

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 629.7.036.3-253.5.004.15
doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-19-30

ВНЕШНЯЯ КОНТРОЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО РЕМОНТА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Дмитрий Иванович Любченко✉

Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, ЛНР, Россия
vottako@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0009-1290-9186>

Аннотация

Целью исследования является определение возможности и целесообразности внедрения в научные исследования метода контрольной математической модели.

Задача, решению которой посвящена статья, состоит в анализе результатов применения контрольной математической модели, с помощью которой проверена достоверность расчетов по математическим моделям, специально разработанным под конкретное научное исследование.

Статья кратко раскрывает суть разработанных и примененных в научном исследовании математических моделей с применением внешней, из отраслевой нормативно-распорядительной документации, максимально близкой по назначению математической модели, выступающей в качестве контрольной, перепроверочной по одному из выходных параметров.

Представленные в исследовании конструкторско-технологические решения по повышению в ходе заводского ремонта эксплуатационной эффективности газотурбинных двигателей подтверждаются математическими моделями, разработка которых потребовалась по причине отсутствия их аналогов в научно-технических источниках информации.

Новизна исследовательской работы состоит в предложенных методах повышения эффективно-

сти эксплуатации и ремонта газотурбинных двигателей, а также в применении метода контрольной математической модели, представленной в отраслевой нормативно-распорядительной документации. С учетом использования в исследовании разработанных математических моделей такая контрольная модель выступает в роли внешней проверочной модели расчетов.

В данной статье представлены результаты положительного применения контрольной математической модели.

Выводы. В случаях разработки новых и ранее не применявшихся расчетных и иных математических моделей под конкретное исследование возможно и целесообразно применение метода контрольной математической модели (моделей), которая в таких случаях будет выступать как внешняя, заимствованная с достоверных источников информации. Метод контрольной математической модели может быть применен в других исследованиях, если требуется контроль результатов промежуточных или конечных расчетов без возможности их перепроверки на практике в исследуемых технических и иных системах.

Ключевые слова: двигатель, лопатка, модель, нитрид титана, ремонт.

Ссылка для цитирования:

Любченко Д.И. Внешняя контрольная математическая модель в условиях серийного ремонта газотурбинных двигателей / Д.И. Любченко // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 6. – С. 19-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-19-30.

Original article
Open Access Article

EXTERNAL CONTROL MATHEMATICAL MODEL IN THE CONDITIONS OF SERIAL REPAIR OF GAS TURBINE ENGINES

Dmitry Ivanovich Lyubchenko✉

Lugansk State University, Lugansk, LNR, Russia
vottako@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0009-1290-9186>

© Любченко Д. И., 2024

Abstract

The study objective is to find the possibility and expediency to introduce the method of control mathematical model into scientific research.

The task to which the paper is devoted is to analyze the results of using a control model, with the help of which the reliability of calculations using mathematical models specially designed for a concrete scientific study is verified.

The paper briefly reveals the essence of mathematical models developed and applied in scientific research using external, industry-specific regulatory and administrative documentation, as close as possible to the purpose of a mathematical model acting as a control, recheck according to one of the output parameters.

The design and technological solutions presented in the study to improve the operational efficiency of gas turbine engines during factory repairs are confirmed by mathematical models, the development of which is required due to the lack of their analogues in scientific and technical information sources.

The novelty of the research work is in the proposed methods for improving the efficiency of operation

and repair of gas turbine engines, as well as in the application of the method of control mathematical model presented in the industry regulatory and administrative documentation. Taking into account the use of the developed mathematical models in the study, such a control model acts as an external check model of calculations.

This article presents the results of positive application of the control mathematical model.

Conclusions. In cases of developing new and previously unused computational and other mathematical models for a specific study, it is possible and advisable to use the method of a control mathematical model (models), which in such cases will act as an external one, borrowed from reliable information sources. The method of the control mathematical model can be applied in other studies if it is necessary to control the results of intermediate or final calculations when it is impossible to recheck them practically in the studied technical and other systems.

Keywords: engine, blade, model, titanium nitride, repair.

Reference for citing:

Lyubchenko DI. External control mathematical model in the conditions of serial repair of gas turbine engines. *Transport Engineering*. 2024;6:19-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-19-30.

Введение

Математическому моделированию технических систем отводится отдельный раздел в отчетных материалах научных исследований. При этом допускается применение одной или нескольких математических моделей (ММ) применительно к одной или нескольким техническим системам. Такое утверждается, например, в [1], где в разделах о фундаментальных принципах построения ММ и их классификациях оговариваются различные типы и виды моделей. Однако под проверкой ММ на точность полученных результатов подразумевается обеспечение приемлемого совпадения значений выходных параметров технической системы со значениями этих параметров, рассчитанных с применением ММ.

В ряде случаев возникает проблема своевременной проверки ММ на точность, когда невозможно своевременно получить и сверить значения выходных параметров технической системы с математическими расчетами, иначе говоря, проверить ММ на

«правдивость» с целью ее применения в этих, последующих расчетах или иных исследованиях. Играет свою негативную роль и другой фактор, когда применяемая вторая ММ использует выходные параметры «бесконтрольной» первой ММ, а конечные выходные данные технической системы прямо не указывают на достоверность расчетов по первой ММ. Особенно такое актуально, если ММ разработана под конкретное исследование, ранее не использовалась, а потому не имеет практики подтверждения своей «правдивости», истинности. Примером такой ситуации может служить [2].

Сутью данной статьи является обоснование целесообразности введения в практику исследований «метода контрольных ММ», прямо или косвенно подтверждающих правомочность применения разработанных под конкретное исследование новых ММ. Контрольная ММ должна быть заведомо признанной и не вызывающей сомнений в своей легитимности.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Основным критерием целесообразности внедрения новых технологий, оборудования или методов решения проблем яв-

ляется окупаемость затрат. Множество ММ направлены на расчет окупаемости и

эффективности затрат промышленного производства.

Например, в работах [3, 4, 5, 6, 7] приводятся ММ как по производственным затратам и окупаемости новых технических систем, так и по технологиям и расходным материалам. В [2], где представлены результаты применения новых методов повышения эффективности эксплуатации газотурбинных двигателей (далее – ГТД) при одновременном снижении затрат на серийный ремонт их деталей с изношенными упрочняющими эрозионно стойкими покрытиями на основе нитрид титана, разработаны новые ММ расчета выработки ГТД стандартных и повышенных межремонтных ресурсов по техническому состоянию путем упрочнения пера компрессорных лопаток с окупаемостью таких затрат при серийном заводском ремонте ГТД. Более детально о проблематике возможно ознакомиться в [8, 9].

Разработка новых ММ, одновременно распространяющихся на деталь (лопатку), технологию (нанесение защитного покрытия) и расход материала (порошки на основе нитрид титана) выполнена в соответствии со стандартными требованиями, принципы которых изложены, например, в [10, 11]. Причина разработки указанных ММ вызвана отрицательными результатами поисков, подходящих ММ.

Проверка правильности разработанных ММ выполнена по критерию финансово-экономической окупаемости затрат с применением контрольной ММ, представленной в отраслевой нормативно-распорядительной документации, регла-

ментирующей финансово-экономическую деятельность заводского серийного ремонта ГТД.

Разработанные ММ базируются на принципе математического упрощения факторов влияния [12, 13]. Они группируются по таким этапам:

- исследование износостойкости входной кромки пера лопатки (как наиболее подверженной износу), защищенной несколькими чередующимися по составу разнопрофильными слоями упрочняющих покрытий;

- выбор различных по составу чередующихся защитных покрытий для входной кромки пера лопатки;

- расчеты стендового времени выработки входной кромки лопатки компрессора до предельно допустимых в эксплуатации значений. В расчетах используются опорные значения эрозионной стойкости однослойных монопокрытий, полученные из ранее проведенных независимых исследований и дополнительных исследований автора работы;

- проведение анализа достоверности предложенного метода повышения эффективности эксплуатации ГТД по расчетным значениям выработки стандартных ресурсов и повышенных межремонтных ресурсов по техническому состоянию.

Далее представлена часть разработанных ММ, полные расчеты содержатся в [2].

Временная длительность выработки входной кромки $T_{\text{выр.вх.кр.}}$ определяется по:

$$T_{\text{выр.вх.кр.}} = \sum_S T_{\text{выр.защитн.покр.}} + T_{\text{выр.осн.матер.}}, \quad (1)$$

где: $T_{\text{выр.защитн.покр.}}$ – время последовательного износа чередующихся разных по составу и эрозионной стойкости защитных покрытий; S – количество защитных покрытий на входной кромке пера лопатки; $T_{\text{выр.осн.матер.}}$ – время износа металла (оголенной входной кромки) лопатки.

Формулу (1) допустимо применять и при экстремальных стендовых испытаниях, когда параметры обдува пера лопатки превышают стандартные значения, и потому являющихся ускоренными испытани-

ями [14, 15]. Примеры создания таких условий стендовых испытаний можно наблюдать в [14, 16, 17], результаты исследований в эксплуатации – в [18].

Время выработки оголенного сплава (здесь – ВТ-8) по входной кромке пера лопатки:

$$T_{\text{выр.осн.матер.}} = \frac{M_{\text{матер.вх.кр.}}}{V_{\text{износ.матер.вх.кр.}}} \quad (2)$$

где $T_{\text{выр.осн.матер.}}$ – длительность выработки оголенной входной кромки пера лопатки; $M_{\text{матер.вх.кр.}}$ – масса металла в зоне входной

кромки лопатки, подвергаемой уносу (износу) до максимальной выработки в эксплуатации по провалу по хорде (здесь – до минус 2 мм); $V_{\text{выр.матер.вх.кр.}}$ – скорость уноса материала лопатки, практически определяемая стендовыми исследованиями.

$M_{\text{матер.вх.кр.}}$ определяется через плотность металла лопатки и объем (ширина износа, высота и толщина зоны входной кромки лопатки по ширине износа в 2 мм):

$$M_{\text{матер.вх.кр.}} = \rho D B \text{Ш}, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала пера лопатки; D – высота входной кромки; B – длина (глубина) износа, в данном случае 2 мм; Ш – ширина (толщина пера лопатки на длине износа 2 мм).

После преобразований формула (2) для материала лопатки получает вид:

$$T_{\text{выр.осн.мат.ВТ8}} = \frac{\rho D B \text{Ш}}{V_{\text{износ.матер.вх.кр.}}}. \quad (4)$$

Значение D неизменно. B и Ш увеличиваются за счет наложения слоев защитных покрытий. Для первого нижнего слоя покрытия расчет времени износа производится по:

$$T_{\text{выр.покр.}} = \frac{\rho (D B) (\text{Ш} + 2sT)}{V_{\text{износ.покр.}}}, \quad (5)$$

где T – толщина нанопленки защитного эрозионно (абразивно) стойкого покрытия; s – очередность наложенного слоя, увеличивающего со стороны спинки и корыта лобовую ширину входной кромки лопатки под износ.

Для нижнего слоя покрытия, в данном случае это нитрид титана, формула (5) выражается как:

$$T_{\text{выр.TiN.слой1.}} = \frac{\rho_{\text{TiN}} (D(B+T)) (\text{Ш} + 2 \cdot 1 \cdot T)}{V_{\text{износ.TiN.слой1.}}} \quad (6)$$

Для второго слоя, TiZrN , $s = 2$, формула (5) принимает вид:

$$T_{\text{выр.TiN.слой2.}} = \frac{\rho_{\text{TiN}} (D(B+T)) (\text{Ш} + 2 \cdot 2 \cdot T)}{V_{\text{износ.TiN.слой2.}}} \quad (7)$$

Для последующих накладываемых друг на друга слоев TiN , применимы формулы:

$$\text{ПЭФ}_{1500} = \frac{\text{MPP}}{\text{ДСпоТС}} = \frac{1500}{100} = 15 \text{ и } \text{ПЭФ}_{2000} = \frac{\text{MPPпоТС}}{\text{ДСпоТС}} = \frac{2000}{100} = 20, \quad (10)$$

где MPP – минимально требуемый межремонтный ресурс 1500 часов, установленный эксплуатационной и ремонтной доку-

$$T_{\text{выр.TiN.слой3.}} = \frac{\rho_{\text{TiN}} (D(B+T)) (\text{Ш} + 2 \cdot 3 \cdot T)}{V_{\text{износ.TiN.слой3.}}},$$

$$T_{\text{выр.TiN.слой4.}} = \frac{\rho_{\text{TiN}} (D(B+T)) (\text{Ш} + 2 \cdot 4 \cdot T)}{V_{\text{износ.TiN.слой4.}}} \quad (8)$$

и так далее, если требуется усиление защиты пера лопатки бóльшим количеством слоев.

Опорные фактические значения износа отдельно каждого слоя различного состава или наложенных друг на друга нескольких слоев позволяют, применяя указанное математическое моделирование по (1-8), определять степень повышения эрозионной (абразивной) износостойкости компрессорных лопаток ГТД через время выработки лопатки без защиты:

$$\text{ПЭФ}_{\text{слой}} = \frac{T_{\text{выр.вх.кр.п.слой}}}{T_{\text{выр.матер.ВТ8}}}, \quad (9)$$

где $\text{ПЭФ}_{\text{слой}}$ – повышение эксплуатационной эффективности многослойных защитных покрытий с количеством n слоев по сравнению с износом лопатки без них.

Расчеты по представленной ММ показывают, что наложение на входную кромку лопатки из сплава ВТ-8, подверженную наибольшему износу, четырех чередующихся слоев нитрид титана и циркониевого нитрид титана позволяет повысить эффективность защиты лопатки в 17,3 раза (с одним слоем – в 7,1 раза).

Определение минимально допустимой степени защиты лопатки производится с учетом минимизации производственных затрат предприятия на нанесение n количества защитных слоев.

Первая разработанная ММ, демонстрирует, что для выработки (применительно к ГТД ТВ3-117) стандартного межремонтного ресурса $\text{MPP} = 1500$ часов и повышенного по техническому состоянию $\text{MPP} = 2000$ часов по ТС в тяжелых условиях эксплуатации (повышенная запыленность воздуха) финансово-экономически обоснованное для предприятия и заказчика ремонта ГТД минимальное повышение эксплуатационной эффективности ПЭФ соответствует формулам:

ментацией завода-изготовителя ГТД ТВ3-117; ДСпоТС – среднестатистическая, в тяжелых условиях эксплуатации, наработ-

ка ГТД по досрочному съему при причине неудовлетворительного технического состояния лопаток компрессора (расчетное значение 100 часов наработки получено по разработанной ММ с использованием эмпирических данных из [18]).

Выше представленные данные $ПЭФ_{\text{нслой}} = 17,3$ минимально обеспечивают требуемую эксплуатационную эффективность защиты компрессорных лопаток при $n = 4$ чередующихся слоя на их входной кромке ($17,3 > 15$). Три слоя дают повышение защиты менее 15. Для выработки $MPP = 2000$ часов по ТС (минимальное расчетное условие $26,1 > 20$) требуется наложение шести чередующихся слоев на входную кромку пера лопатки. Согласно ММ допускается на корыте лопатки – на один слой меньше, на спинку – всего один или два слоя.

Результаты расчетов по представленной ММ являются входными данными для следующей разработанной ММ, которая позволяет определять окупаемость производственных затрат на обеспечение необходимой послеремонтной надежности ГТД [19].

$$C_{\text{укладки.сырья.под.литье.заготовок}} = 60 \left(\Phi_{\text{6.местой.матрицы}} (C_{\text{втор.сырья}} + P_{\text{укладки.сырья}}) \right), \quad (11)$$

где $\Phi_{\text{6.местой.матрицы}}$ – количество укладок сырья в одну форму (емкость) матрицы для отливки одной заготовки для одинаковых лопаток компрессора одной ступени, требующих накладку одной формой (одна матрица на одну форму, каждая форма на одну ступень компрессора); 60 – количество раз использования матрицы для одного ротора компрессора (шестиместная матрица для 360 лопаток); $C_{\text{втор.сырья}}$ – (здесь) стоимость вторичного сырья, жаропрочный пластик при низкотемпературном осаждении для изготовления одной заготовки в одной форме матрицы; в расчетах

$$C_{\text{экранов}} = C_{\text{изг.матрицы}} + 4C_{\text{укладка.сырья.под.литье.заготовок}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{изг.матрицы}}$ – стоимость изготовления 6-местной матрицы для литья (данные с предприятия); 4 – количество раз укладок сырья в матрицу (для четырех чередующихся слоев при обеспечении выработки $MPP = 1500$ часов в условиях повышенной запыленности воздуха).

Окупаемость затрат выражается в виде количества последовательно отремонтированных друг за другом ГТД, когда производственные затраты на нанесение указанных многослойных покрытий покрываются за счет снижения затрат эксплуатанта на досрочный съем ГТД и отправку в его неплановый капитальный ремонт в случае досрочного провала компрессорных лопаток по хордам при наработке меньше MPP .

Производственные затраты включают в себя, среди прочего, стоимость порошков защитных покрытий, изготовление форм для изготовления экранов и самих экранов для получения разнопрофильных чередующихся покрытий.

В моделировании учитывается расход порошков по площадям многослойного покрытия корыта и спинки пера лопаток.

Пример расчета стоимости трудозатрат $C_{\text{укладки.сырья.под.литье.заготовок}}$ на укладку сырья в матрицу под изготовление заготовок экранов выражается по:

учитывается этот более дорогостоящий вариант по сравнению с 3D-печатью матриц экранов из иных материалов или фрезеровка профилей из забракованных лопаток; $P_{\text{укладки.сырья}}$ – стоимость работы исполнителя по укладке сырья в форму (с учетом норматива трудозатрат «чел/час»).

Полная стоимость изготовления экранов $C_{\text{экранов}}$ равна сумме стоимостей изготовления самой 6-местной матрицы и стоимости сырья для изготовления комплекта заготовок экранов на лопатки ротора компрессора:

Затраты на изготовление комплекта экранов на ротор компрессора ГТД следует отнести на стоимость капитального ремонта первого ГТД, на котором указанные экраны будут применены впервые.

Если принять количество раз использования комплекта экранов – 100 однотип-

ных ГТД, это минимально ожидаемое количество раз применения, возможно определить разнесенную (среднюю) величину расходов по изготовлению комплекта экранов на указанную партию ГТД, разделив $C_{\text{экранов}}$ на 100.

Для построения математической модели окупаемости затрат $ОПЭТ.Н_{\text{слоев. TiN/NiZrN}}$ на нанесение защитных покрытий требуется сравнение с затратами, базирующимися

$$C_{\text{многосл.фиг. TiN/TiZrN}} = 50\% \cdot C_{\text{TiN/TiZrN}} \left(\sum_s^{\text{спинка/корыто}} P_{\text{TiN/TiZrN}} \right), \quad (13)$$

где 50 % – коэффициент пропорциональности площади одной стороны пера ко всей поверхности пера лопатки; C_{TiN} , C_{TiZrN} – средняя цена покрытия одной лопатки одним полным 100 % слоем; s – порядковый номер, очередность слоя; P_{TiN} , P_{TiZrN} – площадь конкретного типа слоя на основе нитрида титана на одной стороне пера лопатки.

Размер площадей P_{TiN} , P_{TiZrN} вычисляется суммированием площади каждого отдельного участка i того или иного слоя:

$$P_{\text{TiN/TiZrN}} = \sum_i P_{i(\text{TiN/TiZrN})} \quad (14)$$

где: $N_{\text{лопаток.РК}}$ – количество лопаток на роторе компрессора; $C_{\text{3х.слойн.100\%}}$ – цена однородного трехслойного покрытия.

$$C_{\text{РКзатр.Фигурн.3слой.100\%}} = (N_{\text{лопаток.1÷6ст.РК}} \cdot C_{\text{многосл.фиг.покр}}) + (N_{\text{лопаток.7÷12ст.РК}} \cdot C_{\text{3х.слой.100\%}}), \quad (16)$$

где $C_{\text{РКзатр.Фигурн.3слой.100\%}}$ – суммарная цена нанесения многослойных фигурных покрытий на лопатки ротора компрессора ГТД; $N_{\text{лопаток.1÷6ст.РК}}$ – количество лопаток с фигурными слоями, 360 шт., на которых применяются защитные экраны; $C_{\text{многосл.фиг.покр.}}$ – цена фигурного многослойного покрытия (фигурность покрытия определяется фактически по опыту эксплуатации ГТД и устанавливается в процессе исследования или ремонта); $N_{\text{лопаток.7÷12ст.РК}}$ – ко-

на условии полного покрытия всех перьев лопаток компрессора таким же числом нанослоев. Для этого требуется учесть в расчетах цену материала покрытия (данные из производственных закупок).

Стоимость наложенных на спинку или корыто всех слоев фигурных покрытий на основе нитрида титана $C_{\text{многосл.фиг. TiN/TiZrN}}$ рассчитывается по:

где: $P_{i(\text{TiN/TiZrN})}$ – площадь участка i одного слоя конкретного покрытия; i – участок покрытия.

Имея стоимости различных вариантов покрытий для одной усредненной лопатки, определяется стоимость защиты для всего ротора компрессора ГТД. При этом площадь покрытия входной кромки пренебрежимо мала, и в расчетах учитываются площади покрытия пера и корыта лопаток. Как указывалось выше, на корыте три чередующихся слоя.

Тогда затраты $C_{\text{РКзатраты.3слой.100\%}}$ составляют:

$$C_{\text{РКзатраты.3слой.100\%}} = N_{\text{лопаток.РК}} C_{\text{3х.слойн.100\%}}, \quad (15)$$

Производственные затраты на нанесение на лопатки фигурного трехслойного покрытия рассчитываются по:

личество лопаток с однородными слоями, на которых экраны не применяются (последние ступени компрессора); $C_{\text{3х.слойн.100\%}}$ – цена однородного многослойного покрытия.

Полные производственные затраты на нанесение многослойных фигурных высокопрочных нанопокровов $C_{\text{РК.затраты}}$ на первый в партии ремонтируемый ГТД учитывают затраты на изготовление экранов по (11, 12):

$$C_{\text{РК.затраты}} = C_{\text{РКзатр.Фигурн.3слой.100\%}} + C_{\text{экранов}}. \quad (17)$$

Для второго и последующих ГТД $C_{\text{РК.затраты.л.дв}}$ новое изготовление матрицы и экранов не требуется, поэтому для каждого из них $C_{\text{РК.затраты.л-1дв.}} = C_{\text{РКзатр.Фигурн.3слой.100\%}} \cdot$

Определения окупаемости затрат $О_{\text{Нслоев. TiN/NiZrN}}$ предприятия на внедрение процесса нанесения фигурных высокопрочных защитных покрытий определяется через пропорцию:

$$\frac{C_{PK.затраты.1дв.} + (n-1) \cdot C_{PK.затраты.n-1дв.}}{n} \leq C_{PK.затраты.3слоя.100\%} \cdot \quad (18)$$

Подставляя в формулу (18) необходимые значения, полученные в ходе расчетов по разработанным ММ, определяется минимально необходимое количество n ремонтируемых однотипных ГТД, окупа-

ющее производственные расходы предприятия.

Разработанные в [2] ММ учитывали финансовые показатели ремонта ГТД ТВЗ-117:

$$O_{ПЭТ.4слоя.TiN/TiZrN} = \frac{8903,98 + (n-1) \cdot 5296,98}{n} = 6499,31 \leq 6553,02 \quad (19)$$

Согласно расчетам окупаемость составляет $n = 3$ двигателя. На четвертом ГТД предприятие начинает получать прибыль. [20]

С четвертого двигателя затраты будут составлять только расходы на нанесение непосредственно покрытий, что существенно удешевляет ремонт партии однотипных двигателей на одном и том же предприятии, применяющем такой метод повышения эффективности эксплуатации и ремонта ГТД, работающих в условиях повышенной запыленности воздуха.

Для силовых установок, проходящих серийный ремонт с назначением MPP = 2000 часов по ТС, окупаемость $O_{6слоя.TiN/NiZrN}$ также рассчитывается по формуле (18) и тоже составляет три двигателя в партии ремонта. Это объясняется перекрытием повышенных производственных расходов за счет увеличения длительности нахождения ГТД в эксплуатации и уменьшения частоты их выхода в ремонт.

Таким образом, разработанные две взаимосвязанные ММ позволили рассчитать минимально необходимые затраты при ремонте ГТД на обеспечение его послеремонтной эффективности эксплуатации и одновременно установить окупаемость таких затрат для ремонтного предприятия. Эти же ММ применимы и для серийного изготовления ГТД, когда заказчику требуется аналогичное повышение эффективности на технике первой категории.

Однако возникает вопрос, насколько разработанные для [2] ММ являются адекватными задаче расчетов, легитимными и возможными для дальнейшего применения

в иных исследованиях. Поэтому для оценки достоверности разработанных ММ целесообразна их перепроверка по контрольной ММ на совпадение результатов таких двух независимых друг от друга математических расчетов.

Предлагаемый метод контрольной ММ основан на сравнении результатов расчетов по разным экономико-математическим моделям – один результат получен по разработанным ММ с итоговыми расчетами по (18, 19), второй результат требуется получить по ММ из официальных нормативно-распорядительных документов, регламентирующих финансово-экономическую деятельность производства.

Наиболее близкой к тематике разработанных ММ является ММ, представленная в [21], по которой определяются изменения по годам себестоимости ремонта ГТД с начала проведения работ по нанесению покрытий. В данном случае такими работами является повышение эффективности послеремонтной эксплуатации в процессе заводского ремонта ГТД.

Расчеты по [21] проводятся на одном условном ГТД, последовательно поступающем в серийные капитальные ремонты на одно и то же ремонтное предприятие, на котором ранее выполнялся его аналогичный ремонт. Такая ММ позволяет применить расчеты на партии однотипных ГТД, поступивших в ремонт на одно предприятие, что равносильно одному и тому же ремонтируемому ГТД на этом же предприятии.

Контрольная ММ имеет вид:

$$O_{с.п.р.} = 1 - 0,08(t_{п.р.} - 3)^{1,14} 15^{-0,16(t_{п.р.} - 3)}, \quad (20)$$

где $O_{с.п.р.}$ – относительная себестоимость n -очередности ремонта (1-й, 2-й и т.д. ГТД); $t_{п.р.}$ – срок в годах с начала освоения ново-

го технологического процесса (в данном случае – нанесения на компрессорные ло-

патки защитных покрытий при ремонте двигателя).

В свою очередь, $t_{n.p.}$ определяется по:

$$t_{n.p.} = \Gamma_{n.p.} - \Gamma_{n.o.p.} + 1, \quad (21)$$

где $\Gamma_{n.p.}$ – год начала очередного серийного ремонта ГТД с ранее нанесенным покрытием; среднестатистически длительность межремонтной эксплуатации вертолетов составляет для MPP = 1500 часов – пять лет, для MPP = 2000 часов по ТС – семь

MPP = 1500 часов: $t_{n.p.1} = 6$, $t_{n.p.2} = 11$, $t_{n.p.3} = 16$, $t_{n.p.4} = 21$ и т.д.;

MPP по ТС = 2000 часов: $t_{n.p.1} = 8$, $t_{n.p.2} = 15$, $t_{n.p.3} = 22$, $t_{n.p.4} = 29$ и т.д.

Окончательное определение прогнозируемой себестоимости очередного ремонта ГТД $C_{n.p.}$ определяется по:

$$C_{n.p.} = C_{РК.затраты.n-1дв.} \cdot \frac{O_{с.н.р.}}{O_{с.н-1.р.}}, \quad (22)$$

где $C_{РК.затраты.n-1дв.}$ – себестоимость нанесения защитного покрытия без учета влияния стоимости экранов; соответствует себестоимости, фактически начиная со вто-

лет (два дополнительных года на выработку продленного ресурса по техническому состоянию); в обоих случаях при 10 годах межремонтного срока службы; $\Gamma_{n.o.p.}$ – год начала работ, год первого нанесения покрытия на компрессорные лопатки отремонтированного двигателя.

Расчет по таким условиям дал следующие значения для:

рого ГТД; $O_{с.н-1.р.}$ – себестоимость предшествующего $O_{с.н.р.}$.

Расчеты $t_{n.p.}$ и зависимые показатели вынесены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные относительные показатели себестоимости n -ремонтов для формулы (22)

Table 1

Calculated relative indicators of the cost of n -repairs for formula (22)

n рем.	Показатель $t_{n.p.}$		$O_{с.н.р.}$		$\frac{O_{с.н.р.}}{O_{с.н-1.р.}}$	
	при 1500 ч	при 2000 ч по ТС	при 1500 ч	при 2000 ч по ТС	для 1500 ч	для 2000 ч по ТС
1	6	8	0,9237	0,9426	-	-
2	11	15	0,9726	0,9925	1,053	1,053
3	16	22	0,9946	0,9994	1,022	1,007
4	21	29	0,99911	0,99996	1,005	1,0006
5	26	36	0,999866	0,999997	1,001	1,00004
6	31	42	0,999981	0,9999998	1,0001	1,000003

Правая часть формулы (22) для четырех (1500 часов) и шести слоев (2000 часов

$$C_{п.р.1500} = 5296,98 \frac{O_{с.н.р.}}{O_{с.н-1.р.}} \text{ и } C_{п.р.2000} = 9409,02 \frac{O_{с.н.р.}}{O_{с.н-1.р.}}. \quad (23)$$

После расчетов прогнозируемая себестоимость очередного ремонта $C_{n.p.}$ применительно к нанесению многослойных

по ТС) защитных нанопокровов выражается в [2] соответственно, как:

профильных чередующихся покрытий оформлена в табл. 2.

Таблица 2

Расчетный прогноз себестоимости по очередности ремонта двигателей (с учетом табл. 1)

Table 2

Estimated cost forecast according to engine repair order (taking into account Table 1)

n рем.	Прогнозируемая себестоимость $C_{n.p.}$ ремонта, у.е.	
	при MPP = 1500 ч	при MPP = 2000 ч по ТС
0, старт	5296,98	9409,02
1	5577,72	9907,70
2	5413,51	9474,88
3	5323,46	9414,67
4	5302,28	9409,40
5	5297,51	9409,05

Тенденция снижения для заказчика прогнозируемой себестоимости ремонта подтверждает целесообразность проведения последующих ремонтов ГТД на одном и том же предприятии. Обоснование такого снижения изложено в [2].

Заключительный этап применения контрольной ММ выражается в перепроверке окупаемости затрат на нанесение на лопатки компрессоров ГТД высокопроч-

ных многослойных профильных нанопокровов. Для этого целесообразно проверить условие (18) из разработанных ММ на совпадение результатов по расчетам контрольной ММ из [21].

Расчеты по контрольной ММ дают следующую окупаемость затрат производства для выработки $MPP = 1500$ часов и $MPP = 2000$ часов по ТС соответственно:

$$O_{ПЭТ.4\text{слоя.Tin/TiZrN}} = \frac{8903,98 + 5577,72 + 5413,51 + 5323,46}{4} = 6304,67 \leq 6553,02$$

$$O_{ПЭТ.6\text{слоев.Tin/TiZrN}} = \frac{13016,02 + 9409,02 + 9097,70 + 9474,88}{4} = 10451,91 \leq 10665,42.$$

Расчетная окупаемость по [21] затрат предприятия на обеспечение требуемой послеремонтной надежности составляет четыре ГТД – на один двигатель дольше

(больше), чем по расчетам разработанных ММ, что в условиях серийности капитального ремонта ГТД следует считать совпадающим результатом.

Результаты

Для проведения расчетов по возможности повышения эффективности ГТД в условиях повышенной запыленности воздуха разработаны две взаимосвязанные ММ, выходные параметры первой являются входными для второй ММ. Расчеты проводились применительно к ГТД ТВЗ-117 на определение возможности максимально полной выработки установленных межремонтных ресурсов в условиях повышенной запыленности воздуха, когда эрозионный (абразивный) износ компрессорных лопаток приводит к досрочному съему с эксплуатации и отправке ГТД в капитальный ремонт.

Благодаря разработанным ММ, установлено минимально необходимое с точки зрения особенностей серийного ремонтного производства и соблюдения требований эксплуатационной послеремонтной надежности ГТД количество защитных эрозионно стойких слоев нитрид титана и циркониевого нитрид титана на пере компрессорных

лопаток ГТД ТВЗ-117. Апробация исследований на надежность проведена в эксплуатации.

Перепроверка расчетов по разработанным ММ в части финансово-экономических затрат на освоение и дальнейший серийный ремонт ГТД выполнена с помощью контрольной ММ, представленной в отраслевой нормативно-технической документации. Заключительные результаты расчетов по контрольной ММ сверены с аналогичными показателями, полученными по разработанным ММ.

Сопоставление продемонстрировало совпадение конечных показателей. Применительно к ГТД ТВЗ-117 по обеспечению максимально полной выработки межремонтных ресурсов 1500 часов и 2000 часов по техническому состоянию в условиях повышенной запыленности воздуха окупаемость производственных затрат составила соответственно три и четыре ГТД в каждой партии.

Заключение

В результате расчетов по разработанным под конкретное научно-техническое исследование математическим моделям и их перепроверки по офи-

циальной математической модели установлено совпадение расчетных выходных параметров, что указывает на адекватность

(легитимность) разработанных ММ поставленным задачам исследования.

Для соответствия условиям серийности заводского капитального ремонта ГТД разработанные ММ и контрольная ММ завершены расчетами по финансово-экономическому критерию – окупаемости затрат на обеспечение в процессе ремонта требуемой послеремонтной эксплуатационной надежности ГТД. Разбег показаний в окупаемости затрат по моделям оказался минимальным (один двигатель), что в условиях серийного производства следует считать совпадающим результатом.

Данное совпадение результатов по разработанным ММ и контрольной ММ позволяет утверждать:

– об адекватности и, как следствие, применимости разработанных ММ на других типах ГТД и с другими входными параметрами, если требуется производить аналогичные расчеты, представленные в разработанных ММ;

– метод контрольной математической модели подтвердил свою адекватность и целесообразность внедрения в практику научных исследований;

– метод контрольной математической модели может быть распространен не только на финансово-экономические расчеты, но и на другие направления исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зарубин В.С., Маркелов Г.Е. Лекции по основам математического моделирования: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2013. 197 с., ил. 107, табл. 7, библиогр., 190 назв.
2. Любченко Д.И. Повышение эффективности силовых установок путем нанесения на быстрознашиваемые детали высокопрочных защитных покрытий : специальность 02.05.07 «Технологи и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Любченко Дмитрий Иванович ; Луганский государственный университет им. В. Даля. – Луганск, 2023. – 184 с. – Библиогр.: 152-166 с.
3. Кац Г.Б., Ковалев А.П. Техно-экономический анализ и оптимизация конструкции машин. М: Машиностроение, 1981. 214 с., ил. С. 74-100, 148-150.
4. Расчеты экономической эффективности новой техники. Справочник. Под ред. д-ра экон. наук проф. К.М. Великанова. – Л., «Машиностроение», 1975. 432 с. С. 7-8, 12-13.
5. Экономико-математические методы и прикладные модели: Учеб. пособие для вузов/ В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д.М. Дайитбеков и др.; Под ред. В.В. Федосеева. М.: ЮНИТИ, 1999. 391 с. С. 347-359.
6. Чирков В.Г. Расчеты экономического эффекта новой техники. – К. : Техника, 1984. – 182 с., с ил. : (Б-ка инженера) – Библиогр.: с. 178-180. С. 52-55.
7. Ведение в экономико-математическое моделирование: Автор: Панкратов Е.Л., Булаева Е.А., Болдыревский П.Б. Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 113 с. С. 19.
8. Любченко Д.И. Проблематика ремонта компрессорных лопаток ГТД с защитными покрытиями на основе TiN / Д. И. Любченко, В. В. Быкадоров, А. А. Данилейченко // Вестник ЛНУ им. В. Даля. – Луганск, изд. ЛНУ. – 2019. – № 6(24). Ч.2. – С. 40-43.
9. Быкадоров В.В., Данилейченко А.А., Любченко Д.И. К вопросу серийности работ по нанесению защитных нанопокровов на ресурсопределяющие детали силовых установок авиационной и наземной техники. Транспортное машиностроение. 2022. № 05(5). С. 30-43. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-5-30-43.
10. Потапов В.И. Как выполнить научное исследование, написать, оформить и защитить магистерскую диссертацию: учебн. пособие / В. И. Потапов, Д. В. Постников. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 121 с. С. 22-24.
11. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С. В. Звонарев. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. С. 22-26.
12. Любченко Д.И. Определение эффективности эксплуатации авиационной и наземной техники через математическое упрощение факторов влияния / Д.И.Любченко, В.В. Быкадоров, А.А. Данилейченко // Вестник ЛНУ им. В. Даля. – Луганск. Изд. ЛГУ. № 11(41), 2020. – 228 с. – С. 160-164.
13. Любченко Д.И. Математическое моделирование повышенного износа компрессорных лопаток ГТД / Научная конференция профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников, посвященная году В. Даля в ЛНР // Университетская наука. 2021.

14. Павленко Д.В. Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы. / Д. В. Павленко, Я. В. Двирник // Вестник двигателестроения. Технология производства и ремонта. – М. – 2016. – № 1. – С. 44, 46.
15. ГОСТ 16504-81 Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения / С изм. Утв. и введ. в действ. Постановлением Госуд. комитета СССР по стандартам 08.12.1981 № 5297. Дата введ. 01.01.1982. М.: Стандартинформ, 2011. С. 24.
16. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание – М.: Машиностроение, 1990. 224 с.: ил. С. 170-181.
17. Хворостухин Л.А. Исследование эрозионной прочности ионно-плазменного покрытия из нитрида титана / Л. А. Хворостухин, Ю. А. Ножницкий, А. Е. Болманенков // Авиац. пром-сть. – 1988. – № 6. – С. 59–61.

18. Павленко Д.В. Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы / Д.В. Павленко, Я.В. Двирник // Вестник двигателестроения. Технология производства и ремонта. – М., 2016. – № 1. – С. 43.
19. Любченко Д.И. Определение окупаемости затрат на повышение износостойкости компрессорных лопаток газотурбинных двигателей / Д.И. Любченко, В.В. Быкадоров, А.А. Данилейченко // Вестник ЛГУ им. В.Даля. – Луганск. Изд. ЛГУ. № 7(61), 2022. – С.37-40.
20. Любченко Д.И. Определение окупаемости затрат на повышение износостойкости компрессорных лопаток газотурбинных двигателей / Д. И. Любченко, В. В. Быкадоров, А. А. Данилейченко // Вестник ЛГУ им. В.Даля. – Луганск. Изд. ЛГУ. – № 7(61), 2022. – С.37-40.
21. Методика определения себестоимости ремонта авиационной техники в зависимости от времени ее поступления в очередной ремонт / Изд. № 6084. М., 1989. 21 с. С. 4-7, 11, 14-20.

REFERENCES

1. Zarubin VS, Markelov GE. Lectures on the basics of mathematical modeling: textbook. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2013.
2. Lyubchenko DI. Improving the efficiency of power plants by applying high-strength protective coatings to fastwearing parts [dissertation]. [Lugansk (RF)]: Lugansk State University; 2023.
3. Katz GB, Kovalev AP. Technical and economic analysis and optimization of machine design. Moscow: Mashinostroenie; 1981.
4. Velikanova KM, editor. Calculations of the economic efficiency of new machinery: handbook. Leningrad: Mashinostroenie; 1975.
5. Fedoseev VV, Garmash AN, Dayitbegov DM. Economic and mathematical methods and applied models: textbook for universities. Moscow: UNITY; 1999.
6. Chirkov VG. Calculations of the economic effect of new machinery. Kalinigrad: Tekhnika; 1984.
7. Pankratov EL, Bulaeva EA, Boldyrevsky PB. Introduction to economic and mathematical modeling: textbook. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University; 2017.
8. Lyubchenko DI, Bykadorov VV, Danileichenko AA. Problems of repairing compressor blades of gas turbine engines with protective coatings based on TiN. Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University. 2019;6(24):40-43.
9. Bykadorov VV, Danileichenko AA, Lyubchenko DI. On the problem of serial works on the application of protective nanocoatings to the resource-saving components of power plants of aviation and ground equipment. Transport Engineering. 2022;05(5):30-43. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-5-30-43.

10. Potapov VI, Postnikov DV. How to perform scientific research, write, issue and defend a master's thesis: textbook. Omsk: Publishing House of OmSTU; 2013.
11. Zvonarev SV. Fundamentals of mathematical modeling: textbook. Ekaterinburg: Ural University Publishing House; 2019.
12. Lyubchenko DI, Bykadorov VV, Danileichenko AA. Determination of the effectiveness of aviation and ground equipment operation through mathematical simplification of influence factors. Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University. 2020;11(41):160-164.
13. Lyubchenko DI. Mathematical modeling of increased wear of gas turbine compressor blades. Scientific Conference of the Teaching Staff and Researchers Dedicated to the year of V. Dahl. Lugansk: University Science; 2021.
14. Pavlenko DV, Dvirnik YaV. Wear patterns of the compressor working blades of helicopter engines operating in a dusty atmosphere. Vestnik Dvigatelistroeniya. Production Technology and Repair. 2016;1:44-46.
15. GOST 16504-81 The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2011.
16. Vinogradov VN. Abrasive wear. Moscow: Mashinostroenie; 1990.
17. Khvorostukhin LA, Nozhnitsky YuA, Bolmanenkov AE. Study of the erosive strength of ion-plasma coating made of titanium nitride. Aviatcionnaya Promyshlennost. 1988;6:59-61.
18. Pavlenko DV, Dvirnik YaV. Wear patterns of the compressor working blades of helicopter engines operating in a dusty atmosphere. Vestnik

Dvigatellestroeniya. Production Technology and Repair. 2016;1:43.

19. Lyubchenko DI, Bykadorov VV, Danileichenko AA. Determination of the cost recovery for increasing the wear resistance of compressor blades of gas turbine engines. Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University. 2022;7(61):37-40.

20. Lyubchenko DI, Bykadorov VV, Danileichenko AA. Determination of the cost recovery for increasing the wear resistance of compressor blades of gas turbine engines. Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University. 2022;7(61):37-40.

21. Methodology for determining the cost of repairing aircraft equipment depending on the time of its entry into the next repair. Moscow; 1989.

Информация об авторе:

Любченко Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Института транспорта и логистики ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», Author-ID-РИНЦ 1130478, тел. +7(959)1011212.

Lyubchenko Dmitry Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines at the Institute of Transport and Logistics of Lugansk State University; Author-ID-RSCI 1130478; phone: +7(959)1011212.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 11.04.2024; принята к публикации 26.05.2024. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 08.04.2024; approved after review on 11.04.2024; accepted for publication on 26.05.2024. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.