



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ
АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

ФАКУЛЬТЕТ Механический (МФ)

КАФЕДРА Двигателей летательных аппаратов

Направление подготовки 25.06.01 Аэронавигация и эксплуатация
(код и наименование направления подготовки)
авиационной и ракетно-космической техники

Направленность Эксплуатация воздушного транспорта
(наименование направленности)

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема «Обоснование рекомендаций по снижению повреждаемости
рабочих лопаток турбины высокого давления ТРДД в процессе
технической эксплуатации»

Обучающийся:

Аметов А.А.
(Ф.И.О.)

(Подпись)

Научный руководитель:

д.т.н., профессор Чичков Б.А.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

Рецензенты:

д.т.н. профессор Киселев М.А.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

д.т.н. профессор Петров Ю.В.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

Работа допущена к защите:

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор Машошин О.Ф.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

МОСКВА 2024

Обоснование рекомендаций по снижению повреждаемости рабочих лопаток турбины высокого давления ТРДД в процессе технической эксплуатации

Актуальность научно квалификационной работы (НКР)

В настоящее время в эпоху рыночной экономики и высокой конкуренции наиболее конкурентоспособная техника – это такая техника, производство и эксплуатация которой обходится при меньших издержках. Считается, что уменьшение стоимости жизненного цикла изделия авиационной техники (АТ) – задача, решаемая на стадии проектирования, либо влекущая за собой значительные поправки в конструкцию.

Применение предлагаемой технологии предварительного подогрева турбины газотурбинного двигателя (ГТД) позволяет уменьшить термонапряженность рабочих лопаток (РЛ) турбины высокого давления (ТВД) и их повреждаемость при запуске двигателя без внесения конструктивно-технологических изменений.

Объектом исследования являются рабочие лопатки турбины высокого давления авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД).

Предметом исследования является повреждаемость РЛ ТВД ТРДД.

Целью исследования является разработка рекомендаций по уменьшению повреждаемости РЛ ТВД за счет применения технологии предварительного подогрева турбины двигателя перед запуском.

Поставленная цель достигается решением следующих **основных задач**:

1. Анализ и критическая оценка ранее выполненных исследований в области повреждаемости и ее влияние на ресурс двигателя.
2. Классификация существующих методов уменьшения повреждаемости РЛ ТВД ТРДД.
3. Анализ существующих методов и способов оценки накопленной повреждаемости основных узлов ГТД, в частности ТВД.
4. Моделирование и оценка напряженно-деформированного состояния РЛ ТВД.
5. Проведение сравнительного анализа повреждаемости РЛ ТВД без подогрева и в случае применения предлагаемой технологии.

6. Экспериментальное обоснование времени, необходимого для прогрева РЛ ТВД и разработка технологии предварительного подогрева с формулированием рекомендаций по уменьшению повреждаемости РЛ ТВД в процессе технической эксплуатации.

Научная новизна работы состоит в установлении связи между температурным напором и повреждаемостью РЛ ТВД.

Экспериментальная апробация полученных результатов выполнена на ТРДД типа CFM56-5B/4.

Степень разработанности вопроса

Исследования в области оценки ресурса узлов авиационного двигателя (АД) уже проводились специалистами опытно-конструкторского бюро им. А. Люльки (Г. П. Гогаев, Е. Ю. Марчуков, М. А. Богданов, И. А. Шубин), в трудах которых был отражен современный механизм подсчета накопленной повреждаемости основных узлов ГТД с учетом влияния наземных и полетных условий.

Доктор технических наук И. Х. Бадамшин в своих исследованиях оценивал влияние статического и термоциклического нагружения на ресурс РЛ ТВД расчетными методами, принимая температуру подогрева как входной параметр, оставляя открытым вопрос об определении времени подачи горячего воздуха для достижения необходимой температуры РЛ перед запуском двигателя.

Тем не менее существующие методики не устанавливают четкой связи между температурным напором (разностью температур внутренней и наружной стенок) и степенью повреждаемости РЛ ТВД, а также влиянием предварительного подогрева на нее.

Апробация работы

Материалы исследования обсуждались на международных конференциях, кафедрах, научно-технических семинарах:

1. Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию МГТУ ГА “Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества”, г. Москва, 2021.
2. 22-я Международной конференции “Авиация и космонавтика”, г. Москва,

2023.

3. Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации “Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества”, г. Москва, 2023.

4. XVII Всероссийской научно-практической конференции “Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации”, г. Иркутск, 2023.

Публикации по теме исследования

Основные материалы исследования опубликованы в 2 статьях, рецензируемых в научных журналах при Минобрнауки РФ, а также 3 публикациях в трудах международных конференций.

В первой главе приведен анализ и выполнена критическая оценка исследований в области повреждаемости РЛ ТВД, а также освещена классификация существующих методов уменьшения повреждаемости основных узлов ГТД – среди них конструктивные, технологические и эксплуатационные; рассмотрены основные факторы, влияющие на состояние РЛ ТВД. Произведен обзор существующих методик подсчета накопленной повреждаемости, определен математический аппарат для оценки напряженно-деформированного состояния РЛ ТВД.

Во второй главе произведено моделирование напряженно-деформированного состояния РЛ ТВД и осуществлена оценка изменения повреждаемости РЛ ТВД ТРДД перед запуском. Для этого произведена оценка действующих напряжений на РЛ σ_d путем моделирования напряженно-деформированного состояния.

$$\sigma_d = \sigma_n + \sigma_p + \sigma_t,$$

где σ_n - напряжение изгиба от действия газовых сил, σ_p - напряжение растяжения от действия центробежной силы, σ_t – термические напряжения.

Результатом прочностного расчета является эпюра распределения действующих напряжений по высоте пера РЛ ТВД, позволяющая определить опасное сечение, для которого проводился расчет изменения повреждаемости. При этом входными параметрами являются значения полных давлений и

температур на входе и выходе из ступени ТВД, полученные из термогазодинамического расчета по среднему диаметру на режиме “Земной Малый Газ”. На рисунке 1 приведена схема проточной части ступени ТВД.

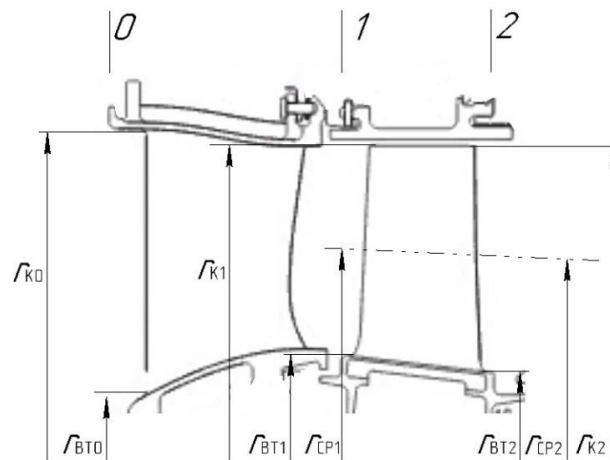


Рисунок 1 – схема проточной части ступени ТВД

0,1,2 – параметры рабочего тела на входе в ступень ТВД, на входе в рабочее колесо и на выходе из ступени соответственно

- r_{k0} – радиус концевой сечения на входе в СА (сечение 0);
- r_{bt0} – радиус втулочного сечения на входе в СА (сечение 0);
- r_{k1} – радиус концевой сечения на входе в РК (сечение 1);
- r_{cp1} – радиус среднего сечения на входе в РК (сечение 1);
- r_{bt1} – радиус втулочного сечения на входе в РК (сечение 1);
- r_{k2} – радиус концевой сечения на выходе из РК (сечение 2);
- r_{cp2} – радиус среднего сечения на выходе из РК (сечение 2);
- r_{bt2} – радиус втулочного сечения на выходе из РК (сечение 2);

При формировании расчетной модели перо лопатки было разбито на шесть равных участков (рисунок 2).

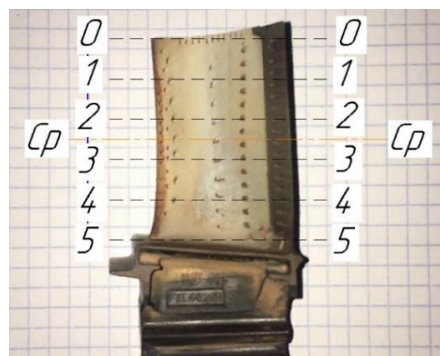


Рисунок 2 – расчетная схема РЛ ТВД

0-5 поперечные сечения РЛ ТВД от втулки до периферии пера, Cp – среднее сечение пера РЛ ТВД

Определена радиальная неравномерность распределения температуры по высоте рабочей лопатки (рисунок 3).

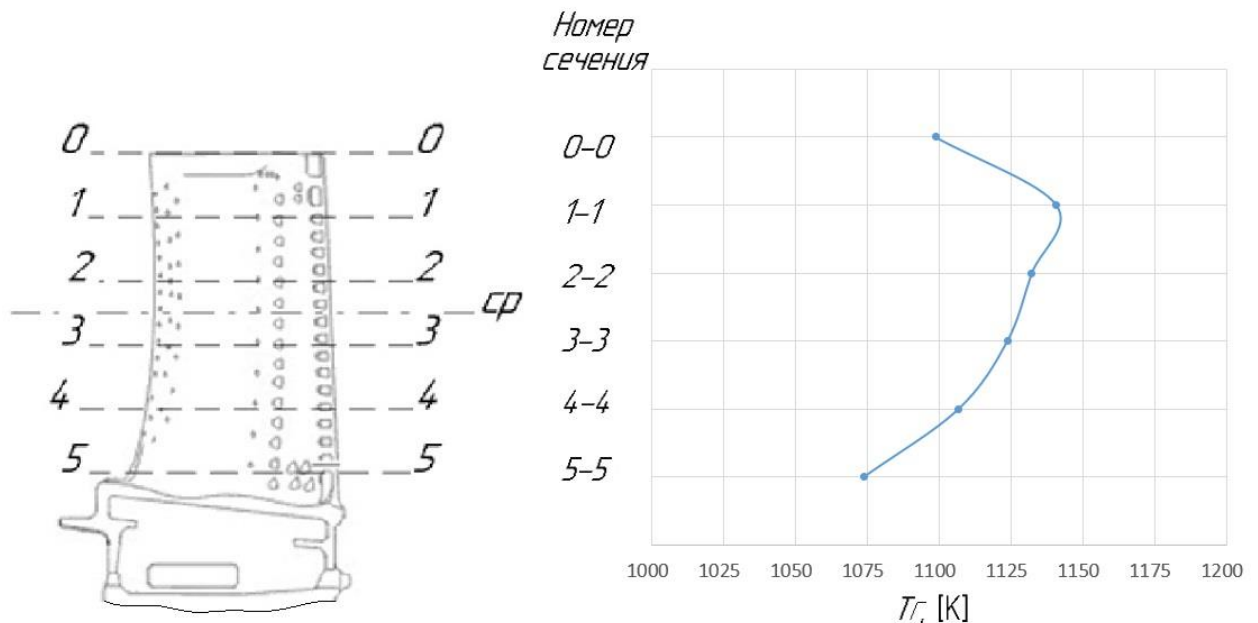


Рисунок 3 - радиальная неравномерность распределения температуры РЛ ТВД по высоте ее пера.

Был произведен расчет массово центровочных характеристик (МЦХ) для каждого сечения лопатки. На рисунке 4 изображена схема профиля в концевом 0-0, среднем и втулочном сечении 5-5 лопатки.

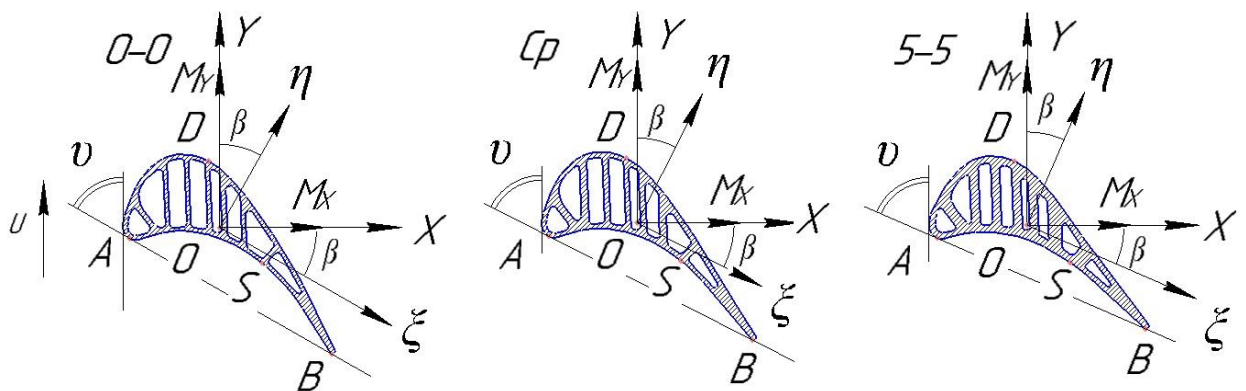


Рисунок 4 – профиль РЛ ТВД в концевом 0-0, среднем и втулочном сечении 5-5

O – точка центра масс; OX – ось главной принятой системы координат, параллельная направлению набегающего потока; OY – ось главной принятой системы координат, параллельная направлению окружной скорости U ; ξ, η – главные оси инерции; v – угол установки лопатки, определяемый хордой профиля AB , вследствие закрутки лопатки этот угол имеет свое значение для каждого сечения; A, B, C – точки наиболее удаленные от оси ξ , в которых возникают наибольшие напряжения; β – угол поворота осей инерции ξ, η

относительно главных принятых осей OX, OY ; S – произвольная точка; M_Y, M_X – изгибающие моменты по осям OX, OY

Произведена оценка повреждаемости РЛ ТВД в штатном режиме (без подогрева) и в случае применения предлагаемой технологии (с подогревом). Произведен анализ влияния изменения повреждаемости РЛ ТВД на ресурс двигателя в целом.

В рамках принятой расчетной модели суммарная степень повреждаемости $\Sigma\P$:

$$\Sigma\P = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 + \Pi_5 = \text{const} < 1, \quad (1)$$

где Π_1 – повреждаемость по количеству циклов (запусков) 0 – ЗМГ; Π_2 – повреждаемость (определяется по аналогии с Π_1) по количеству переходов ЗМГ – ВЗЛ (Взлетный режим работы двигателя); Π_3 – повреждаемость по статической прочности на режиме ВЗЛ; Π_4 – повреждаемость по статической прочности лопатки на режиме МП (Максимальный Продолжительный режим работы двигателя); Π_5 – повреждаемость по статической прочности лопатки на режиме МК (Максимальный Крейсерский режим работы двигателя).

Повреждаемости по циклической усталости Π_1, Π_2 :

$$\Pi_i = \frac{N_{\text{ц.н.}i}}{N_p}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ц.н.}i}$ – допустимое количество циклов нагружения; N_p – количество циклов до разрушения (0 – ЗМГ, ЗМГ – ВЗЛ).

Была принята расчетная модель определения циклов до разрушения N_p через уравнение Коффина – Мэнсона:

$$\Delta\varepsilon = \left(\ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right)^{-0,6} \cdot N_p^{-0,6} + \frac{3,5 \cdot \sigma_\tau^t}{E} \cdot N_p^{-0,12}, \quad (3)$$

где ψ – коэффициент сужения металла; $\Delta\varepsilon$ – размах деформаций; σ_τ^t – предел длительной прочности; E – модуль упругости.

В свою очередь размах деформации $\Delta\varepsilon$:

$$\Delta\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon_\alpha, \quad (4)$$

где ε_α – амплитуда деформации, которая в свою очередь определяется как:

$$\varepsilon_{\alpha} = \Delta T \cdot \alpha, \quad (5)$$

где ΔT – перепад температур; α – коэффициент теплового расширения металла.

Повреждаемости по статической наработке Π_3, Π_4, Π_5 :

$$\Pi_i = \frac{\tau_i}{\tau_p}, \quad (6)$$

где τ_i – допустимая наработка на определенном режиме; τ_p – наработка на определенном режиме до разрушения.

Наработка на определенном режиме до разрушения τ_p через параметр Ларсона-Миллера P :

$$P = T_{\text{лмг}} (\lg \tau + 20), \quad (7)$$

где $T_{\text{л}}$ – температура лопатки.

Тогда изменение допустимой степени повреждаемости $\Delta \Sigma \Pi$:

$$\Delta \Sigma \Pi = \Sigma \Pi - \Sigma \Pi', \quad (8)$$

где $\Sigma \Pi$ – суммарная степень повреждаемости без подогрева; $\Sigma \Pi'$ – суммарная степень повреждаемости с применением предварительного подогрева.

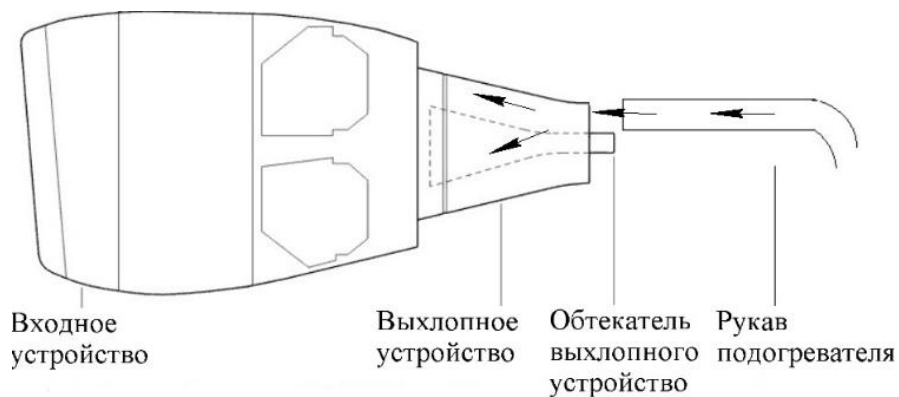
В третьей главе произведено эмпирическое обоснование времени, необходимого для подогрева двигателя. Проведен сравнительный анализ различных конфигураций оборудования, используемого при подогреве двигателя по критерию времени. Составлены рекомендации по уменьшению повреждаемости РЛ ТВД ТРДД при запуске.

Технология предварительного подогрева сводится к подаче горячего воздуха от наземного источника (моторного подогревателя) во внутренний контур двигателя со стороны сопла (рисунок 5).

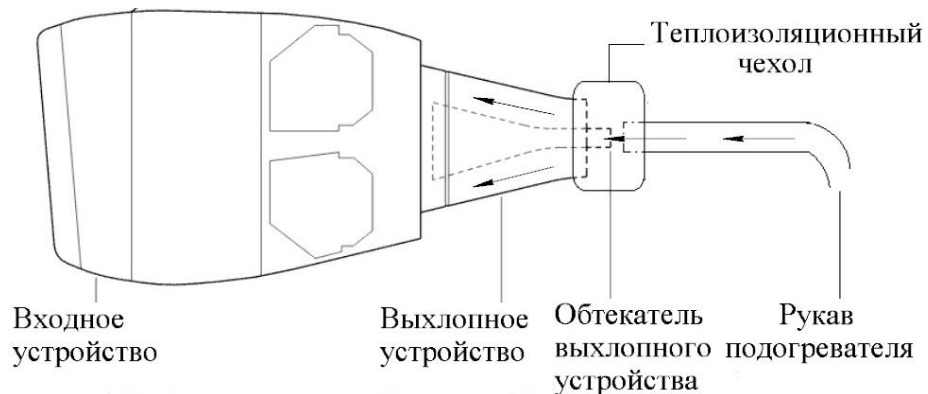


Рисунок 5 - подача горячего воздуха

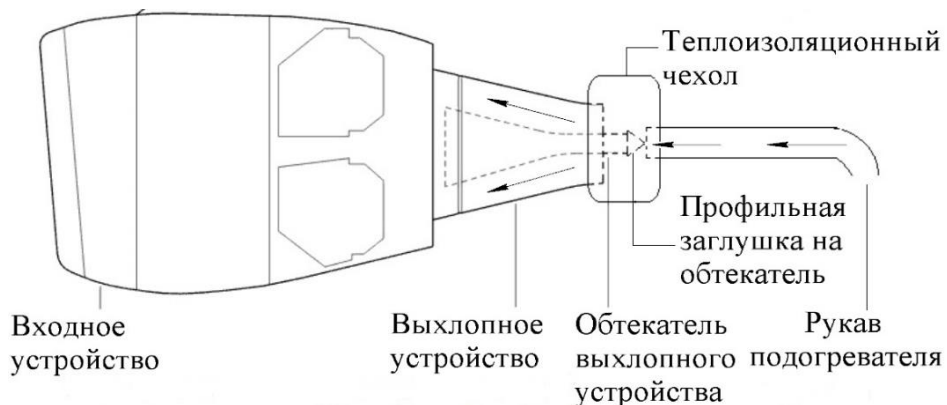
Определение времени прогрева РЛ ТВД осуществлялось при помощи термопар и пирометров на натурном объекте при различных способах подачи горячего воздуха на турбину (рисунок 6,а; рисунок 6,б; рисунок 6,в).



а) конфигурация оборудования 1 - рукав моторного подогревателя направляется в сторону, противоположную от бороскопической пробки



б) конфигурация оборудования 2 с применением теплоизоляционного чехла



в) конфигурация оборудования 3 с применением теплоизоляционного чехла и профильной заглушки

Рисунок 6 - схемы подогрева при различных конфигурациях оборудования

Для учета радиальной неравномерности температуры были произведены замеры температуры входной кромки в трех сечениях РЛ ТВД: $R_{пер}$ —

периферийная часть пера лопатки, $R_{\text{ср}}$ – среднее сечение пера лопатки, $R_{\text{корн}}$ – корневое сечение пера лопатки (рисунок 7).

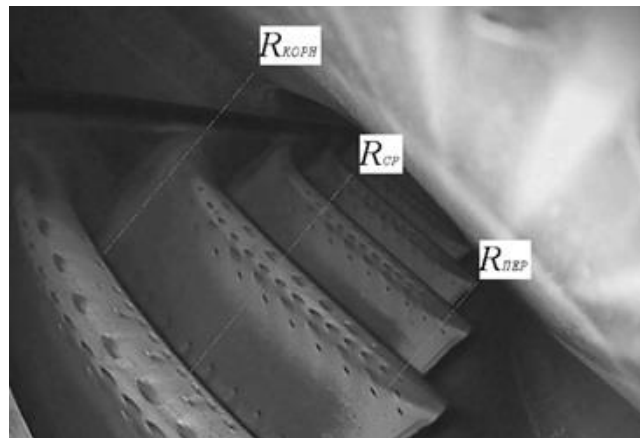


Рисунок 7 – точки замера температуры на пере РЛ ТВД

Сводные зависимости достигнутой температуры пера лопатки t от времени прогрева τ для различных конфигураций представлены на рисунке 8.

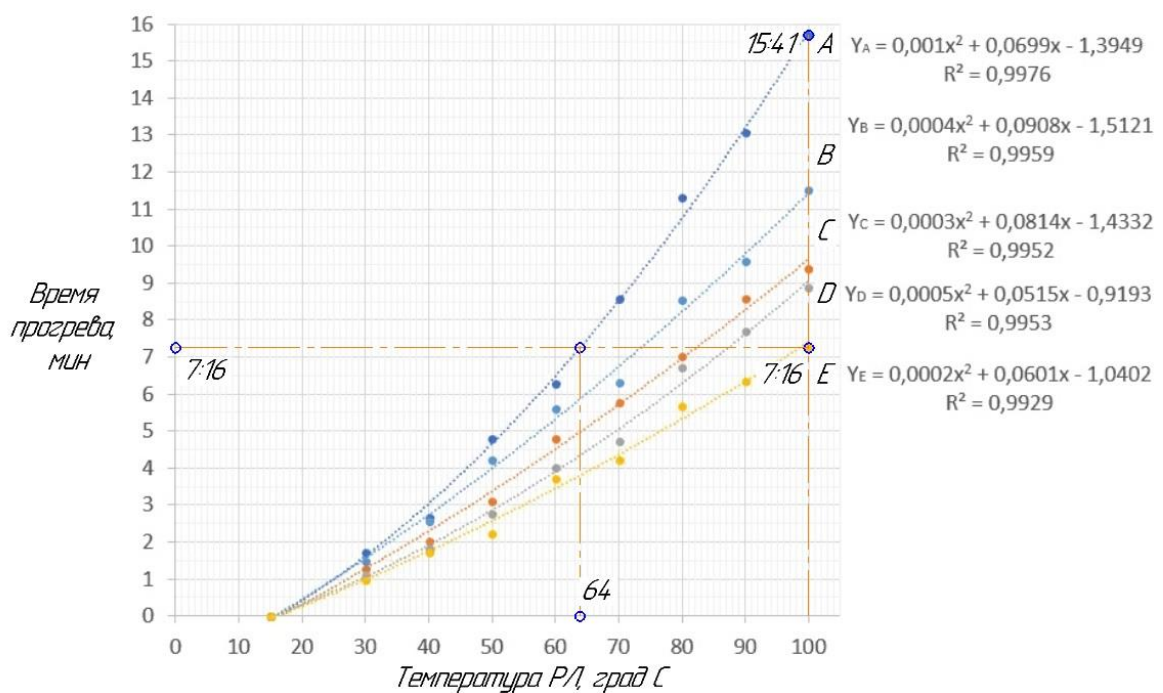


Рисунок 8 - время прогрева РЛ ТВД для различных конфигураций оборудования

график “А” – конфигурация оборудования, при которой рукав моторного подогревателя направляется в сторону, противоположную от бороскопической пробки (конфигурация оборудования 1);

график “В” – конфигурация оборудования с использованием теплоизоляционного чехла (конфигурация оборудования 2);

график “С” – конфигурация оборудования с использованием профильной заглушки и теплоизоляционного чехла (конфигурация оборудования 3);

график “D” – конфигурация оборудования с применением теплоизоляционного чехла и вращения ротора (конфигурация оборудования 2 с вращением ротора);

график “Е” – конфигурация оборудования с применением профильной заглушки, теплоизоляционного чехла и вращения ротора (конфигурация оборудования 3).

Минимальное время прогрева лопатки достигается при использовании конфигурации оборудования с применением профильной заглушки, теплоизоляционного чехла и вращения ротора.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения научно-квалификационной работы:

1. Выполнен анализ работ в области исследования оценки повреждаемости РЛ ТВД, выделены наиболее эффективные методы и способы уменьшения повреждаемости РЛ ТВД.
2. Определено опасное сечение РЛ ТВД и осуществлена оценка изменения повреждаемости РЛ ТВД при использовании предварительного подогрева.
3. Эмпирически определена конфигурация оборудования, позволяющая прогреть РЛ ТВД за минимальное время.
4. Разработаны рекомендации по уменьшению повреждаемости РЛ ТВД.