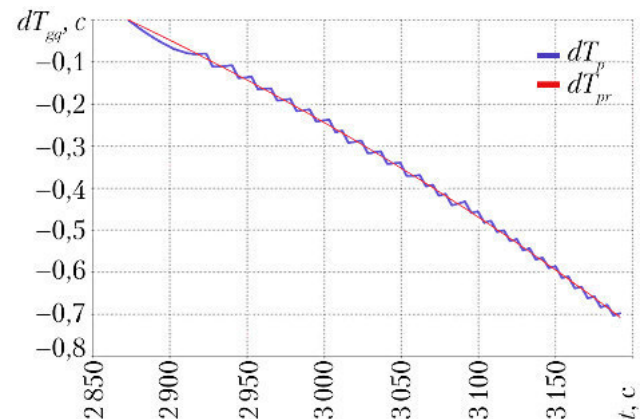


Рис. 4. РБ ДМ-SL № 22Л. Второе включение маршевого двигателя. Фактические (dT_p) и аппроксимированные (dT_{pr}) значения вариации израсходованного топлива

Приведенные рассогласования, имеющие на всех РБ отрицательную кривизну, свидетельствуют о дефиците $P_{уд}$. Этот дефицит для РБ № 9 составил $\Delta P_{уд} = -1,5\%$; для РБ № 15 — $\Delta P_{уд} = -0,5\%$; для РБ № 22 — $\Delta P_{уд} = -0,15\%$.

Полученные отклонения на представленных блоках (кроме РБ № 9) находятся в пределах допустимых разбросов $\pm 2,5$ с.

Помимо РБ типа ДМ настоящая методология оценки удельного импульса нашла применение и при оценке испытаний других РБ, функционирующих на безатмосферном участке. Проведенные оценки позволили получить как статистические характеристики $P_{уд}$, так и выявить имевшие место единичные аномальности типа приведенных выше данных по РБ ДМ-SL № 9.

5. Технология проведения расчетов, основные разделы программного обеспечения

Представленная методология предполагает следующий порядок проведения расчетов по оценке $P_{уд}$ для РБ типа ДМ-SL, ДМ-SL Б.

5.1. Анализ на обусловленность каждого из предусмотренных циклограммой запусков разгонного блока. Исходные данные для этого — ПМС РБ и зависимость $H(\mu_k)$, представленная на рис. 1. Данное включение считается пригодным для оценки $P_{уд}$ по представленной методике при $\mu_k \leq 0,5 \dots 0,6$. Это условие необходимо для подавления влияния случайных ошибок на результат.

На РБ типа ДМ-SL, ДМ-SL Б условие по μ_k реализуется только на одном из включений; на однотипном по конструкции и системе управления РБ ДМ-03 (11С861-03) — на втором и третьем. Проведение оценки на двух включениях дает дополнительную оценку достоверности полученного результата.

5.2. Выбор начального (опорного) момента времени t_0 . В качестве начального времени t_0 принимается момент времени регистрации текущего значения параметра t_{gq} в цифровом потоке КПУД, ближайшем после окончания переходных процессов по запуску МД (команда ЗДУ) ($t_0 \approx \text{ЗДУ} + 7$ с).

5.3. Вычисление текущих значений коэффициентов A_i и B_i системы условных уравнений (8). Коэффициенты A_i и B_i системы уравнений (8) вычисляются в соответствии с соотношениями (7) для каждого момента времени формирования параметра t_{gq} в составе кадра КПУД.

При вычислении параметра $T = M_0 / \dot{M}_{ном}$ начальная масса M_0 принимается расчетной для выбранного момента времени t_0 , значение $\dot{M}_{ном}$ — равным номинальному секунднему расходу.

5.4. Удаление сбойной (недостоверной) ТМИ, используемой при расчетах. Как следует из приведенной методики для РБ типа ДМ-SL, ДМ-SL Б, предполагается использование следующей ТМИ:

- цифровой — по параметру t_{gq} от момента времени t_0 и до последнего кадра КПУД на активном участке выбранного включения;
- аналоговой — по параметру ДКС2 в этом же интервале времени.

Сбойная информация должна быть или удалена, или восстановлена известными методами интерполяции (например, использованием интерполяционного полинома Лагранжа – Сильвестра).

5.5. Вычисление приведенного к расчетному значению $\dot{M}_{ном}$ вариации интервала времени t_{gq} . Вариации этого интервала dT_{gqi} вычисляются по соотношению (6).

5.6. Составление и решение системы нормальных уравнений. Заключительная процедура методики — определение отклонения удельного импульса $\delta P_{уд}$ путем решения системы нормальных уравнений 2-го порядка (8).

6. Заключение

Рассмотренная в настоящей статье методология решения одной из типовых обратных задач диагностики по результатам испытаний изделий типа ДМ-SL, ДМ-SL Б — определение удельного импульса маршевой ДУ разгонного блока — имеет ряд несомненных преимуществ по сравнению с традиционными прямыми методами. Основные из них:

- Не требуется проведения часто недостоверного, а иногда и вообще невозможного массового (весового) анализа РБ.

- Существенное повышение достоверности (точности) результата при использовании штатных измерений ТМИ и обеспечении обычно выполнимого для средств выведения условия по значению относительной конечной массы РБ — при $\mu_k \leq 0,5 \dots 0,6$.

- Преимущество разработанного метода на базе классических методов решения обратных задач подтверждено большой положительной статистикой натурных испытаний разгонных блоков различных типов. Такая статистика позволила сделать

эмпирическую оценку точности метода при выполнении этих условий — примерно $\pm 1,0$ с.

• Приведенные данные свидетельствуют о целесообразности обращения к классической методологии решения обратных задач, когда при испытаниях изделий ракетно-космической техники возникает необходимость определения таких параметров и характеристик, по которым невозможно проведение прямых измерений.

Список литературы

1. Пархоменко П.П. (ред.). Основы технической диагностики. Кн. 1. М.: Энергия, 1976. 464 с.

2. Колесников К.С. Динамика ракет. М.: Машиностроение, 1980. 376 с.

3. Гришин В.Н., Киренков В.В. Решение одной из типовых обратных задач при испытаниях изделий ракетно-космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2010. №3(60). С. 148–156.

4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.

5. Кabanikhin S.I. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.

Статья поступила в редакцию 09.11.2017 г.

Reference

1. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki. Kn. 1* [Fundamentals of engineering diagnostics]. Ed. by Parkhomenko P.P. Moscow, Energiya publ., 1976. 464 p.

2. *Kolesnikov K.S. Dinamika raket* [Rocket dynamics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1980. 376 p.

3. *Grishin V.N., Kirenkov V.V. Reshenie odnoi iz tipovykh obratnykh zadach pri ispytaniyakh izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki* [Solution of one of the typical inverse problems during tests of rocket and space hardware]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2010, no. 3(60), pp. 148–156.

4. *Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods of solving ill-defined problems]. Moscow, Nauka publ., 1974. 224 p.

5. *Kabanikhin S.I. Obratnye i nekorrektnye zadachi* [Inverse and ill-defined problems]. *Novosibirsk, Siberian science publ.*, 2009. 457 p.