

Министерство образования и науки Украины
Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

**ПРОБЛЕМЫ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ**

Сборник научных трудов

УДК 621.1
ББК 31.305
П78

*Друкується за рішенням вченої ради
Дніпропетровського національного університету ім. Олеся Гончара*

В сборнике представлены научные статьи, посвященные решению актуальных проблем теории механики жидкости и газа, термодинамики, физики плазмы и др., а также пути и способы их практического решения.

Для научных работников, аспирантов и студентов теплотехнических и энергетических специальностей.

Проблеми високотемпературної техніки: сб. науч. тр. / ред. кол.: Петренко А. Н. (главный редактор). ISBN 978-617-518-281-9. Днепропетровск: Пороги, 2013 – 162 с.

У збірнику представлені наукові статті, присвячені вирішенню актуальних проблем теорії механіки рідини та газу, термодинаміки, фізики плазми та ін., а також шляхи та способи їх практичного вирішення.

Для науковців, аспірантів і студентів теплотехнічних і енергетичних спеціальностей.

Редакційна колегія:

д-р техн. наук, проф. лауреат Державної премії, декан ФТФ ДНУ О. М. Петренко (головний редактор); д-р фіз.-мат. наук, професор, академик міжнародної академії астронавтики, лауреат Державної премії, ректор ДНУ М. В. Поляков; академик РАН, д-р техн. наук, професор, директор НДІ прикладної механіки і електродинаміки МАІ Г. О. Попов, Росія; д-р техн. наук, заступник Головного конструктора НВО «Енергомаш ім. академіка Глушко В. П.» В. І. Семенов, Росія; д-р техн. наук, проф., пров. н. с. «Техніон», О. М. Капулкін, Ізраїль; д-р техн. наук, проф. ДНУ О. А. Приходько; д-р техн. наук, проф. ЗНТУ А. Я. Качан; д-р техн. наук, проф. ДНУ Г. І. Сокол; канд. техн. наук, професор ДНУ Л. В. Пронь; д-р техн. наук, проф. ДНУЗТ В. О. Габрінець; д-р техн. наук, проф. ІТМ НАНУ і ДКА М. Д. Коваленко; канд. техн. наук, зав. каф. двигунобудування ДНУ Ю. О. Мітків; канд. техн. наук, доц. С. О. Белогуров (відп. секретар); н. с. В. П. Бабицький (відп. секретар).

Рецензент:

д-р техн. наук, проф. Г. А. Стрельников

УДК: 621.454.2

В. А. Габринец, С. М. Подольчак

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ И РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Проведені дослідження спрацювання системи аварійного захисту ракетного двигуна за різного функціонального стану. Наведені обґрунтування раціонального використання системи аварійного захисту під час стендових випробувань ракетних двигунів.

Ключові слова: система аварійного захисту, імовірнісний коефіцієнт ефективності, вартісний коефіцієнт ефективності, стендові випробування, ракетний двигун.

Проведены исследования по срабатыванию системы аварийной защиты ракетного двигателя при разных её функциональных состояниях. Приведены обоснования рациональности использования системы аварийной защиты при стендовых испытаниях ракетных двигателей.

Ключевые слова: система аварийной защиты, вероятностный коэффициент эффективности, стоимостной коэффициент эффективности, стендовые испытания, ракетный двигатель.

Researches on the switching-on of the system of emergency protection of the rocket engine at its different functional states were conducted. Grounds of necessity of the use of the system of emergency protection during the stand tests of the rocket engines are described

Keywords: system of emergency protection, probabilistic coefficient of efficiency, a cost coefficient of efficiency, stand tests, rocket engine.

Введение. На этапе отработки жидкостных ракетных двигателей большое внимание уделяется оценке их состояния в условиях стендовых испытаний. Это связано, в первую очередь, с частыми отказами двигателей, которые могут сопровождаться взрывом и разрушением материальной части как самого двигателя, так и стендового оборудования.

Отказы двигателей, сопровождаемые разрушениями, приводят к увеличению длительности отработки, усложняют дефектацию и определение причин отказов [1], что влечет за собой дополнительные как материальные, так и финансовые расходы.

Теоретические предпосылки. Применение системы аварийной защиты, являющейся составной частью двигателя, в условиях стендовых испытаний позволяет решить следующие задачи:

- сохранить двигатель в случае аварийного состояния для дальнейшей его дефектации и определения причины отказа;
- сохранить стендовое оборудование и средства контроля;
- обеспечить возможность повторного использования двигателя после его переборки.

Эффективность применения системы аварийной защиты двигателя в условиях стендовых испытаний зависит от следующих показателей – вероятности безаварийных испытаний и стоимости испытаний двигателя [2].

Показатель вероятности безаварийного испытания характеризуется вероятностным коэффициентом эффективности:

$$\mathcal{E}_p = \frac{q - P_a}{q},$$

где q – вероятность отказа двигателя без применения системы аварийной защиты;
 P_a – вероятность возникновения аварий.

Показатель стоимости испытания двигателя характеризуется стоимостным коэффициентом эффективности:

$$\mathcal{E}_c = \frac{C_{и} - C_{и}^{сaz}}{C_{и}},$$

где $C_{и}$ – стоимость испытания без применения системы аварийной защиты, $C_{и}^{сaz}$ – стоимость испытания в случае применения системы аварийной защиты.

Постановка задачи. На основании вероятностных оценок состояний двигателя и системы аварийной защиты провести анализ эффективности использования системы аварийной защиты при стендовом испытании ракетного двигателя на этапе его отработки.

Проведение анализа. Для анализа эффективности использования системы аварийной защиты рассматривается так называемая структурная модель взаимодействия двигателя и системы аварийной защиты (рис. 1). Для удобства, примем следующие обозначения состояния двигателя и системы аварийной защиты:

- исправное состояние двигателя – состояние A ;
- неисправное состояние двигателя – состояние \bar{A} ;
- исправная работа САЗ – состояние N ;
- неисправная работа САЗ – состояние \bar{N} .

Вероятности состояний двигателя совместно с системой аварийной защиты можно определить, используя свойства зависимых событий [3]:

- 1) вероятность нормального функционирования:

$$P_p = P(A, N) = P(A)P(N/A);$$

- 2) вероятность выключения двигателя:

$$P_v = P(A, \bar{N}) + P(\bar{A}, N) = P(A)P(\bar{N}/A) + P(\bar{A})P(N/\bar{A});$$

- 3) вероятность аварии:

$$P_a = P(\bar{A}, \bar{N}) = P(\bar{A})P(\bar{N}/\bar{A}).$$

Вероятности отдельных событий $P(j)$ являются вероятностными характеристиками двигателя и САЗ и определить их можно по следующим зависимостям [3]:

- 1) вероятность исправного состояния двигателя:

$$P(A) = P_{дв};$$

- 2) вероятность нахождения двигателя в неисправном состоянии:

$$P(\bar{A}) = 1 - P_{\text{дв}} = q_{\text{дв}};$$

3) вероятность ложного срабатывания САЗ при исправном двигателе:

$$P(\bar{N}/A) = q_{\text{л}};$$

4) вероятность несрабатывания САЗ при исправном двигателе:

$$P(N/A) = 1 - q_{\text{л}};$$

5) вероятность несрабатывания САЗ при неисправном двигателе (необнаруженное аварийное состояние двигателя):

$$P(\bar{N}/\bar{A}) = q_{\text{н}};$$

6) вероятность срабатывания САЗ при неисправном двигателе (аварийное отключение двигателя):

$$P(N/\bar{A}) = 1 - q_{\text{н}}.$$

Данная модель справедлива в случае, когда САЗ учитывает все факторы, из-за которых двигатель может перейти в неисправное состояние. На самом же деле, это сделать невозможно, поэтому введем еще два вида аварийных состояний двигателя при исправной работе САЗ (рис. 2):

- прогнозируемое аварийное состояние двигателя при исправной САЗ – L ;

- непрогнозируемое аварийное состояние двигателя при исправной САЗ – \bar{L} .

С учетом этого, немного изменятся вероятности некоторых состояний, а именно:

- вероятность выключения двигателя:

$$P_{\text{в}} = P(A, \bar{N}) + P(N, L) = P(A)P(\bar{N}/A) + P(N)P(L/N);$$

- вероятность аварии:

$$P_{\text{а}} = P(\bar{A}, \bar{N}) + P(N, \bar{L}) = P(\bar{A})P(\bar{N}/\bar{A}) + P(N)P(\bar{L}/N),$$

а также добавятся новые вероятности отдельных событий:

- вероятность прогнозируемой неисправности двигателя при исправной работе САЗ

$$P(L/N) = q_{\text{п}};$$

- вероятность непрогнозируемой неисправности двигателя при исправной работе САЗ:

$$P(\bar{L}/N) = q - q_{\text{п}} = (1 - P_{\text{дв}}) - q_{\text{п}}.$$

Вероятность прогнозируемой неисправности двигателя связана с вероятностью нахождения двигателя в неисправном состоянии коэффициентом охвата аварийных ситуаций:

$$\alpha = \frac{q_{\text{п}}}{1 - P_{\text{дв}}}.$$

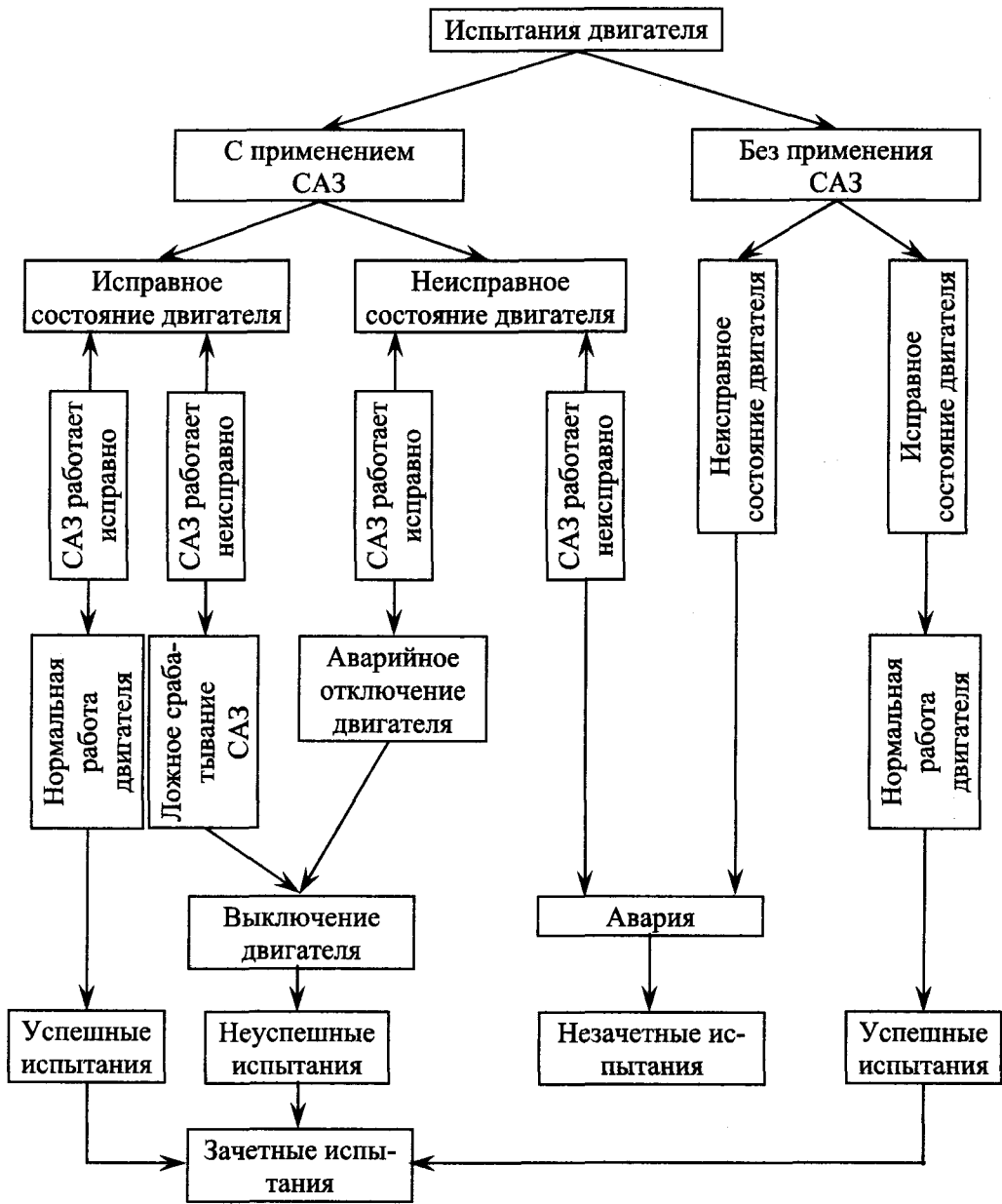


Рис. 1. Структурная модель взаимодействия двигателя и системы аварийной защиты

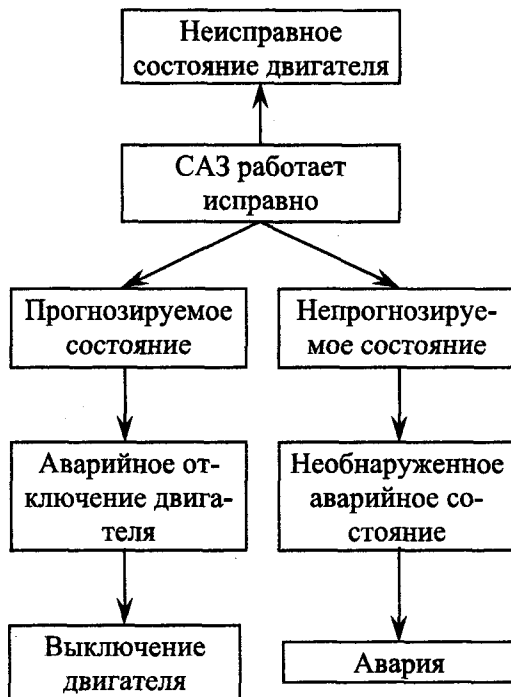


Рис. 2. Дополнительные состояния неисправного двигателя при исправной системе аварийной защиты

Перепишем теперь вероятности состояний через вероятности отдельных событий с учетом коэффициента охвата аварийных ситуаций:

$$P_p = P_{дв} \cdot (1 - q_L),$$

$$P_v = P_{дв} \cdot q_L + (1 - P_{дв}) \cdot (1 - q_H) \cdot \alpha,$$

$$P_a = (1 - P_{дв}) \cdot q_H + (1 - P_{дв}) \cdot (1 - q_H) \cdot (1 - \alpha).$$

Подставив полученные зависимости в формулу для определения вероятностного коэффициента эффективности применения системы аварийной защиты, после небольших преобразований получим:

$$\mathcal{E}_p = \alpha(1 - q_H).$$

Теперь рассмотрим подробнее составляющие стоимостного коэффициента эффективности применения системы аварийной защиты:

$$\mathcal{E}_c = \frac{C_{и} - C_{и}^{саз}}{C_{и}}$$

Так как результат испытания может быть как зачетным (безаварийное испытание), так и незачетным (испытание закончилось аварией), то и в общей стоимости проведения испытания необходимо учитывать возможный результат его завершения. Дополнительно, при расчете стоимости испытания с применением САЗ, необ-

ходимо учитывать стоимость самой системы аварийной защиты, которая зависит от надежности двигателя и от охвата ею аварийных ситуаций (рис. 3).

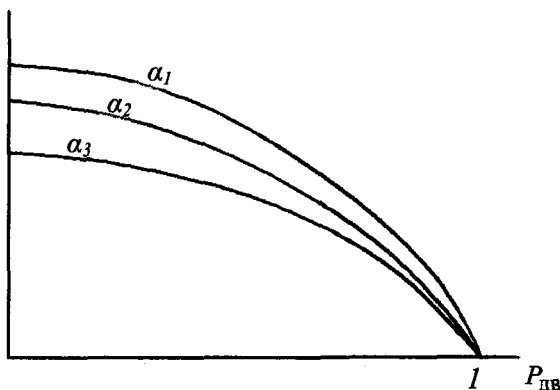


Рис. 3. Зависимость стоимости системы аварийной защиты от надежности двигателя и от коэффициента охвата аварийных ситуаций:
 $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$

Таким образом, стоимость испытания без применения системы аварийной защиты и стоимость испытания в случае применения системы аварийной защиты будут равны:

$$C_{\text{и}} = C_{\text{и}}^{\text{ба}} \cdot P_{\text{дв}} + C_{\text{и}}^{\text{ав}} \cdot (1 - P_{\text{дв}});$$

$$C_{\text{и}}^{\text{саз}} = C_{\text{и}}^{\text{ба}} \cdot [P_{\text{дв}} \cdot (1 - q_{\text{л}}) + P_{\text{дв}} \cdot q_{\text{л}} + (1 - P_{\text{дв}}) \cdot (1 - q_{\text{н}}) \cdot \alpha] + \\ + C_{\text{и}}^{\text{ав}} \cdot [(1 - P_{\text{дв}}) \cdot q_{\text{н}} + (1 - P_{\text{дв}}) \cdot (1 - q_{\text{н}}) \cdot (1 - \alpha)] + C_{\text{саз}} (1 - P_{\text{дв}}),$$

где $C_{\text{и}}^{\text{ба}}$ - стоимость безаварийного испытания, $C_{\text{и}}^{\text{ав}}$ - стоимость испытания, закончившегося аварией, $C_{\text{саз}}$ - стоимость системы аварийной защиты.

Подставив полученные зависимости в формулу для определения стоимостного коэффициента эффективности применения системы аварийной защиты, после небольших преобразований получим:

$$\varepsilon_c = \frac{A(\gamma - 1) - \beta}{P_{\text{дв}} + (1 - P_{\text{дв}})\gamma},$$

где $A = \alpha(1 - P_{\text{дв}})(1 - q_{\text{н}})$; γ - отношение стоимости испытаний, закончившихся аварией, к стоимости безаварийных испытаний; β - отношение стоимости системы аварийной защиты к стоимости безаварийных испытаний.

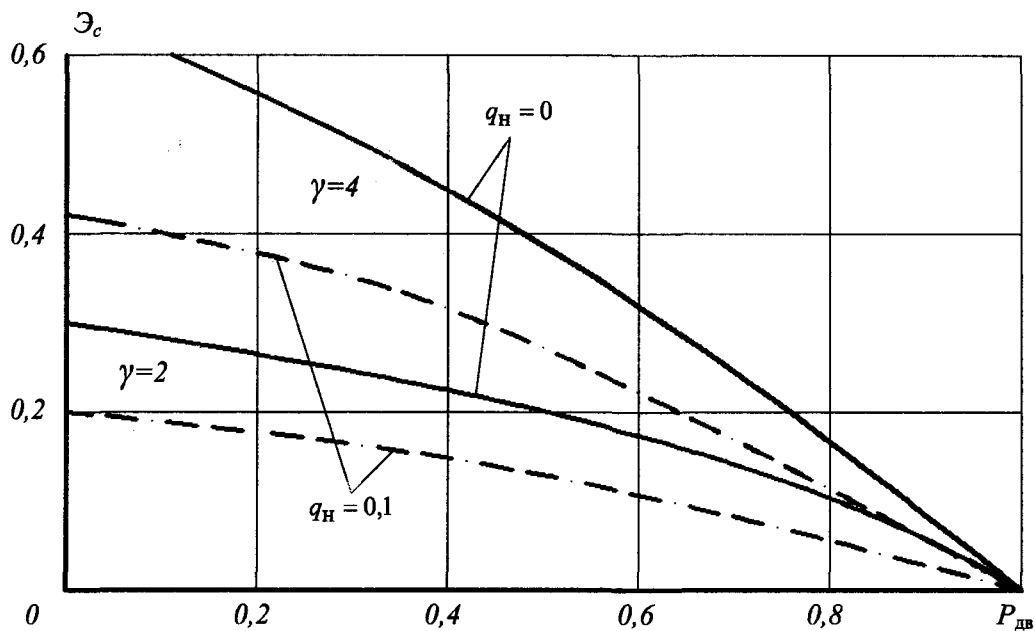


Рис. 4. Зависимость стоимостного коэффициента эффективности $\mathcal{E}_c = \mathcal{E}(P_{дв}, \gamma, q_n)$.

Выводы. Построена структурная модель взаимодействия двигателя и системы аварийной защиты при проведении стендовых испытаний. Данная модель показывает влияние вероятностных состояний двигателя и САЗ на итоговые результаты испытаний.

Приведены вероятности состояний и отдельных событий, которые наблюдаются при стендовых испытаниях.

Как видно из рис. 4, эффективность применения САЗ увеличивается с уменьшением надежности двигателей и увеличением стоимости испытательного оборудования, и самих двигателей. А это значит, что на начальных этапах отработки двигателей, когда вероятность отказов еще достаточно велика, применение САЗ весьма рационально.

Библиографические ссылки

1. Луарсабов К. А. / К. А. Луарсабов, Л. В. Пронь, А. В. Сердюк /Летные испытания ЖРД, М., Машиностроение, 1977 г.
2. Волков Е. Б. / Е. Б. Волков, Р. С. Судаков, Т. А. Сырицын /Основы теории надежности ЖРД, М., Машиностроение, 1974 г. 400с.
3. Вентцель Е. С./ Е. С. Вентцель /Теория вероятностей, Издательство "Наука", М., 1964г.
4. Острейковский В. А. / В. А. Острейковский /Теория надежности, М.: Высш. школа., 2003. – 463с.

Надійшла до редколегії: 12.05.2013

СОДЕРЖАНИЕ

Петренко А. Н. Разработка систем автоматического управления и контроля ракетных двигательных установок на базе холловских двигателей.....	3
Бабицкий В. П. Стендовая система хранения и подачи газообразного рабочего тела источников ионов	8
Габринец В. А., Марченко О. Л. Влияние угла наклона тепловой трубы на ее запуск и остановку.....	14
Габринец В. А., Подольчак С. М. Вероятностный анализ взаимодействия системы аварийной защиты и ракетного двигателя при стендовых испытаниях.....	25
Гонтарев Ю. К., Гонтарев М. Ю., Покрышкин В. В. Экспериментальные дослідження термосифонів на основі нафталіну.....	32
Гонтарев Ю. К., Гонтарев М. Ю., Покрышкин В. В. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик пористого вольфрама.....	36
Гонтарев Ю. К., Гонтарев М. Ю., Покрышкин В. В. Исследование работы сопел микродвигателей, работающих на аммиаке.....	42
Покрышкин В. В., Гонтарев Ю. К., Гонтарев М. Ю., Жир С. И. Математическая модель коаксиальной тепловой трубы.....	50
Душин В. Р., Минин И. В., Минин О. В., Смирнов Н. Н. Аналитические оценки влияния примесных частиц металла в факеле струи на его характеристики.....	65
Золотко А. Е., Коваленко Н. Д., Стрельников Г. А., Мороз Ю. И., Андриевский Ю. В. Моделирование процесса детонации в камере ракетного двигателя с дивергентным сопловым насадком.....	85
Иванова Л. Х., Калашникова А. Ю. Влияние отпуска на структуру и свойства двухслойных прокатных валков	97
Катренко М. А., Сальникова А. Ю. Анализ опыта проектирования авиационно-космических транспортных систем	101
Лукавський Р. М., Бондаренко С. Г. Анализ методов дросселирования тяги на существующих жидкостных ракетных двигателях применительно к космическому мусоросборщику	108
Масляный Н. В. Малогабаритный измеритель тяги стационарного плазменного двигателя СПД-30.....	121