

Теоретическое исследование температурных режимов при обтекании осесимметричных тел, транспортируемые на внешней подвеске летательных аппаратов

Маскайкин В.А.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: vladimir.maskaykin@mail.ru*

Статья поступила 13.03.2020

Аннотация

В данной статье рассматриваются температурные режимы при обтекании транспортируемых осесимметричных тел внутренняя температура, которых имеет ограничения. Условия, при которых происходит транспортировка осесимметричных тел, – это отрицательная температура внешней среды и её воздушное возмущение, возникающее при транспортировке на внешней подвеске летательных аппаратов. При анализе данной задачи возникает необходимость минимизации влияния воздействия внешней среды на состояние транспортируемого объекта.

Ключевые слова: нестационарная теплопроводность, воздушное возмущение внешней среды, транспортировка, внешняя подвеска летательных аппаратов, осесимметричное тело.

Вопросом теплопередачи в авиационной технике посвящаются многие работы отечественных и зарубежных авторов [1-6]. В данной статье рассматривается одна из актуальных задач – влияния термических процессов на объекты, транспортируемые на внешней подвеске летательных аппаратов (ЛА) [7,8] в условиях Арктики или при транспортировке в верхней области тропосферы [10,11,12].

Поставленная задача решалась путем моделирования обтекания твёрдого тела в газовой среде, включая теплообмен с использованием метода конечных элементов. Предполагается, что воздействие возмущения воздушной среды на объект происходит в горизонтальной плоскости.

Основные уравнения для расчета течения и теплообмена использовались уравнение Навье – Стокса и законы сохранения массы, момента и энергии [9]:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \rho F - \text{grad } p + (\xi + \mu) \text{grad div}(v) + \mu \Delta v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \text{grad } T) + \\ + \left\{ \xi (\text{div } v)^2 + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + \mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$p = f_1(\rho, T), \quad S = f_2(\rho, T), \quad (4)$$

где ρ – плотность, v – скорость, p – давление текущей среды, t – время, F – вектор объемно силы, c_p – удельная теплоемкость, q – количество теплоты, подводимое к единице объёма в единицу времени, μ, ξ – коэффициенты динамической и объемной вязкости, λ – коэффициент теплопроводности, S – энтропия.

В модели численного моделирования аэродинамических и термических расчетов в качестве объекта исследования принят цилиндр сплошного сечения. Влияние сопротивления встречному потоку воздуха носовой части не учитывается. То есть рассматривается обтекание боковой поверхности цилиндра. Такие варианты обуславливаются тем, что разнообразия конструктивно-компоновочных форм транспортируемых объектов велико. Заданные материалы, широко применяющиеся в качестве корпуса осесимметричного тела, приняты: АМг6, Сталь 45, стеклопластик, [14,15,16]. Шероховатость поверхности осесимметричного тела в расчетной модели не учитывается. Временной интервал исследования процесса теплообмена принят от 60 до 600 с.

В расчетной части за параметры внешних факторов взяты усредненные значения условий Арктики и нижнего слоя атмосферы [10,11,12]. В качестве транспортирующего воздушного средства рассматривается вертолет с соответствующими усредненными эксплуатационными параметрами полета [5].

Исходные данные численного моделирования представлены в таблицах 1,2.

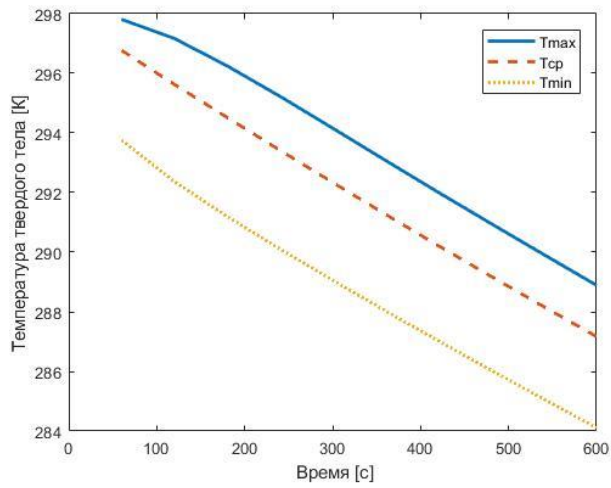
Таблица 1.

Параметр	Значение
Температура внешней среды, К	223
Начальная температур объекта, К	298
Диаметр объекта, м	0,5
Длина объекта, м	3
Скорость ЛА, м/с	70

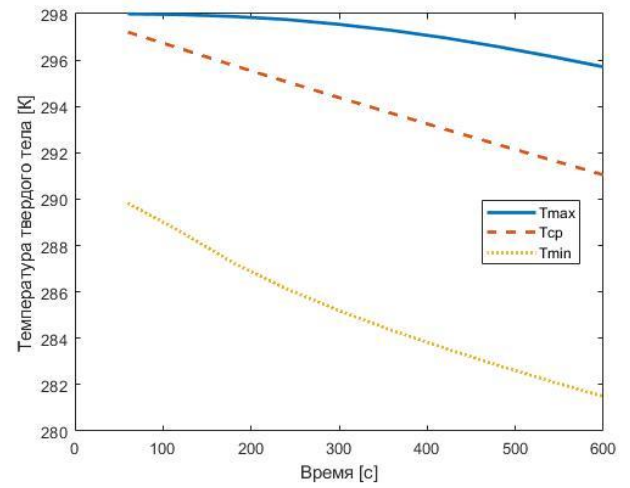
Таблица 2.

Материал	Характеристики		
	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
АМг6	2640	922	122
Д16	2800	922	130
Сталь 45	7826	473	48
Стеклопластик ВФТ-С	1800	962	0,32
Воздушная среда	1,5	1000	0,02

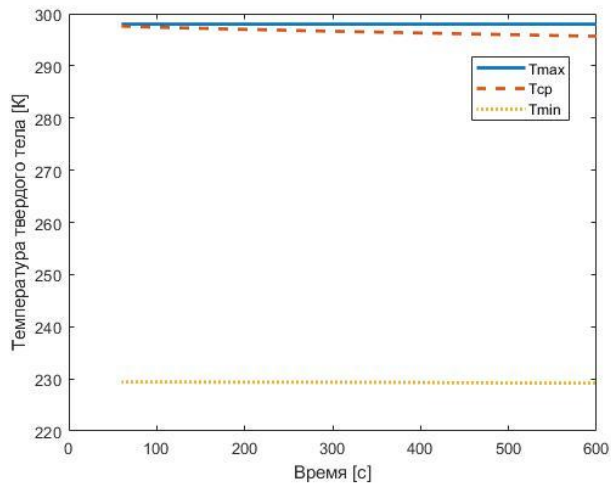
Результаты расчетов теплопередачи представлены на рисунках 1-4.



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимость температуры осесимметричного тела от времени (теплопередача с материалом твердого тела: а) АМг6; б) сталь 45; в) стеклопластик ВФТ-С).

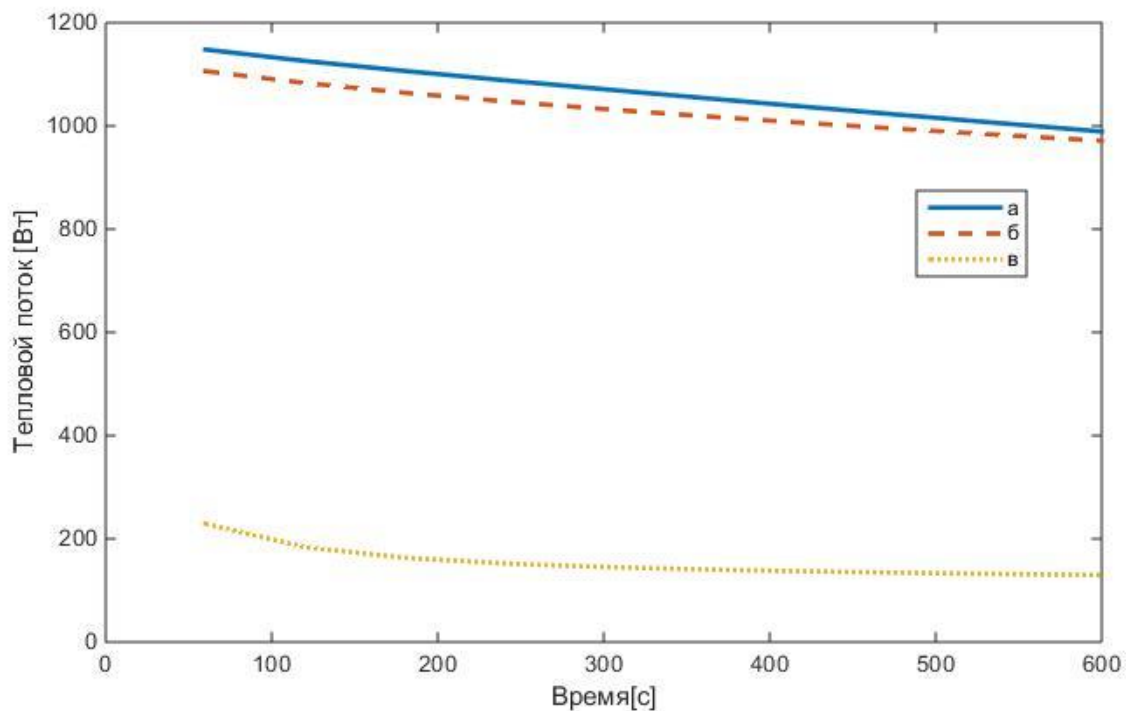
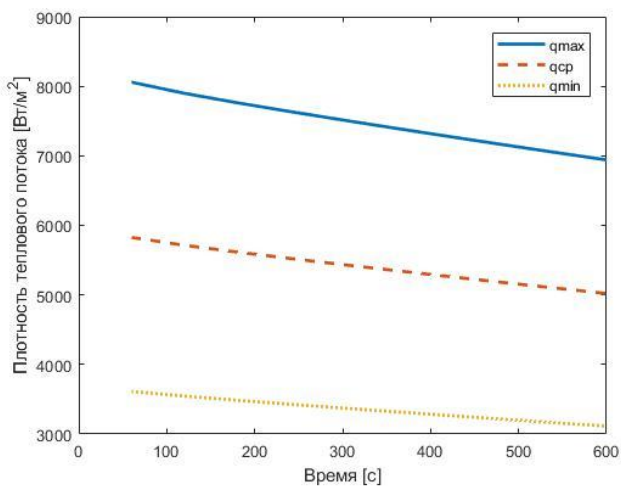
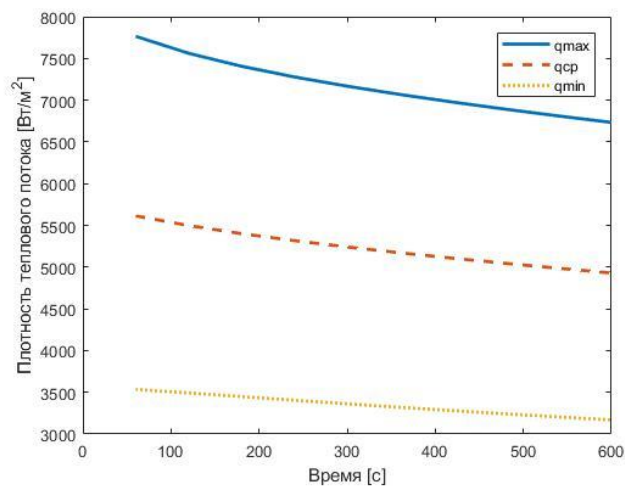


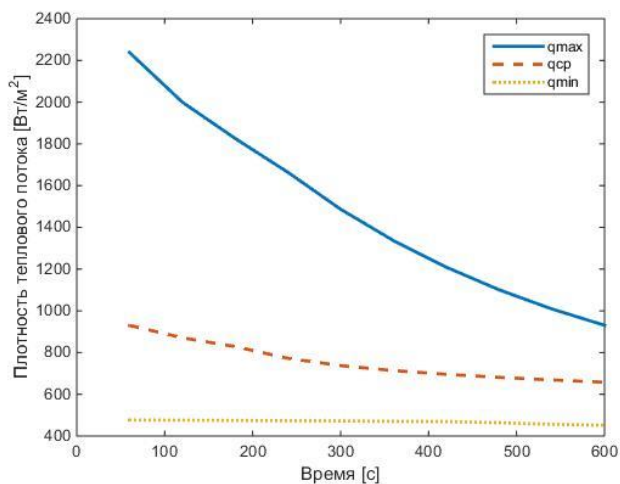
Рис. 2. Зависимость теплового потока от времени (теплопередача с материалом твердого тела: а) АМгб; б) сталь 45; в) стеклопластик ВФТ-С).



а)

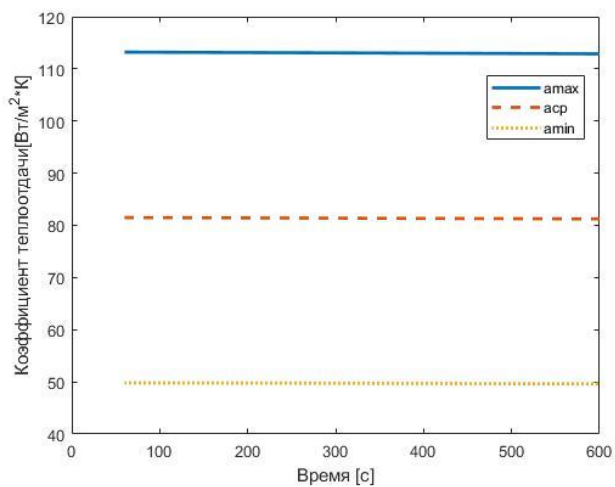


б)

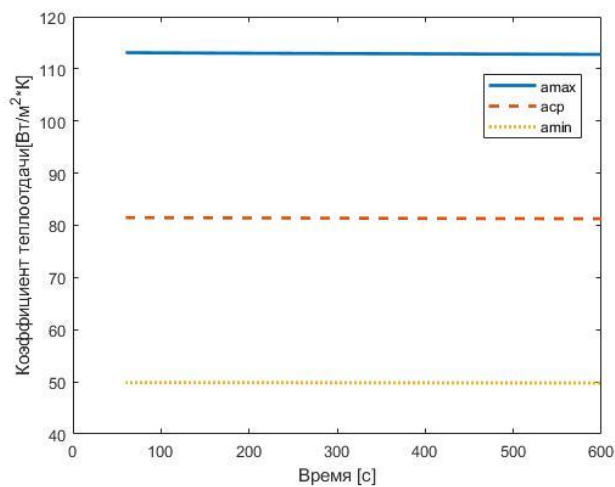


в)

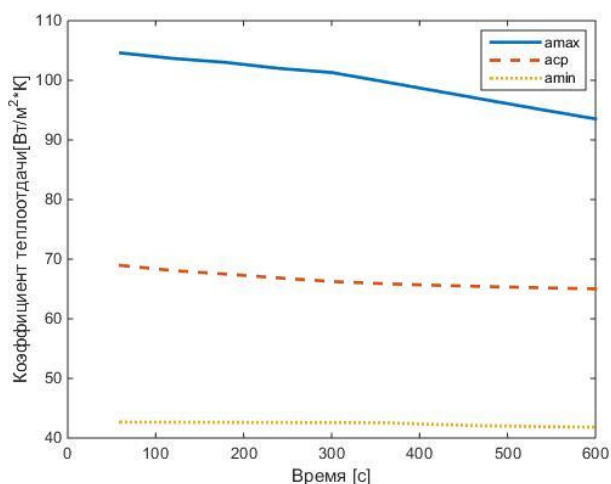
Рис. 3. Зависимость плотности теплового потока от времени (теплопередача с материалом твердого тела: а) АМГб; б) сталь 45; в) стеклопластик ВФТ-С).



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени (теплопередача с материалом твердого тела: а) АМГб; б) сталь 45; в) стеклопластик ВФТ-С).

Для оценки влияния внешних факторов (отрицательная температура внешней среды и её воздушное возмущение) на условия транспортировки осесимметричного тела рассмотрим задачу влияния температуры без возмущения воздушной среды. То есть был произведен нестационарный расчет теплопередачи [15,16] с влиянием статической температуры внешней среды. За объект исследования аналогично принят цилиндр с заданными параметрами, указанными в таблицах 1, 2.

Данная задача решалась методом конечных разностей [17,18]. Следует отметить, что на границах $r = 0$ и $r = r_1$ (рис. б) рассматриваются граничные условия первого рода [19], где постоянная температура внешней среды T_c . Поскольку объём твердого тела, выделяемый тепло существенно мал по отношению к объёму окружающей среды имеющая отрицательную температуру. Внутренних источников

тепла тело не имеет. Поэтому применение на границе $r = r_1$ граничного условия III рода [19] является неуместным в данной задаче.

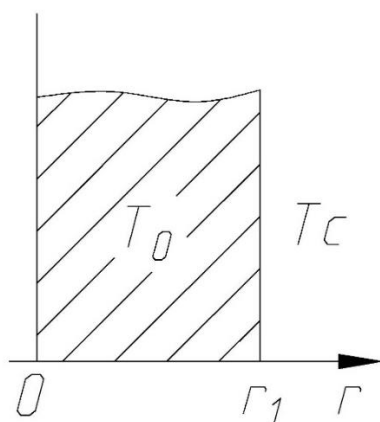


Рис. 6. Геометрия задачи

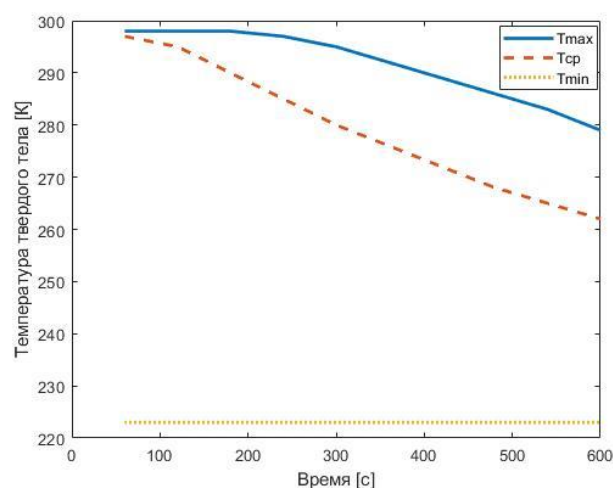
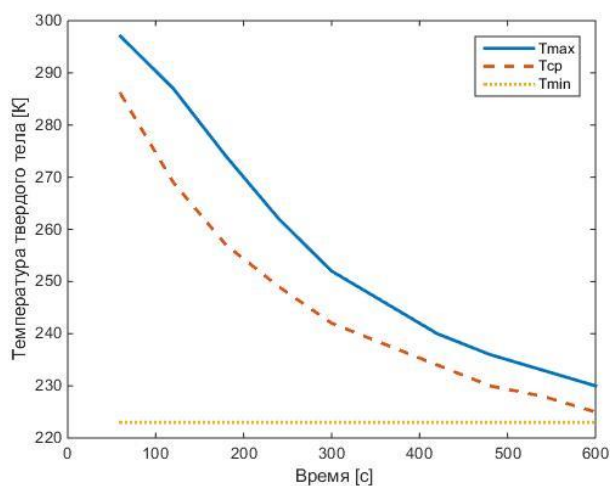
Ниже приведено уравнение теплопередачи твердого тела в цилиндрической системе координат [20]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5)$$

Начальные и граничные условия имеют вид [16]:

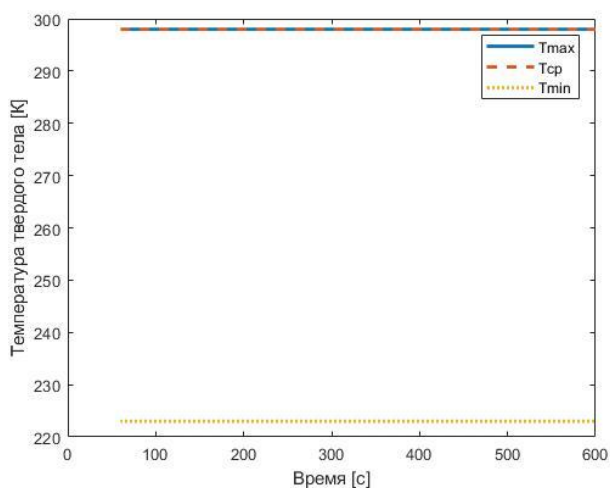
$$\begin{aligned} t = 0: T &= T_0, \quad 0 \leq r \leq r_1, \\ r = 0: T &= T_0, \quad t > 0, \\ r = r_1: T &= T_c, \quad t > 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 7.



а)

б)



в)

Рис. 7. Зависимость температуры осесимметричного тела от времени

(теплопередача с материалом твердого тела: а) АМг6; б) сталь 45; в) стеклопластик ВФТ-С).

Из полученных результатов исследования температурного режима обтекания твердого тела в полете (рис.1-4) очевидно, что лучшие показатели теплоизоляции имеет стеклопластик. Минимальная температура, равная 229 К (температура на поверхности тела) стеклопластика (рис.1 г) объясняется тем, что коэффициент

теплопроводности имеет маленькое значение. Следовательно, теплопередача на внешнюю среду мало относительно других материалов (Рис. 2, 3, 4, 8).

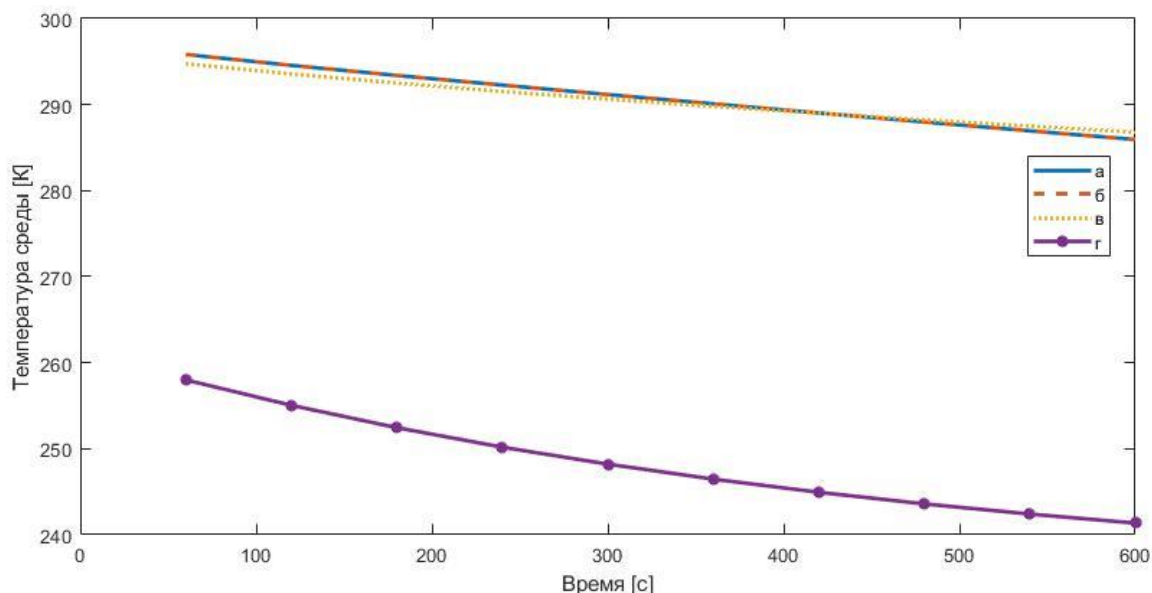


Рис. 8. Зависимость температуры среды в области обтекания исследуемого объекта от времени (теплопередача с материалом твердого тела: а) АМгб; б) сталь 45; в) стеклопластик ВФТ-С).

Также, процесс наибольшей интенсивности теплообмена протекает в местах малого сопротивления встречного потока воздуха, действующего на объект. Поэтому результаты с заданными материалами, имеющие большие показатели теплопроводности (материалы: АМгб, Д16, сталь 45) имеют относительно неплохие результаты устойчивости температуры тела относительно времени (Рис. 1-4).

Важно отметить, что интенсивность теплообмена проходит со стороны температуры твердого тела, а не внешней среды, другими словами, влияние плотности теплового потока зависит от температуры твердого тела (положительной

температуры). Плотность теплового потока не связана с воздействием внешней среды на твердое тело, она связана с воздействием твердого тела на внешнюю среду.

При изменении температуры твёрдого тела плотность теплового потока уменьшается относительно постоянных параметров: давления, плотности и скорости потока среды, протекающей в области цилиндра. На основе вышеперечисленных результатов можно предположить, что с увеличением скорости воздушного потока, действующего на твердое тело (без учета влияния сопротивления воздушного потока на носовую часть), его время остывания будет меньше.

Из полученных результатов, представленных на рисунке 7 нестационарной теплопередачи твердого тела при статической температуре внешней среды видно, что воздействие возмущений воздушных потоков велико. А именно, время остывания цилиндра без возмущения воздушной среды проходит быстрее, даже, если рассматривать процесс с коэффициентом теплоотдачи твердого тела.

Исследования температурных режимов при обтекании осесимметричных тел, транспортируемых на внешней подвеске ЛА, показывают, что, большую роль сохранения ресурса теплоты осесимметричного тела играет не только введение высоких показателей теплоизоляции его материала, но и влияние воздушного возмущения, создаваемое в процессе транспортировки на внешней подвеске ЛА.

Библиографический список

1. Горячев О.В., Минчук С.В. Математическая модель тепловых процессов в моментных двигателях // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35541>

2. Мьинт З.М., Хлопков А.Ю. Исследование аэротермодинамики перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40250>
3. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З. Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
4. Назырова Р.Р. Вариационное исчисление как фундамент исследования течения среды при учете уравнения состояния реальных газов // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76946>
5. Стрижевский М.Н. Автоматизированная система моделирования кинетического нагрева изделий авиационного вооружения со скоростями полета до 6М // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=14536&PAGEN_2=2
6. Егоров И.А. Определение температурного поля многослойной обшивки летательного аппарата с учетом зависимости теплофизических характеристик от температуры // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67804>
7. Колесник С.А., Формалев В.Ф., Селин И.А. Математическая модель и программный комплекс сопряженного теплообмена между вязкими газодинамическими течениями и охлаждаемыми лопатками газовых турбин // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=56941>
8. Ефимов В.В. Теоретические методы обеспечения безопасности летной эксплуатации вертолётов при транспортировке грузов на внешней подвеске. Дисс. д.т.н. – М.: МГТУ ГА, 2014. – 330 с.

9. Крючков А.А. Грузовые перевозки на воздушном транспорте СССР (Организация, технология, экономика). - М.: Транспорт, 1983, 232 с.
10. Климат СССР. Районирование и статические параметры климатических факторов для технических целей. ГОСТ 16350-80. – М.: Государственный стандарт СССР, 1981. – 221 с.
11. Михеев В.А. Климатология и метеорология. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2009. – 114 с.
12. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1981. – 175 с.
13. Кутепов А.М., Полянин А.Д., Запрянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.
14. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: Справочник. М.: Физматгиз, 1959. - 356 с.
15. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы: Справочник. - Киев: Коминтех, 2005. – 365 с.
16. Киселев Б.А. Стеклопластики. - М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961. – 240 с.
17. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 785 с.
18. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1976. – 144 с.
19. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

20. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2007. – 172 с.