

УДК 621.43.7

Анипко О.Б., Логинов В.В., Алпатов В.Е.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЬНОГО ОТСЕКА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЕТА МИ-2 С НОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ АИ-450*Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, ОАО “Мотор Сич”*

В настоящее время модернизация является одним из способов достижения современных требований летно-технических характеристик летательных аппаратов (ЛА), что выпустились раньше. В Украине эксплуатируется и находится на хранении большой парк ЛА, в том числе и такие, которые могут быть модернизированы. Одним из таких ЛА является легкий вертолет Ми-2 [1–3]. В качестве модернизации предлагается замена двигателей ГТД-350 [4,5] на более современные ГТД – АИ-450. В связи с этим, актуальной становится задача оценки эффективности систем силовой установки и характеристик модернизированного ЛА.

Установка двигателя АИ-450 влечет за собой перекомпоновку двигательного отсека (ДО), изменение свободного пространства в нем, изменение объема двигателя, а также изменение температурного поля и тепловой напряженности двигательного отсека [6]. Все это, в свою очередь, требует оценки влияния изменения этих характеристик на пожарную безопасность и возможность применения противопожарного оборудования (ППО) вертолета Ми-2 [7].

Целью данной статьи является сравнительная оценка пожарной безопасности ДО с двигателями ГТД-350 и АИ-450.

Проведем анализ теплового состояния поверхностей силовой установки на разных режимах работы. Общий вид и конструктивно-компоновочная схема двигателей ГТД-350 и АИ-450 показаны на рис. 1 и рис. 2. Рабочий процесс в двигателе АИ-450 аналогичен ГТД-350 за исключением параметрических характеристик и некоторых конструктивных особенностей. Исходя из конструктивно-компоновочной схемы двигательного отсека и температурных режимов работы силовой установки, методика оценки основных показателей эффективности противопожарной системы двигательного отсека силовой установки вертолета Ми-2, должна включать:

- оценку теплонапряженности пространства двигательного отсека;
- оценку вкладов естественной и вынужденной конвекции для различных режимов полета;
- выявление наиболее теплонапряженных участков и сопоставление их расположения с экспликацией датчиков и распылителей.

Оценка теплонапряженности пространства двигательного отсека может быть произведена на основе решения задачи о естественной и смешанной (естественной и вынужденной) конвекции воздуха в полостях между элементами двигателя и капотом (кожухом) двигательного отсека. Эти задачи соответствуют двум режимам эксплуатации:

- а) висение, когда воздух через клапанную заслонку в ДО не поступает (скорость набегающего потока равна нулю);
- б) полет при максимальной скорости набегающего потока, соответствующий максимальной скорости полета ЛА. В этом случае получим тепловое состояние ДО, ко-

гда эксплуатационная нагрузка двигателя сочетается с самыми благоприятными условиями охлаждения.

При решении задач будем рассматривать течение потока в приближении пограничного слоя, а горячую часть двигателя как цилиндр [8,9].

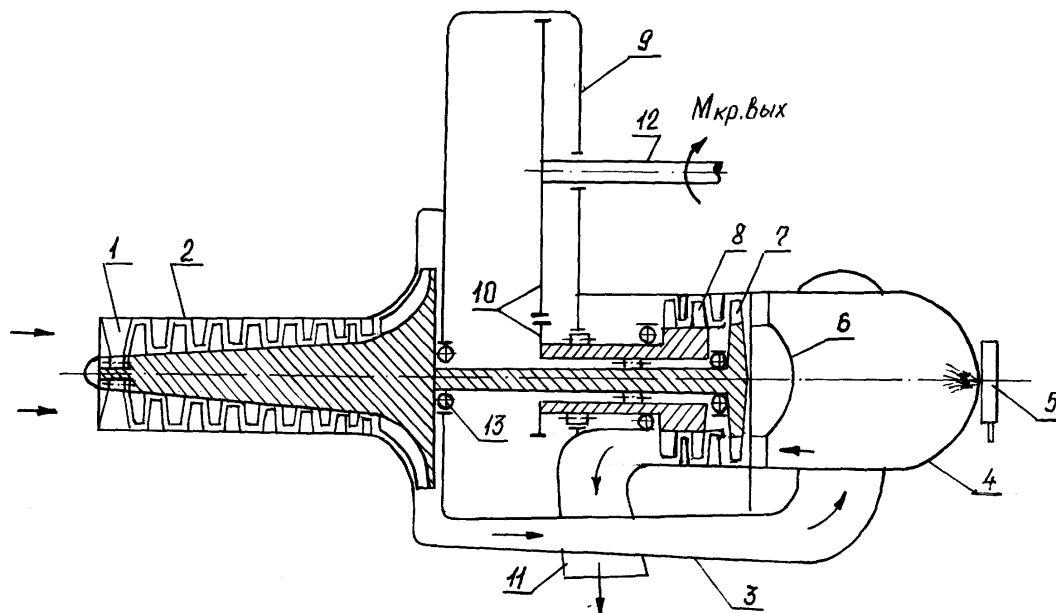


Рисунок 1 – Конструктивно-компоновочная схема двигателя ГТД-350:

- 1 – входной направляющий аппарат; 2 – осецентрибежный компрессор; 3 – воздухозаборник и подводящие трубы; 4 – камера сгорания; 5 – топливная форсунка; 6 – защитный обтекатель; 7 – турбина компрессора; 8 – свободная турбина (турбина винта); 9 – редуктор двигателя; 10 – шестерни редуктора; 11 – П-образное выходное устройство; 12 – выходной вал; 13 – опора

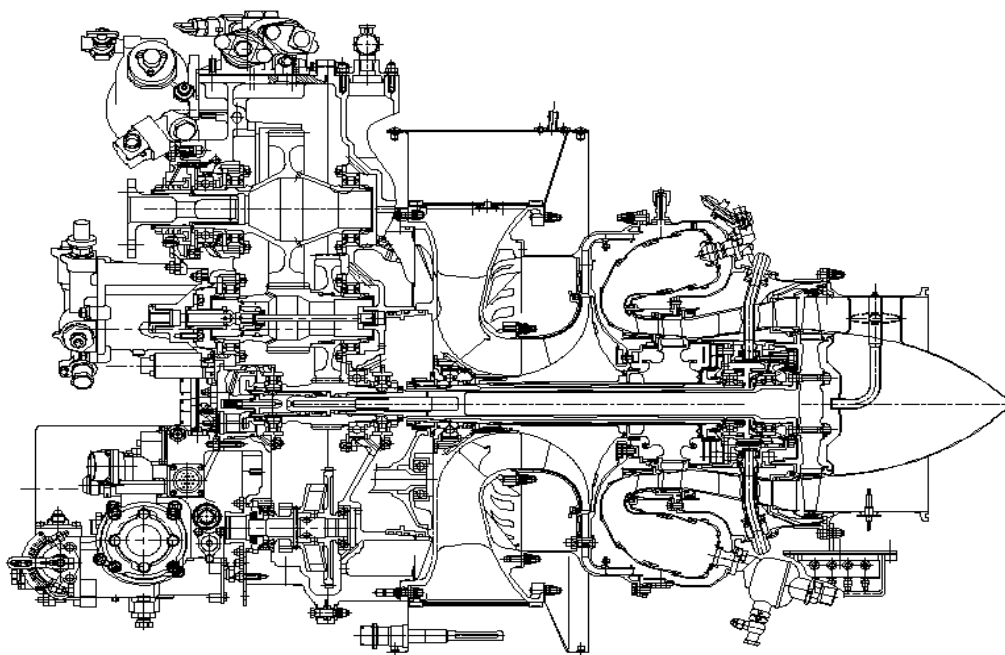


Рисунок 2 – Конструктивно-компоновочная схема двигателя АИ-450

Качественную оценку будем проводить анализируя теплообмен вдоль вертикальной пластины при естественной конвекции, затем учтем особенности вносимые кривизной поверхности, и наконец для смешанной конвекции внесем коррективы, обусловленные перемешиванием и обдувом элементов двигателя [10,11].

В приближении Буссинеска [8,10,11] для жидкости с постоянными теплофизическими характеристиками в случае двумерного течения уравнения движения имеют вид [8, 12–16]:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = g \cdot \beta \cdot (t - t_a) \cos y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = g \cdot \beta \cdot (t - t_a) \sin y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

где V_x , V_y – скорости по осям X и Y , соответственно; x , y – координаты; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения газа; t – текущая температура воздуха; t_a – температура поверхности; P_d – давление на поверхности; ν – кинематическая вязкость.

Уравнения неразрывности и энергии имеют вид [12,13]:

$$\nabla V = 0; \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t + Q' + \beta T \frac{\partial P}{\partial \tau} + \mu \Phi_v, \quad (4)$$

где ∇ – оператор Лапласа; c_p – теплоемкость; λ – коэффициент температуропроводности; Q' – внутренние источники тепла; μ – динамическая вязкость; T – температура; τ – время; Φ_v – вязкая диссипация энергии.

Система координат для цилиндра приведена на рис. 3. Рассмотрим естественную конвекцию вдоль изотермической вертикальной пластины. Будем считать течение установившимся и ламинарным, физические свойства воздуха, за исключением плотности, постоянны. Вязкой диссипацией будем пренебрегать и считать, что в потоке нет источников теплоты. Будем также предполагать, что течение, в основном, параллельно поверхности, а толщина пограничного слоя не изменяется.

Тогда теплоотдача определяется теплопроводностью через слой жидкости [12]. Скорость V_x и температура t зависят только от y , поскольку инерционными членами уравнения пренебрегали. Тогда,

$$\rho g \beta (t - t_a) + \mu \left(\frac{d^2 V_x}{dy^2} \right) = 0; \quad (5)$$

$$\lambda L \left(\frac{d^2 t}{dy^2} \right) - \rho c_p V_x (t - t_a) = 0, \quad (6)$$

где L – длина пластины.

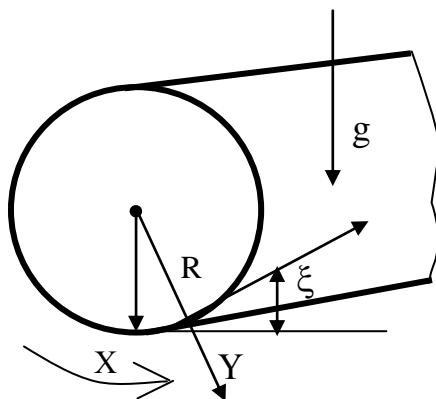


Рисунок 3 – Система координат для цилиндра

На основе этих уравнений в [12] получено критериальное уравнение для воздуха:

$$\overline{Nu} = 0.548(Gr_L \cdot Pr)^{0.25}, \quad (7)$$

где \overline{Nu} – число Нуссельта; Gr_L – критерий Грасгофа; Pr – число Прандтля.

В работе [13] приведено выражение локального значения числа Nu и его среднее значение

$$Nu(x) = 0.39(Gr_x \cdot Pr)^{0.25}; \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = 0.52(Gr_L \cdot Pr)^{0.25}. \quad (9)$$

Как видно, значения чисел \overline{Nu} , определяемые по (7) и (9), довольно близки. На основе приведенных соотношений для воздуха построены профили скорости и температуры (рис. 4 и рис. 5). Тепловой поток от нагретой поверхности равен

$$q(x) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_0 = -\theta'(0) \frac{\lambda(t_c - t_a)}{x} \sqrt[4]{\frac{Gr_x}{4}}, \quad (10)$$

где $\theta'(0)$ – избыточная теплота в нулевой точке; t_c – температура в заданном сечении.

Рассмотрим тепловой процесс у горизонтального цилиндра. Исходная задача решается путем разложения в ряд [14]. При этом принимаем толщины динамического и теплового пограничного слоев одинаковыми и равными δ . Для двумерного случая уравнения принимают вид

$$\frac{d}{dx} \left[\int_0^{\delta} V_x^2 dy \right] = g \cdot \beta \cdot \tilde{\theta}_s \cdot \sin \xi \left[\int_0^{\delta} \theta dy \right] - \nu \left(\frac{dV_x}{dy} \right)_y = 0; \quad (11)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\int_0^{\delta} V_x \theta dy \right] = -\alpha \left(\frac{d\theta}{dy} \right)_y = 0. \quad (12)$$

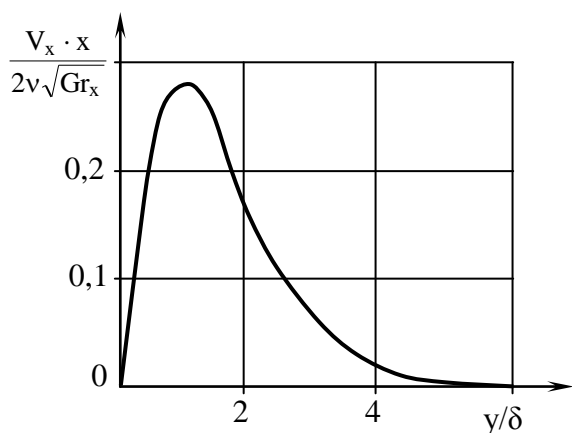


Рисунок 4 – Изменение скорости поперек пограничного слоя при течении вдоль изотермической пластины

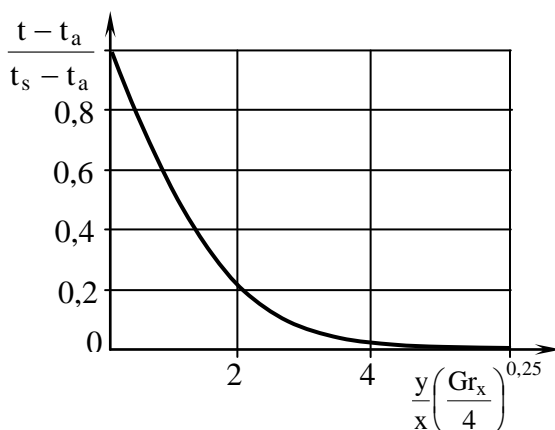


Рисунок 5 – Изменение температуры поперек пограничного слоя

Профили θ и V_x описываются выражениями

$$\theta = \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2; \quad (13)$$

$$V_x = U(x) \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2. \quad (14)$$

При этом нижняя точка расположена при $x = 0$. Тогда $\xi = \frac{2x}{D}$, где D – диаметр цилиндра. Искомые функции и $\sin \xi$ разлагаются в ряды по (x/D) и вычисляется сумма ряда для большого числа членов. На рис. 6 и рис. 7 представлены местное число Nu и максимальная тангенциальная составляющая скорости $(V_x)_{\max}$ как функции φ , где

$$\varphi = \left(\frac{360}{\pi} \right) \left(\frac{x}{D} \right).$$

Как видно из данных рис. 7 максимальная скорость на горизонтальном цилиндре имеет место в диапазоне угловой координаты $\varphi = (90 \dots 180)^\circ$. Таким образом, именно эта часть цилиндрической поверхности определяет основное движение потока воздуха над ней. В тоже время, в этом диапазоне φ теплоотдача ниже, чем в нижней полу-

окружности сечения цилиндра (рис. 3). Представленные на рис. 6 и рис. 7 данные позволяют определить абсолютное значение α и $(V_x)_{\max}$ при известных v , D и вычисленных критериях Gr и Pr для конкретных случаев.

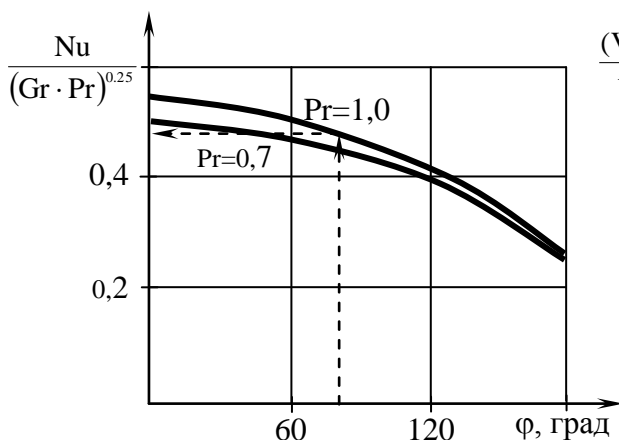


Рисунок 6 – Зависимость местного числа Nu от угловой координаты φ

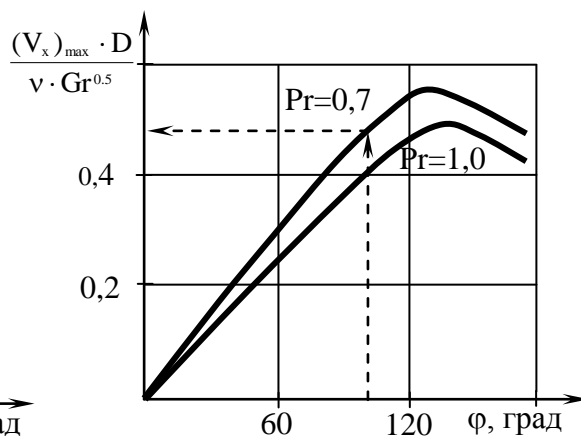


Рисунок 7 – Зависимость максимальной тангенциальной компоненты скорости от угловой координаты φ

В рассматриваемой задаче температура поверхности цилиндра составляет $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура наружного воздуха, который поступает через отверстие на охлаждение двигателя, $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, определяющая температура для теплофизических характеристик воздуха в первом приближении может быть взята как среднее арифметическое этих значений. Смешанная конвекция характеризуется суммарным вкладом естественноконвективной и вынужденной составляющих течение. Поэтому, прежде всего, необходимо оценить вклады этих составляющих.

Большинство работ посвящены прямооточному или противоточному движениям при смешанной конвекции. В рассматриваемом случае принудительный поток движется под углом близким к 90 ° к естественноконвективному току (рис. 8).

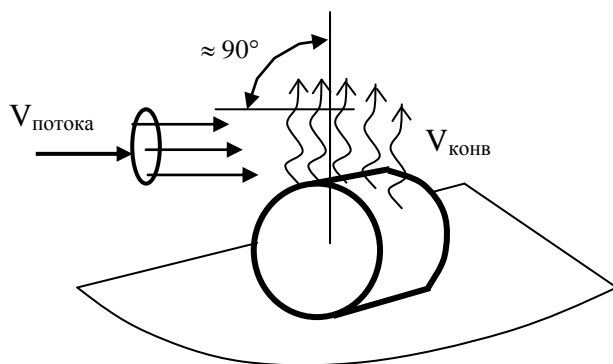


Рисунок 8 – Взаимное положение вынужденного и естественноконвективного токов

При условии, что диаметр цилиндрической части достаточно велик по сравнению с длиной участка, по которому движется вынужденный поток, воспользуемся данными о смешанной конвекции для плоской поверхности [15].

Параметр, определяющий вклады токов при смешанной конвекции

$$\frac{Gr_x}{Re_x^{2.5}}$$

Условие, при котором влияние естественной конвекции на теплоотдачу путем вынужденной конвекции менее 10 %:

$$|Gr_x| \leq 0.083 Re_x^{2.5}. \quad (15)$$

В работе [16] для выполнения условия о влиянии естественной конвекции на теплоотдачу при вынужденной конвекции при $Pr = 0.72$ менее 5 % предложено условие:

$$\frac{Gr_x}{Re_x^{2.5}} \leq 0.041. \quad (16)$$

Следует подчеркнуть, что чем меньше значение критерия Pr , тем больше влияние выталкивающей силы, поскольку в этом случае возникает более толстый пограничный слой. Проведем сравнительный анализ теплового состояния ДО силовой установки вертолета Ми-2 с двигателями ГТД-350 и АИ-450. Конструктивно-компоновочная схема двигателя ГТД-350 такова, что при расположении его на вертолет, двигательный отсек условно можно разделить на две части: “холодную” и “горячую”. Холодная часть располагается в области компрессора, а горячая – в области камеры сгорания и выхлопных патрубков. Кроме того, в холодной части располагается и маслобак. Исходя из теплового состояния этих узлов, предусмотрена вентиляция воздуха, поступающего в двигательный отсек. Важно, чтобы на всех режимах полета происходила вентиляция паров топлива и масла, так как их скопление недопустимо из-за взрывоопасности. Поэтому, на модернизированном вертолете Ми-2 предполагаемая система вентиляции должна включать заборные клапаны воздуха в области горячих частей двигателя или предусмотреть отверстия на капоте отсека для отвода горячего воздуха, как это сделано на серийном Ми-2. Исходя из конструктивно-компоновочной схемы двигательного отсека силовой установки вертолета Ми-2 с двигателями АИ-450 с поворотным выхлопным устройством, имеющим эжектор (рис. 9), можно сделать анализ теплового состояния отсека.

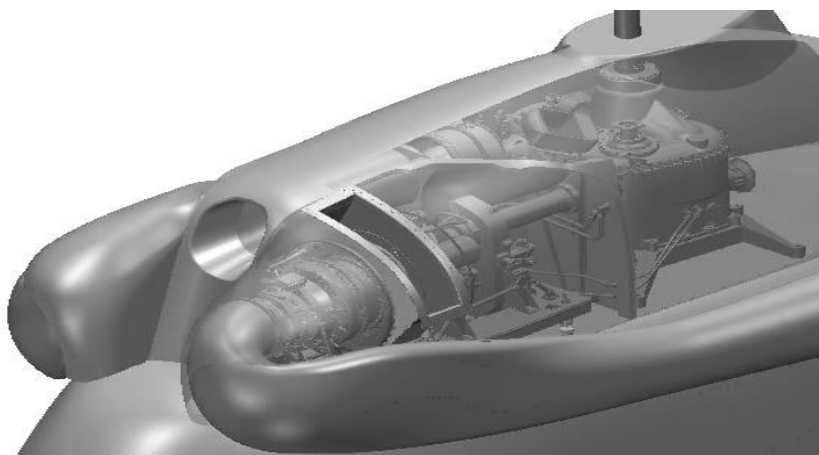


Рисунок 9 – Компоновка двигательного отсека и главного редуктора

С помощью рис. 6 и рис. 7 определим критические значения числа Nu и V_x для горячих частей исследуемых двигателей [17]. Результаты расчетов приведены в таблице 1, а изображение зависимости числа Nu и V_x по угловой координате горячей части приведено на рис. 10.

Таблица 1 – Сравнение тепловых характеристик двигателей

ГТД-350				АИ-450			
Gr= 27517761 D=0.3 м Re=244751	φ	Nu	V_x , м/с	Gr=65227854 D=0.4 м Re=326334	φ	Nu	V_x , м/с
	30°	32.46	0.17		30°	40.28	0.2
	60°	31.13	0.38		60°	38.6	0.44
	90°	29.15	0.63		90°	36.2	0.73
	120°	26.5	0.75		120°	32.9	0.87
	150°	21.2	0.79		150°	26.3	0.91
	180°	17.2	0.72		180°	21.4	0.83

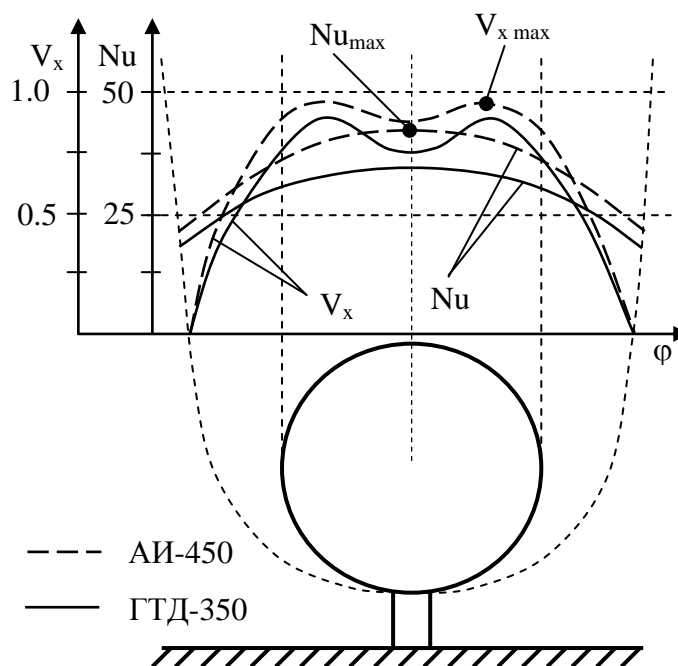


Рисунок 10 – Зависимость числа Nu и V_x по угловой координате горячей части

Результаты расчетов параметров, определяющие вклады токов при смешанной конвекции при разных скоростях набегающего потока приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры при смешанной конвекции

$V_{набег.}, \text{ м/с}$	ГТД-350		АИ-450	
	$\frac{Gr_x}{Re_x^{2.5}}$	$0.083 Re_x^{2.5}$	$\frac{Gr_x}{Re_x^{2.5}}$	$0.083 Re_x^{2.5}$
0.1	16.81	135839.7	19.41	278908.9
1.0	0.053	42969725.4	0.0614	88208293.6
2.0	0.0094	243073474.2	0.0108	498981460.4
80.0	$9.29 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{12}$	$1.072 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{12}$

Учитывая полученные данные, для режимов полета, когда $V_{принужд} > 2$ м/с вклад естественной конвекции менее 5 или 10 %. Однако, когда этот вклад составляет вели-

чину соответствующую 5 % и более, это соответствует режимам полета – висение и движение со скоростью до ≈ 20 м/с. Эти режимы являются неблагоприятными, с точки зрения, обеспечения пожарной безопасности двигательного отсека.

Для учета особенностей возможного воспламенения или возгорания на этих режимах, с применением данных рис. 10, можно рекомендовать установку датчиков в точках максимумов локальных значений числа Nu и скорости V_x . На вертолете Ми-2 с двигателями ГТД-350 датчики в двигательном отсеке располагаются на уровне не выше редукторной части двигателя. Однако, целесообразно расположить несколько датчиков над двигателем в рекомендованных областях.

Согласно предварительных оценок, для эффективного охлаждения силовой установки необходимо предусмотреть расход воздуха, поступающий в горячую часть двигательного отсека, не менее 0.6 кг/с.

Теплонапряженность пространства двигательного отсека можно оценить по известным параметрам [17]:

$$Q_V = \frac{Q}{V} = \frac{Q_H^P \cdot G_T}{V_{СП}}, \quad (17)$$

где Q_H^P – низшая теплотворная способность топлива; G_T – расход топлива; $V_{СП}$ – объем свободного пространства двигательного отсека – разница между объемом пространства двигательного отсека и объемом двигателя с элементами систем обеспечения его работы.

Параметры теплонапряженности пространства двигательного отсека с разными двигателями приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Теплонапряженность пространства двигательного отсека

	ГТД-350	АИ-450
$V_{СП}, \text{ м}^3$	0.408	0.405
$Q_V, \text{ Вт/м}^3$	19111.46	19253.02

Для анализа концентрации вещества, которое может погасить пожар в двигательном отсеке и минимизировать вероятность повторного воспламенения, воспользуемся величиной свободного пространства отсека. При использовании баллона с огнегасящим веществом с серийного вертолета Ми-2 известна концентрация вещества, которое может погасить пожар в двигательном отсеке:

$$c_{ОВ} = \frac{M_{ОВ}}{V_{СП}}, \quad (18)$$

где $M_{ОВ}$ – масса огнегасящего вещества; $c_{ОВ}$ – концентрация огнегасящего вещества.

Будем полагать, что при одинаковой массе огнегасящего вещества и разных объемах свободного пространства отсека, концентрации вещества для тушения пожара прямо пропорциональна свободному пространству

$$\frac{c_{OB}^{350}}{c_{OB}^{450}} \approx \frac{V_{СП}^{350}}{V_{СП}^{450}}, \quad (19)$$

где $\frac{c_{OB}^{350}}{c_{OB}^{450}}$ – отношение величин концентраций огнегасящего вещества в случае установ-

ки в отсек двигателей ГТД-350 и АИ-450, соответственно; $\frac{V_{СП}^{350}}{V_{СП}^{450}}$ – отношение величин

объема свободного пространства отсека в случае установки в отсек двигателей ГТД-350 и АИ-450, соответственно.

Если $\frac{c_{OB}^{350}}{c_{OB}^{450}} < 1$, тогда для тушения пожара в объеме двигательного отсека огнега-

ссящего вещества не хватит. Если $\frac{c_{OB}^{350}}{c_{OB}^{450}} \geq 1$, тогда огнегасящего вещества достаточно для

тушения. По имеющимся данным для двух ДО можно определить, что $\frac{c_{OB}^{350}}{c_{OB}^{450}} = 1.01$.

Следовательно, в случае пожара в двигательном отсеке вертолета Ми-2 с двигателем АИ-450 огнегасящего вещества будет достаточно для тушения пожара.

Таким образом, в заключение можно отметить, что:

1. Наиболее неблагоприятным режимом полета является режим висения и полета до 20 км/ч.

2. На основании решения задачи о смешанной и естественной конвекции определены наиболее информативные области установки датчиков, соответствующие максимальным значениям теплоотдачи и скорости естественного конвективного потока на неблагоприятных режимах полета (от висения до полета со скоростью не более 20 км/ч).

3. Тепловые параметры существующих элементов противопожарной системы удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к двигательному отсеку модифицированного вертолета Ми-2 с двигателем АИ-450 с поворотным выхлопным устройством, имеющим эжектор.

4. Показано, что изменение объема двигательного отсека не повлечет за собой изменение количества огнегасящего вещества в баллонах противопожарной системы.

Кроме того, разработанный подход к оценке пожаробезопасности может быть рекомендован при модернизации с заменой двигателя на других транспортных объектах.

Литература

1. Романчук В.Н., Красильников В.В. Вертолет Ми-2. – М.: Транспорт, 1972.
2. Данилов В.А., Романчук В.Н. Вертолет Ми-2. – М.: Издательство ДОСААФ СССР, 1983.
3. Исаков Д.И., Гнатюк Н.Р., Шевченко С.В. Особенности конструкции и эксплуатации вертолета Ми-2. Учеб.-метод. пособие. Харьков: ХИЛ ВВС, 1997. – 127 с.

4. Е.И. Никитин. Турбовальный двигатель ГТД-350. М.: Машиностроение, 1978. – 180 с.
5. А.Є. Тіхоміров, М.О. Туголуков, О.В. Козачок. Конструкція та експлуатація силової установки навчального вертольоту. Харків: ХУ ПС, 2005. – 161 с.
6. Техническое описание вертолета Ми-2. Книга 1. Конструкция вертолета. – М.: Машиностроение, 1967.
7. Туркин К.Д. и др. Конструкция летательных аппаратов. Часть 2. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1985. – 245 с.
8. Крейт, Блек. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1984.
9. Джакурия И. Естественная конвекция. М.: Мир, 1983.
10. Исаченко В.П., Осипова П.А. Теплопередача. М.: Энергия, 1976.
11. Себиси, Брэдшоу. Конвективный теплообмен. М.: Мир, 1986.
12. Oberbeck A., An. Phys. Chem., № 7. – 1979. – 271 p.
13. Schmidt E., Beckmann W., Tech. Mech. Thermodyn., № 1. – 1930. – p. 341-391.
14. Merk H., Prins J. A. Appl. Sci. Res., Sec. A. Path 1,2,3. – 1953–1954.
15. Saville D., Churchill S.J. Fluid Mech., № 29, 1967. – 391 p.
16. Tribus M. Trans ASME, № 80, 1958. – 1180 p.
17. Дубовкин Н.Ф. и др. Справочник “Физикохимические и эксплуатационные свойства реактивных топлив”. – М.: Химия, 1985. – 240 с.

УДК 621.43.7

Аніпко О.Б., Логінов В.В., Алпатов В.Є.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОЇ СИСТЕМИ ВІДСІКУ ДВИГУНА СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЬОТУ МІ-2 З НОВИМ ДВИГУНОМ АІ-450

Обґрунтована можливість застосування протипожежного устаткування у відсіку двигуна серійного вертольоту Мі-2 на модернізованому вертольоті Мі-2 із двигунами АІ-450 та з поворотним вихлопним пристроєм, що має ежектор. На підставі рішення задачі про змішану і природну конвекцію визначені найбільш інформативні області установки датчиків, що відповідають максимальним значенням тепловіддачі і швидкості природного конвективного потоку на несприятливих режимах польоту (від висіння до польоту зі швидкістю не більше 20 км/год).