

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ МНОГОРАЗОВЫХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРИ АДАПТАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОДНОРАЗОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Деев А.Ю., Данильченко В.П.  
ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара

*Ключевые слова:* жидкостный ракетный двигатель, многоразовость, надёжность, наработка, вероятность безотказной работы.

Для многоразовых РН рационально использовать адаптированные варианты существующих ЖРД. Для обеспечения многоразового использования наработка ЖРД при эксплуатации значительно увеличивается в 10-50 раз (определяется количеством пусков РН). Использование существующего ЖРД для выполнения требований надёжности возможно только за счёт уменьшения номинального режима работы по сравнению с исходным (однократное использование). Известна связь коэффициента сокращения продолжительности испытания  $K_\phi$ , определённая корреляционно-регрессионным методом анализа экспериментальных данных испытаний ЖРД на эксплуатационных и форсированных режимах [1]. На основании данных [1] на рисунке 1 построена зависимость коэффициента  $K_\phi$  от уровня форсирования  $U_\phi$ .

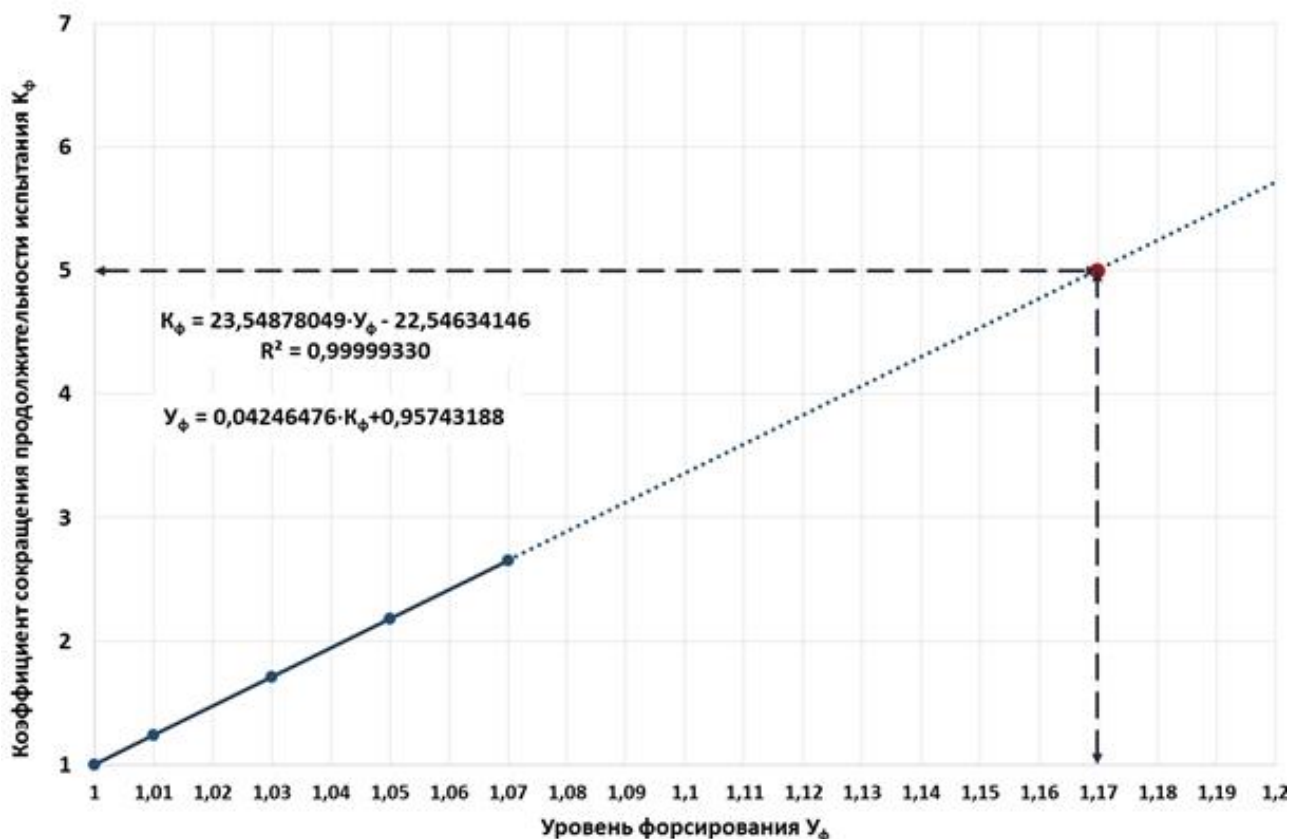


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента сокращения продолжительности испытания  $K_\phi$  от уровня форсирования  $U_\phi$

$$K_\phi = \tau_{\text{ЭКВ}} / \tau_{\text{ЭКВ}} \quad (1)$$

где:  $\tau_{\text{ЭКВ}}$  – наработка на номинальном режиме;  $\tau_\phi$  – наработка на форсированном режиме,

$$U_\phi = R_\phi / R_{\text{НОМ}} \quad (2)$$

Зависимость, приведённую на рисунке 1, можно использовать для предварительного определения наработки (если известен режим работы) или режима работы (если известна требуемая наработка) многоразового ЖРД при адаптации ЖРД однократного применения.

В этом случае в формуле (1) наработка  $\tau_{\phi}$  будет относиться к наработке исходного ЖРД  $\tau_{исх}$ , а наработка  $\tau_{экв}$  эквивалентной наработкой многоразового ЖРД  $\tau_{мн.ЖРД}$ .

Учитывая, что эксплуатация многоразового ЖРД осуществляется по техническому состоянию, для определения наработки за эксплуатацию  $\tau_{мн.ЖРД}$  целесообразно выбирать наработку  $\tau_{исх}$ , близкую к гарантийному пределу работы исходного двигателя. Данный подход к пересчёту наработок и режимов работ при уменьшении режима работы ЖРД возможно использовать при расчёте исходных данных для определения вероятности безотказной работы (ВБР) на базе имеющейся статистики испытаний исходного двигателя.

При установленной доверительной вероятности  $\gamma$ , количестве испытаний на эксплуатационный ресурс (полётное время)  $n$ , при числе заданных отказов  $m=0$ , ВБР определяется по формуле:

$$P_H = \sqrt[n]{1 - \gamma}. \quad (3)$$

Уточнение показателей выполняется по результатам огневых испытаний многоразового ЖРД.

При разработке РН используется многодвигательная установка на первой ступени. Наиболее распространена схема ДУ на 1 ступени из 5-ти (пяти) или 9-ти (девяти) двигателей.

Количественный расчёт надёжности можно выполнить, взяв за основу модель надёжности [2] с учётом уточнения ВБР при рассмотрении событий, связанных с отказами двигателей и необходимости форсирования оставшихся двигателей.

Надёжность двигательной установки:

$$q_{\Sigma} = (q_{дв})^n, \quad (4)$$

где:  $q_{дв} = P_H$  – надёжность двигателя;  $n$  – количество двигателей в связке.

Вероятность выхода из строя  $m$  двигателей из связки  $n$  двигателей:

$$P_{ДУm} = C_n^m P_{1дв}^m q_{дв}^{n-m} \quad (5)$$

где  $C_n^m$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $m$ ;  $P_{1дв}^m$  – вероятность выхода из строя двигателя;  $q_{дв}$  – надёжность работы двигателя;  $m$  – количество двигателей, выходящих из строя.

Вероятность выхода из строя одного и только одного двигателя из  $n$  двигателей, установленных в ДУ (событие Б):

$$P_{ДУ1} = P(B) = C_n^1 P_{1дв}^1 q_{дв}^{n-1}.$$

При сохранении работоспособности ДУ при отказе одного двигателя потребуются форсирование оставшихся работоспособных двигателей, поэтому надёжность единичного двигателя  $q_{1дв}$  уменьшится и будет равна уточнённой ВБР  $P_{H-1дв}$  с учётом утяжеления режима:  $q_{1дв} = P_{H-1дв}$ . Расчёт ВБР  $P_{H-1дв}$  для многоразового ЖРД выполняется по формуле (3) за счёт пересчёта количества испытаний на эксплуатационный ресурс  $n_{1дв}$ .

$$\begin{aligned} n &= \frac{\tau_{\Sigma}}{\tau_{эксpl}} = \frac{\tau_{\Sigma}}{N \cdot \tau_{пол}}; & n_{-1дв} &= \frac{\tau_{\Sigma}}{\tau_{-1двэксpl}} = \frac{\tau_{\Sigma}}{(N-1) \cdot \tau_{пол} + K_{\phi} \cdot \tau_{пол}}; \\ \frac{n_{-1дв}}{n} &= \frac{\tau_{\Sigma}}{(N-1) \cdot \tau_{пол} + K_{\phi} \cdot \tau_{пол}} \cdot \frac{N \cdot \tau_{пол}}{\tau_{\Sigma}} = \frac{N}{N-1 + K_{\phi}}; \\ n_{-1дв} &= \frac{N}{N-1 + K_{\phi}} \cdot n \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n$  – количество испытаний на эксплуатационный ресурс при определении ВБР для номинального режима;  $n_{1дв}$  – количество испытаний на эксплуатационный ресурс для определения ВБР единичного двигателя при форсировании режима многоразового ЖРД;  $N$  – число использований многоразового ЖРД (количество пусков РН);  $\tau_{пол}$  – время работы одного двигателя за один полёт РН;  $K_{\phi}$  – коэффициента сокращения продолжительности испытания.

При этом ВБР ДУ при отказе одного двигателя составит (событие В):

$$P_{ДУ-1дв} = P(B) = (P_{H-1дв})^{n-1} = (n_{-1дв} \sqrt[n-1]{1 - \gamma})^{n-1}.$$

ВБР ДУ при отказе  $m$  двигателей определяется по формуле:

$$P_{\text{ДУ-млд}} = (P_{\text{Н-млд}})^{n-m} = \left( \sqrt[n-m]{1-\gamma} \right)^{n-m} \quad (7)$$

Надёжность ДУ при сохранении работоспособности при отказе одного двигателя  $q_{\Sigma \text{ДУ-1дв}}$  составит:

$$q_{\Sigma-1\text{дв}} = P_{\text{ДУ1}} + P_{\text{ДУ-1дв}} = P(B) + P(B).$$

Надёжность ДУ при сохранении работоспособности при отказе  $m$  двигателей будет определяться по формуле:

$$q_{\Sigma-1\text{дл}} = P_{\text{ДУ-млд}} + \sum_1^m P_{\text{ДУ } m} \quad (8)$$

где:  $m$  – количество отказавших двигателей в ДУ;  $P_{\text{ДУ-}m \text{ дв}}$  – ВБР ДУ при отказе  $m$  двигателей;  $P_{\text{ДУ } m}$  – вероятность отказа  $m$  двигателей одновременно.

С учётом формул (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) и (8) приведен расчёт надёжности двигательной установки для различных условий сохранения её работоспособности: при отсутствии отказов, при отказе одного, двух и трёх двигателей. При этом расчёт надёжности проводился из условия, что при отказе двигателя(ей) возможно форсирование оставшихся двигателей на режим не более чем на 133% от номинального. При необходимости форсирования более чем на 133% от номинального принято допущение, что ДУ становится неработоспособной. На рисунке 2 показана зависимость надёжности ДУ для условий сохранения работоспособности при отсутствии отказов, при отказе одного, двух и трёх двигателей.

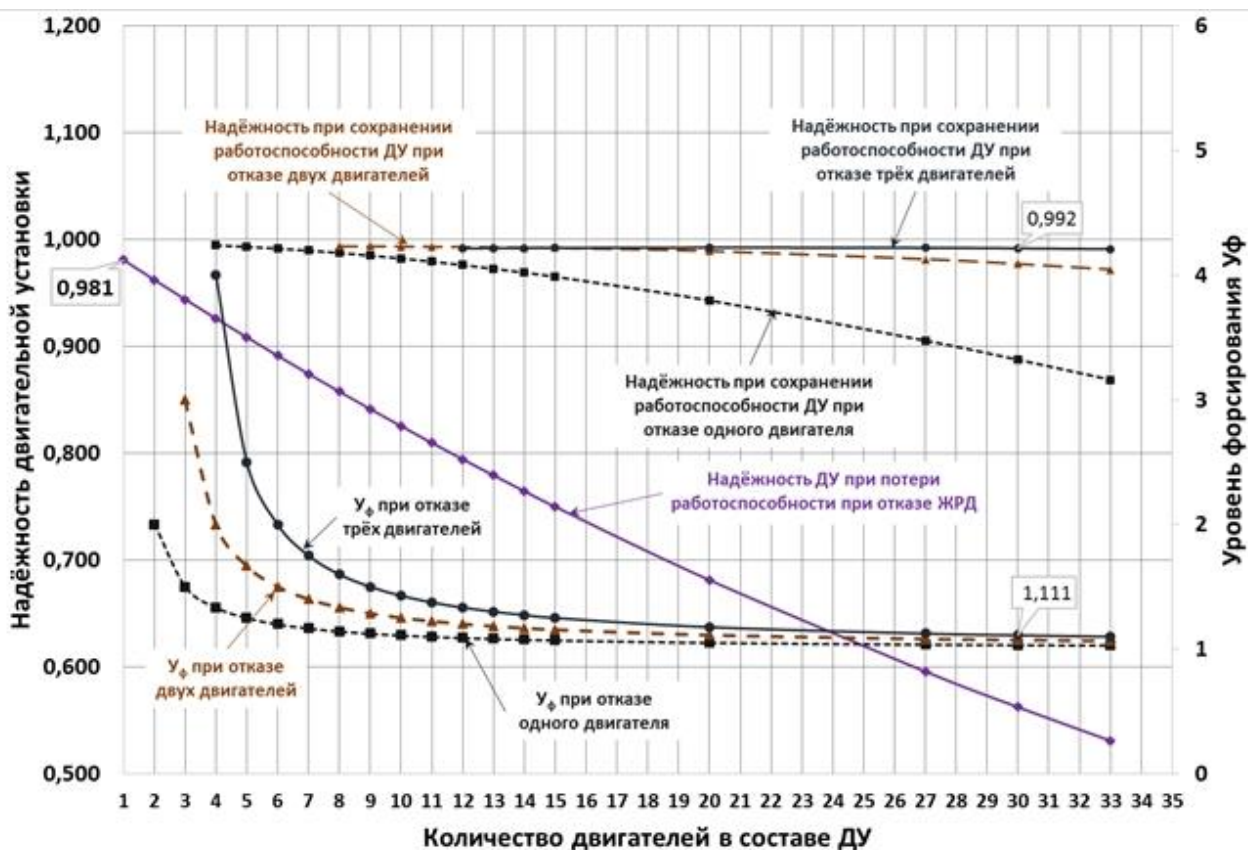


Рисунок 2 – Надёжность ДУ в зависимости от количества двигателей, уровня форсирования и условия сохранения работоспособности

Из приведённых данных следует, что если при отказе части двигателей ДУ сохраняет работоспособность (за счёт форсирования не отказавших двигателей), то надёжность ДУ может быть выше, чем надёжность (ВБР) единичного двигателя. Например, при количестве двигателей 30 штук на первой ступени, при ВБР двигателя для номинального режима работы 0,981, надёжность двигательной установки при отказе трёх двигателей (при условии

сохранения её работоспособности) составит 0,992, при форсировании оставшихся на режим 111% от номинального. Таким образом, возможность работы ДУ при отказе двигателей ограничивается допустимой величиной форсирования оставшихся двигателей.

Приведённая методика определения надёжности показывает преимущества подхода в части использования для многократного ЖРД исходного варианта ЖРД однократного применения путём уменьшения его номинального режима работы. В данном случае при использовании в составе многодвигательной ДУ будет обеспечиваться приемлемая надёжность ДУ при отказе двигателя(ей), так как форсированный режим работы двигателей будет приближен к номинальному режиму работы исходного двигателя.

### **Список литературы**

1. ГОСТ РВ 1472-001-2008. Двигатели ракетные жидкостные. Контроль качества изготовления при поставках в эксплуатацию и технического состояния в межполётный период // Москва: Стандартинформ. 2009.

2. Баллистические ракеты и ракеты-носители: Пособие для студентов вузов / О.М. Алифанов, А.Н. Андреев, В.Н. Гущин и др.; Под ред. О.М. Алифанова. М.: Дрофа, 2004. 512 с.: ил.

### **Сведения об авторах**

Деев А.Ю., заместитель главного конструктора ПАО «ОДК-Кузнецов». Область научных интересов: перспективные авиационные и ракетные двигатели.

Данильченко В.П., доктор технических наук, профессор, главный конструктор ПАО «ОДК-Кузнецов». Область научных интересов: перспективные авиационные и ракетные двигатели.

## **ENSURING THE RELIABILITY OF REUSABLE LIQUID ROCKET ENGINES AND PROPULSION SYSTEMS WHEN ADAPTING EXISTING SINGLE-USE ENGINES**

Deev A.YU., Danilchenko V.P.  
PJSC «UEC Kuznetsov», Samara

*Keywords: liquid rocket engine, reusability, reliability, operating time, probability of trouble-free operation.*

The issues of ensuring the reliability of reusable liquid rocket engines when adapting existing single-use engines are considered. A method for determining the probability of trouble-free operation and reliability of a reusable liquid rocket engine as a part of a propulsion system is proposed.