

# ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

УДК 681.518.3

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАЦИОНАРНЫХ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Каменский С.С.<sup>1</sup>, Мартиросов Д.С.<sup>1</sup>, Коломенцев А.И.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко»,  
ул. Бурденко, 1, Химки, 141400, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

\* e-mail: kaf202@mai.ru

---

Методами теории подобия получены безразмерные зависимости медленноменяющихся параметров (ММП) от уровня тяги, единые для жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) семейства РД170 — РД171М, РД180 и РД191. Приведен пример использования результатов работы для функциональной диагностики ЖРД.

*Ключевые слова:* теория подобия, результаты огневых испытаний ЖРД, функциональная диагностика.

---

### Введение

ЖРД семейства РД170 — разработанные в НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко» двигатели РД171М, РД180 и РД191 — работают на одних и тех же компонентах топлива, выполнены по схеме с дожиганием генераторного газа, с практически одинаковыми камерами сгорания, однотипными турбонасосными агрегатами (ТНА), агрегатами регулирования и пр.

Этим определено использование в данной работе теории подобия, предлагающей специально разработанные алгоритмы поиска подобия физических процессов, методы его описания и трактовки полученных результатов.

Целью работы является поиск подобия стационарных рабочих процессов в двигателях семейства

РД170. Формальным описанием подобия будут обобщающие функции, описывающие взаимосвязи параметров рабочих процессов, справедливые для всех трех типов ЖРД.

Практическая ценность полученных таким путем результатов вытекает непосредственно из постановки задачи: рассуждая в терминах теории подобия, можно утверждать, что распространение полученных зависимостей на вновь проектируемые изделия корректно лишь для подобных объектов.

Классическим примером прикладного значения таких результатов являются широко распространенные в инженерной практике методики проектирования масштабированием параметров подобного аналога, в основе которых лежат алгоритмы теории подобия.

Для анализа функционирования ЖРД выбран принцип «черного ящика» — работа двигателя описывается параметрами, полученными исключительно при его огневых испытаниях. Такой подход привлекателен своей объективностью и возможностью учесть все взаимосвязи сложных физических процессов в ЖРД.

В работе предложена процедура приведения данных испытаний к безразмерному виду и определены вид и характеристики обобщающих функций — зависимостей безразмерных параметров от уровня тяги, единых для всех трех типов двигателей.

В итоге приемы моделирования, прогнозирования и т.п., известные специалистам и широко используемые ими, получили в данной работе формализованную интерпретацию в терминах теории подобия.

Приведены примеры применения полученных обобщающих функций для расчета параметров ЖРД и в функциональной диагностике.

### Исходные данные

Исходными данными анализа являются результаты измерений медленноменяющихся параметров (ММП) при тридцати стендовых огневых испытаниях двигателей РД171М, РД180, РД191 по десять двигателей каждого типа.

Из данных каждого испытания выбраны стационарные режимы, на которых двигатели работали

на номинальных или близких к ним соотношениях компонентов топлива в камере сгорания.

Перечень медленноменяющихся параметров, используемых в анализе, приведен в табл. 1.

### Анализ измерений ММП ЖРД методами теории подобия

Для перехода от измеряемых медленноменяющихся параметров к рекомендуемой теорией подобия безразмерному виду в [1] использован метод подобного преобразования координат с применением в качестве масштабов характерных значений соответствующих величин.

В данном случае предлагается достаточно простая и физически понятная процедура: измерения нормируются по их значениям на номинальном режиме, определенном на данном испытании, и представляются как функции одного безразмерного параметра — текущего уровня тяги.

Индикатором найденного подобия, согласно основной теореме теории подобия [2], будет близость значений таких функций в точках одного уровня тяги для различных типов рассматриваемых ЖРД.

На рис. 1 в качестве примера приведены размерные значения массового расхода горючего через газогенератор (ГГ)  $G_{ГГ}$  и тяги двигателя в пустоте  $P_{П}$  для всех трех рассматриваемых двигателей, полученные на десяти огневых испытаниях каждого типа двигателя.

Таблица 1

Наименование и обозначение медленноменяющихся параметров

№	Наименование	Обозначение
1	Частота вращения вала ТНА	$n_{\text{ТНА}}$
2	Массовый расход окислителя на входе в двигатель	$G_{\text{ОК}}$
3	Массовый расход горючего через дроссель	$G_{\text{ДР}}$
4	Массовый расход горючего через газогенератор	$G_{\text{ГГ}}$
5	Давление горючего перед форсунками камеры	$P_{\text{ВХ СГ К}}$
6	Давление горючего на выходе из регулятора расхода	$P_{\text{ВЫХ РР}}$
7	Давление горючего на выходе из дросселя	$P_{\text{ВЫХ ДР}}$
8	Давление горючего на выходе из 2-й ступени насоса	$P_{\text{ВЫХ НГ2}}$
9	Давление горючего на выходе из 1-й ступени насоса	$P_{\text{ВЫХ НГ1}}$
10	Давление окислителя перед форсунками ГГ	$P_{\text{ВЫХ НО}}$
11	Температура газа после турбины в газовой камере	$T_{\text{ВХ ГАЗ}}$
12	Температура окислителя на входе в двигатель	$T_{\text{О ВХ ДВ}}$
13	Температура горючего перед форсунками камеры	$T_{\text{Г СГ К}}$
14	Температура горючего на входе в двигатель	$T_{\text{Г ВХ ДВ}}$
15	Тяга двигателя в пустоте	$P_{\text{П}}$

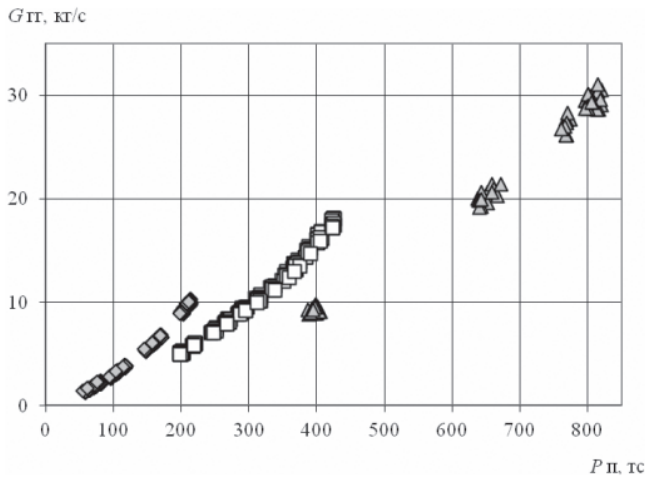


Рис. 1. Размерные значения расходов и тяги ( $G_{гг}$  и  $P_{п}$ ), измеренные на испытаниях двигателей:  $\blacklozenge$  — РД 191;  $\square$  — РД 180;  $\blacktriangle$  — РД 171М

Рисунок наглядно показывает, что поиск подобия на основе размерных данных невозможен. В соответствии с теорией подобия необходим анализ соотношений безразмерных величин, поэтому нормируем значения  $G_{гг}$  и  $P_{п}$ , выбрав за масштаб их значения на номинальном режиме данного испытания. Разделим измеренные значения  $X_i$  на  $i$ -м режиме испытания на значения, соответствующие измерениям на номинальном режиме  $X_{ном}$ , и результат  $\bar{X}_i$  выразим в процентах.

Совмещение полученных нормировкой безразмерных значений  $G_{гг}$  (%) и  $P_{п}$  (%) всех трех двигателей в единой системе координат приведено на рис. 2. Данные рисунка позволяют утверждать, что при каждом безразмерном значении тяги полученное значение безразмерного параметра с достаточной точностью совпадает для всех трех рассматриваемых двигателей.

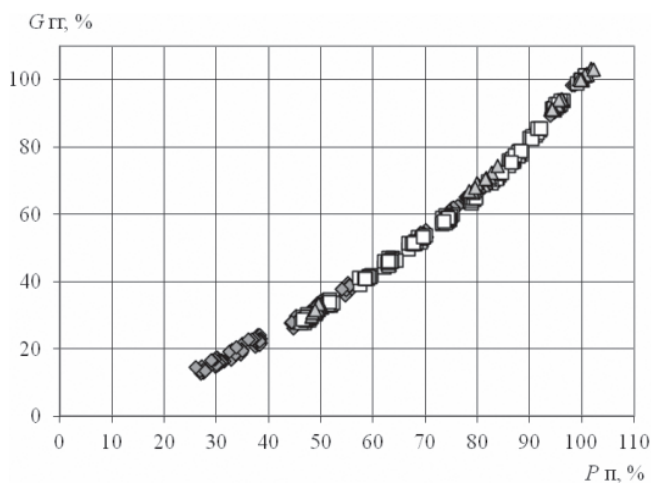


Рис. 2. Совмещенные безразмерные значения  $G_{гг}$  (%) и  $P_{п}$  (%):  $\blacklozenge$  — РД 191;  $\square$  — РД 180;  $\blacktriangle$  — РД 171М

Если применить описанную методику для всех ММП, указанных в табл. 1, то совмещение безразмерных данных как функций от уровня тяги для всех трех двигателей приведет к аналогичным результатам.

Таким образом, показано, что на основании анализа измерений ММП методами теории подобия можно определить обобщающие функции — зависимости безразмерных параметров от уровня тяги, составленные из ММП рабочих процессов, единые для всех трех двигателей.

Теория подобия физических объектов предлагает общий подход к интерпретации таких результатов: близость (в математической постановке — тождественность) уравнений, описывающих поведение безразмерных характеристик сравниваемых объектов свидетельствует о физическом подобии описываемых этими уравнениями процессов. Следовательно, получение обобщающих зависимостей отражает ожидаемое, как отмечалось выше, физическое подобие стационарных рабочих процессов в конструктивно преемственных двигателях семейства РД170.

Полученные обобщающие функции представлены в виде полиномов второй степени в табл.2.

### Пример применения обобщающих функций для расчета ММП ЖРД

Иллюстрацией возможностей, которые предоставляют специалисту описанные выше вид и характеристики обобщающих функций, может служить следующий численный эксперимент.

Чтобы рассчитать размерное значение какого-либо параметра для конкретного уровня тяги, необходимо знать обобщающую функцию этого параметра, а также его размерное значение при известном номинальном уровне тяги.

Проиллюстрируем эту процедуру на следующем примере.

По штатной математической модели ЖРД семейства РД170, разработанной в НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко», на этапе эскизного проектирования были проведены предварительные расчеты энергетической увязки ЖРД с номинальной тягой  $P_{н} = 1000$  тс. Используем их для проверки корректности и возможностей практического применения обобщающих функций, а именно — рассчитаем по ним результаты дросселирования двигателя на тех же уровнях тяги, приняв за точку отсчета номинальные значения ММП по энергетической увязке параметров. В табл. 3 приведена разница, в %, между результатами, полученными этими методами.

Таблица 2

Представление обобщающих функций в виде полиномов второй степени

Обобщающая функция, %	$F = Ax^2 + Bx + C$ $x$ – значение $P_{II} / P_{II\text{ ном}}$ , %		
	A	B	C
$n_{\text{ТНА}} / n_{\text{ТНА ном}}$	0,0002	0,7559	22,5410
$G_{\text{ОК}} / G_{\text{ОК ном}}$	-0,0002	1,0293	-0,4830
$G_{\text{ДР}} / G_{\text{ДР ном}}$	-0,0006	1,0636	0,1266
$G_{\text{ГТ}} / G_{\text{ГТ ном}}$	0,0085	0,1015	4,5847
$P_{\text{ВХ СГ К}} / P_{\text{ВХ СГ К ном}}$	0,0003	0,9920	-1,8074
$P_{\text{ВЫХ РР}} / P_{\text{ВЫХ РР ном}}$	0,0083	0,0542	11,9760
$P_{\text{ВЫХ ДР}} / P_{\text{ВЫХ ДР ном}}$	0,0034	0,6684	-0,8231
$P_{\text{ВЫХ НГ2}} / P_{\text{ВЫХ НГ2 ном}}$	0,0057	0,3867	5,3658
$P_{\text{ВЫХ НГ1}} / P_{\text{ВЫХ НГ1 ном}}$	0,0066	0,2582	8,3891
$P_{\text{ВЫХ НО}} / P_{\text{ВЫХ НО ном}}$ , %	0,0045	0,5152	3,5436
$(T_{\text{ВХ ГАЗ}} - T_{\text{О ВХ ДВ}}) / (T_{\text{ВХ ГАЗ}} - T_{\text{О ВХ ДВ}})_{\text{ ном}}$	-0,0027	1,2621	0,055
$(T_{\text{Г СГ К}} - T_{\text{Г ВХ ДВ}}) / (T_{\text{Г СГ К}} - T_{\text{Г ВХ ДВ}})_{\text{ ном}}$	-0,0064	1,639	0,028

Таблица 3

Отклонение расчетных значений ММП, определенных по математической модели и по обобщающим функциям

Обозначение параметра	Уровень тяги				
	95 %	90%	80%	70%	60%
	Отклонения, %				
$n_{\text{ТНА}}$	-0,04	-0,45	-0,79	-0,48	0,59
$G_{\text{ОК}}$	0,08	0,16	0,32	0,50	0,68
$G_{\text{ДР}}$	0,28	0,56	1,06	1,58	2,09
$G_{\text{ГТ}}$	0,48	0,29	-0,07	-0,40	-0,79
$P_{\text{ВХ СГ К}}$	-0,21	-0,43	-0,73	-1,22	-1,55
$P_{\text{ВЫХ РР}}$	-0,16	-0,11	0,54	1,91	3,97
$P_{\text{ВЫХ ДР}}$	-0,46	-0,62	-0,32	-1,38	-1,47
$P_{\text{ВЫХ НГ2}}$	0,85	1,77	3,11	4,17	4,81
$P_{\text{ВЫХ НГ1}}$	0,63	1,24	2,24	3,20	3,95
$P_{\text{ВЫХ НО}}$	0,04	0,46	1,17	1,82	2,27
$T_{\text{ВХ ГАЗ}} - T_{\text{О ВХ ДВ}}$	-0,05	0,11	0,19	0,27	0,22
$T_{\text{Г СГ К}} - T_{\text{Г ВХ ДВ}}$	-0,35	-0,29	0,27	0,37	0,32

Результаты сравнения данных, представленных в табл. 3, позволяют утверждать, что при проектировании ЖРД с номинальной тягой  $P_{II} = 1000$  тс были выбраны характеристики агрегатов, близкие к характеристикам двигателей РД171М, РД180 и РД191, и подтвердить принадлежность проектируемого ЖРД к семейству РД170.

Полученные результаты показывают, что обобщающие функции могут найти практическое применение для расчета ММП на начальном этапе проектирования новых ЖРД семейства РД170, когда математическая модель еще недостаточно корректна и первый проектный или экспериментальный

ный материал может служить основой для прогнозных оценок с достаточной точностью.

### Использование обобщающих функций для функциональной диагностики ЖРД

В задачах функциональной диагностики обобщающие функции можно рассматривать как эталоны нормального функционирования двигателя, отклонения от которых являются диагностическими признаками состояния двигателя [3].

Определим момент времени, когда двигатель работает нормально. Это дает точку отсчета («номинал») для нормировки измеряемых параметров.

При дальнейшей нормальной работе на стационарном режиме не должны меняться ни значения безразмерных параметров, ни значения их обобщающих функций (нормированных по значениям в точке отсчета и рассчитанных по их характеристикам).

Сохранение по времени допустимой разницы значений можно интерпретировать как диагностирование нормальной работы двигателя, растущее различие — как развитие неисправности.

Применим предложенное для анализа испытание типичного мощного ЖРД, которое закончилось ненормально вследствие закрытия дросселя из-за разрушения трубопровода питания гидроприводов.

Исходными данными являются измерения, сделанные на этом испытании на режиме с постоянным уровнем тяги в 40 точках по времени с шагом 0,02 с, в диапазоне времени 280,0—280,8 с.

На рис. 3 и 4 показано сравнение двух процессов — реального (при огневых испытаниях) и процесса нормального функционирования.

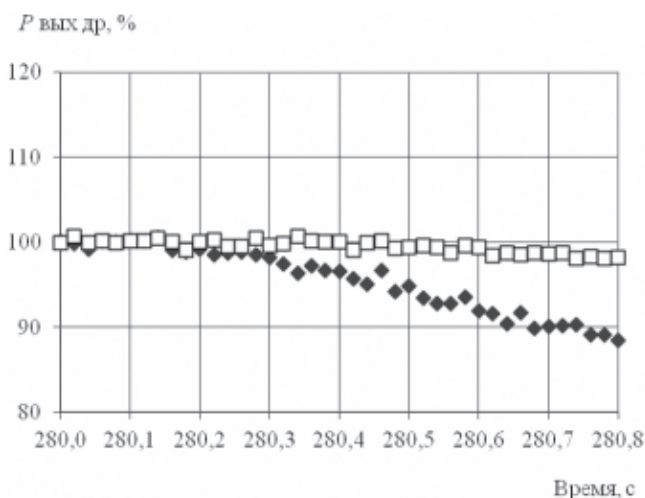


Рис. 3. Изменение по времени испытания значений безразмерного давления на выходе из дросселя: ◆ — огневое испытание; □ — текущее расчетное значение обобщающей функции данного параметра

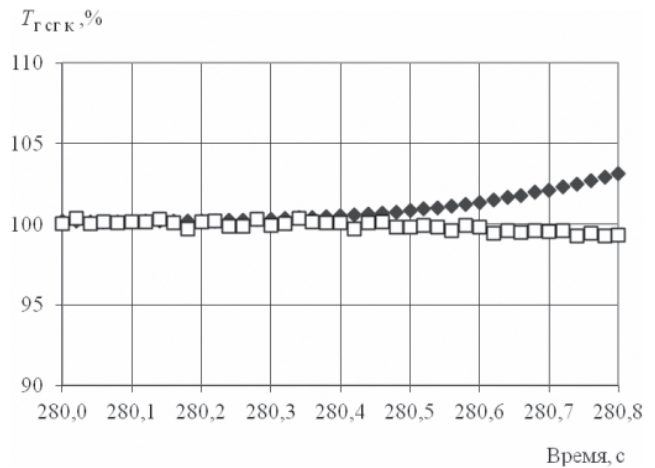


Рис. 4. Изменение по времени испытания значений безразмерной температуры горючего перед форсунками камеры: ◆ — огневое испытание; □ — текущее расчетное значение обобщающей функции данного параметра

Таким образом, результаты применения предложенного метода для анализа огневых испытаний в реальном масштабе времени подтверждают наличие неисправности.

### Выводы

1. Показана возможность применения методов теории подобия к анализу взаимосвязей параметров рабочих процессов ЖРД. Ожидаемость положительных результатов во многом определена конструктивной преемственностью двигателей семейства РД170.

2. Использование теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов этих ЖРД дает возможность формального описания физического подобия этих процессов.

3. На основе обобщающих функций, полученных из анализа результатов огневых испытаний методами теории подобия, разработан алгоритм определения параметров многорежимных ЖРД семейства РД170, позволяющий по известным номинальным значениям ММП рассчитать их значения в широком диапазоне изменения уровня тяги.

4. Показана возможность использования результатов работы в качестве эталонов нормального функционирования для решения задач функциональной диагностики.

### Библиографический список

1. Чхаидзе Н.Н. Метод подобия и математическое моделирование в исследовании сложных систем. — Тбилиси: ИД Технический университет, 2009. — 192 с.

2. Гужман А.А. Введение в теорию подобия. Изд. 3-е. — М.: ЛКИ, 2010. — 296 с.
3. Назаров В.П., Яцуненко В.Г., Коломенцев А.И. Конструктивно-технологические факторы стабильности энергетических параметров турбонасосных агрегатов ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 101-105.

## SIMILARITY THEORY METHODS APPLICATION FOR LPRE STEADY-FLOW WORKING PROCEDURES ANALYSIS

Kamenskii S.S.<sup>1</sup>, Martirosov D.S.<sup>1</sup>, Kolomentsev A.I.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> NPO «Energomash named after academician V.P. Glushko»,  
1, Burdenko str., Khimki, 141400, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

\*e-mail: kaf202@mai.ru

### Abstract

This work aims at searching similarity of RD170 engines family steady-flow operating procedures. We shall use generalizing functions describing interrelations of operating procedures parameters and valid for RD171M, RD180 and RD1971 for the formal description of the found similarity.

This work offers the reduction procedure of tests data to dimensionless form and defines the type and characteristics of the desired generalizing functions, i. e. dimensionless parameters dependencies on thrust level, which are common for all engines under consideration.

According to similarity theory, the propinquity of the equations describing behavior of dimensionless characteristics of the compared objects points to physical similarity of the processes described by these equations. Thus, obtaining the generalizing dependences reflects physical similarity of steady-flow operating procedures in structurally successive engines of RD170 family.

Based on the generalizing functions derived from the analysis of the results of fire tests by similarity theory methods, we developed an algorithm of parameters determination of multimode LPREs of RD170 family, allowing calculate their values in wide range of thrust variations according to known rated values of slow parameters (SP). The obtained results show that generalizing functions can find application for SP calculation in an infant state of LPRE of RD170 family design, when mathematical model is not correct enough, and the first experimental materials can form the basis for adequately predictive estimate.

The paper shows the possibility of using the results of presented work as references of normal functioning for solving the problems of function tests. The presented results of proposed method for firing test real time analysis within the space of which a throttle failure occurred, confirmed the presence of such kind of failure.

**Keywords:** similarity theory, results of LPRE firing test, functional diagnostics.

### References

1. Chkhaidze N.H. *Metod podobiya i matematicheskoe modelirovanie v issledovanii slozhnykh system* (A method of similarity and mathematical modeling in research of complex systems), Tbilisi, Tekhnicheskii universitet, 2009, 192 p.
2. Gukhman A.A. *Vvedenie v teoriyu podobiya* (Introduction to the similarity theory), Moscow, LKI, 2010, 296 p.
3. Nazarov V.P., Yatsunenkov V.G., Kolomentsev A.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 101-105.