

УДК 629.76.015.3: 533.6.011.6

© Юрченко И.И., Кудинов А.С., Каракотин И.Н.  
Yurchenko I., Kudinov A., Karakotin I.**РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА  
В НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ОТСЕКАХ ЛА В ПРОЦЕССЕ ВЫВЕДЕНИЯ****CALCULATION AND EXPERIMENTAL ESTIMATION OF AIR TEMPERATURE IN  
UNPRESSURIZED COMPARTMENTS OF LAUNCH VEHICLE DURING THE FLIGHT**

**Аннотация.** Рассмотрена проблема расчета параметров теплообмена в негерметичных отсеках ЛА в условиях естественной конвекции при перегрузках, реализующихся в полете. Данная задача является существенной для жестких требований к максимальным и минимальным температурам различных приборов, агрегатов и полезной нагрузки в составе ЛА. Описан процесс истечения воздуха из отсека в окружающую среду с учетом теплообмена внутри отсека. Разработана математическая модель, описывающая процесс дренажа негерметичных отсеков в виде программного обеспечения «Outflow». Расчет процесса дренажа негерметичных отсеков в условиях теплообмена с поверхностями оборудования, полезного груза и различных конструктивных элементов (адаптера, топливных баков разгонного блока и пр.), представленный в данной работе, получил подтверждение результатами летных измерений температуры воздуха в отсеках и на конструктивных элементах.

**Annotation.** Heat transfer calculation in unpressurized compartments in has been considered taking into account free convection due to accelerating forces during flight and heat exchange with surfaces of elements of constructions. This issue is very significant for having met severe requirements to the temperature conditions set by equipments and apparatuses placed in such compartments. Air outflow process is specified and corresponding mathematical model is developed and is implemented as "OUTFLOW" computer program. Calculation results of outflow process obtained were confirmed during flight tests when temperature was measured by gages.

**Ключевые слова.** Давление, температура среды, показатель адиабаты, естественная конвекция, термомонопара.

**Key words.** Pressure, temperature, specific heat ratio, natural convection, thermocouple.

При полете ЛА в плотных слоях атмосферы для обеспечения требуемых температурных режимов размещенных внутри негерметичных отсеков приборов и агрегатов, включая полезную нагрузку, расположенную под головным обтекателем, необходимо проводить расчеты температуры среды и коэффициентов теплообмена. В течение первых 100 секунд полета окружающее атмосферное давление, а вместе с ним и внутреннее давление внутри дренируемых отсеков уменьшается на порядки, что приводит к существенному падению температуры воздуха. Низкая температура воздуха оказывает благоприятное влияние на температуру внутренней поверх-

ности конструкции отсеков, излучение от которой должно быть минимальным. В то же время понижение температуры воздуха может привести к выпадению влаги из воздуха на приборы и оборудование полезной нагрузки. К тому же жесткие требования к температурам существования аппаратур системы управления и пр. делают необходимым расчет не только возможного перегрева, но и переохлаждения оборудования.

Наибольший интерес представляет процесс дренажа негерметичного отсека ЛА в течение первых 120 секунд полета, пока давление не достигнет 0,01-0,03 атм, и существенен для температурных требований к аппарату-

Юрченко Ирина Ивановна – кандидат технических наук, доцент, начальник сектора, ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева»;

Кудинов Александр Сергеевич – ведущий инженер, ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», тел. (499) 749-54-93;

Каракотин Иван Николаевич – начальник отдела, ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева».

Yurchenko Irina – Ph.D., associate professor, chief of sector, FSUE «Khrunichev state research and production space center»;

Kudinov Alexander – leading engineer, FSUE «Khrunichev state research and production space center», tel. (499) 749-54-93;

Karakotin Ivan – head of department, FSUE «Khrunichev state research and production space center».

ре теплообмен между конструкцией и воздухом внутри. В процессе подъема в атмосфере окружающее давление уменьшается и описывается известной функциональной зависимостью от  $t$  – времени от старта  $P_\infty = P_\infty(t)$ . Для того чтобы отсек не был разорван внутренним давлением, существуют дренажные отверстия (или клапаны сброса давления) для истечения избытка воздуха в окружающее пространство. Различие между давлением внутри отсека  $P=P(t)$  и давлением на выходе из дренажных окон сначала очень мало, в дальнейшем при ускорении ЛА до трансзвуковой скорости и выше достигает нескольких раз. Для определения функции давления в отсеке  $P=P(t)$  в зависимости от времени полета  $t$  проводится расчет давления с использованием расходных характеристик дренажных окон, полученных экспериментально. Результаты этого расчета являются необходимыми исходными данными в дальнейших вычислениях температуры среды и тепловых потоков.

Рассмотрим детально процесс, осуществляющийся при переходе воздуха из состояния  $i$  в момент времени  $t_i$  в состояние  $i+1$  в момент времени  $t_{i+1}$ . В момент времени  $t_i$  – масса  $m_i$ ,  $P_i$  – давление в отсеке,  $T_i$  – температура воздуха в отсеке,  $V_i$  – объем, занимаемый массой воздуха  $m_i$ . В момент времени  $t_{i+1}$  параметры воздуха:  $m_p, P_{i+1}, T_{i+1}, V_{i+1}$ .

Предположим, что в момент времени  $t_{i+1}$  давление внутри отсека скачкообразно изменилось от значения  $P_i$  до значения  $P_{i+1}$ . При этом происходит изменение объема массы  $m_i$  от значения  $V_i$  до значения  $V_{i+1}$ . В процессе расширения (истечения воздуха из отсека) объем увеличился, давление воздуха в отсеке уменьшилось, уменьшилась и температура. При переходе воздуха внутри отсека из состояния  $i$  в состояние  $i+1$  газ совершает работу против внешнего давления  $P_{i+1}$

$$\Delta A_i = P_{i+1}(V_{i+1} - V_i). \quad (1)$$

Чтобы связать все указанные параметры между собой, необходимо воспользоваться первым законом термодинамики в конечных разностях

$$\Delta Q_i = U_{i+1} - U_i + \Delta A_i. \quad (2)$$

В данном случае под  $\Delta Q_i$  следует понимать количество тепла, полученное одним молем воздуха из объема  $V_i$  в процессе теплообмена со стенками отсека или в случае головного обтекателя, панелями системы обеспечения температурного режима (СОТР) и элементами конструкции полезной нагрузки в течение времени  $\Delta t_i$ . Воспользуемся уравнением состояния Клапейрона  $P_i V_i = RT_i$  и соотношением Роберта-Майера  $C_p - C_v = R$

$$C_v(T_{i+1} - T_i) = P_{i+1}(V_i - V_{i+1}) + \Delta Q_i; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_{i+1}(1 + ((\gamma - 1)/\gamma) \cdot (P_{i+1} - P_i)/P_{i+1}) = \\ = T_i(1 + ((\gamma - 1)/\gamma) \cdot (P_{i+1} - P_i)/P_i) + \Delta Q_i / C_p; \end{aligned} \quad (4)$$

$$T_{i+1} = T_i(1 + ((\gamma - 1)/\gamma) \cdot (P_{i+1} - P_i)/P_i) + \Delta Q_i / C_p. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) необходимо рассчитать количество тепла  $\Delta Q_i$ , получаемого одним молем воздуха в процессе теплообмена со всеми контактирующими с воздухом элементами конструкции. Пусть  $\Delta q_i$  суммарное количество тепла, полученное массой воздуха  $m_i$  в течение времени  $\Delta t_i$ .

$$\Delta q_i = \sum \alpha_j (T_j - T_i) S_j, \quad (6)$$

где суммирование по  $j$  означает суммирование теплообмена со всеми рассмотренными элементами конструкции. Например, в случае головного обтекателя – с внутренними поверхностями и дном топливного бака, панелями системы терморегулирования, элементами тепловой модели полезной нагрузки, имеющими известную температуру  $T_j$  в зависимости от времени и площадь  $S_j$ . Здесь также  $\alpha_j$  коэффициенты теплообмена в условиях естественной конвекции при перегрузке  $g$  по траектории:  $\alpha_j = \alpha_j(m_i, T_i, T_j, g_i, L_j, X_j)$ , где  $L_j, X_j$  – характерные размеры элемента конструкции, которые имеют значение для теплообмена в процессе естественной конвекции. Используя массовую теплоемкость  $c$ , можно написать

$$\Delta Q_i / C_p = \Delta q_i / (c \cdot m_i). \quad (7)$$

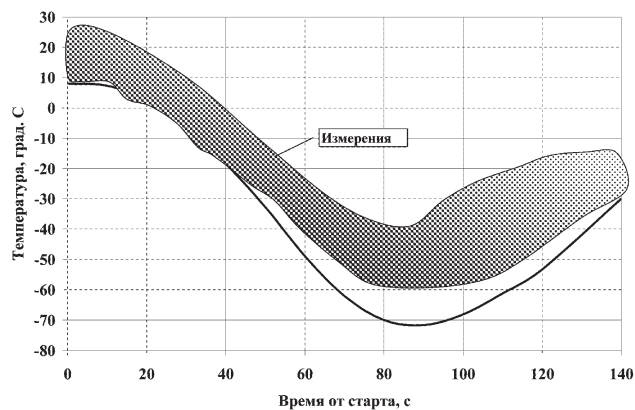
Масса может быть определена из уравнения состояния для конечной массы

$$P_i V_i = RT_i m_i / \mu, \quad (8)$$

где  $\mu$  – молекулярная масса воздуха. Заметим также, что  $V_i = V_0$  – суммарный дренируемый объем.

В результате численного решения системы уравнений (4)–(8) можно рассчитать изменение температуры воздуха внутри дренируемого отсека и значения коэффициентов теплообмена, которые необходимы для расчета температуры внутренней теплоизоляции отсека и температурных режимов оборудования.

На рисунке представлены результаты расчета и измерений температуры среды. Результаты расчетов длительность время не были подтверждены экспериментом.



Сравнение минимальной расчетной температуры среды с измерениями в полете

Согласно расчету, температура воздуха под ГО опускается до  $-70^{\circ}\text{C}$  и далее поднимается до температуры, близкой к температуре внутренних элементов. Измерения не только не отслеживали тенденций в поведении температуры, но и уровень минимальных температур не опускался ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Это было связано с тем, что применяемый для измерения температуры среды термометр сопротивления в условиях разрежения и сильного теплового излучения от полезной нагрузки и стенок отсека, не мог контролировать температуру воздуха. После замены датчика на термопарный с диаметром электродов 0,2 мм удалось снизить влияние излучения на показания датчика. Корректность программы доказана на основе сопоставления расчётных зависимостей температуры воздуха от времени с измерениями температуры среды и температуры панелей жидкостной системы обеспечения температурных режимов в полёте. Расшифровка показаний датчика проведена с использованием программы нестационарной теплопроводности с учетом конструктивных особенностей датчика в условиях пониженного давления и излучения стенок головного обтекателя космического аппарата. Минимальная температура, зарегистрированная датчиком, отличается от расчетной примерно на 20 градусов, что, как показали расчеты с применением численной модели датчика, определяется наличием тепловых притоков к спая термопары от кронштейна крепления по электродам в условиях уменьшения теплообмена спая термопары с сильно разреженным воздухом. Корректность программы на первом этапе ее отладки была доказана на основе сопоставления расчётных зависимостей температуры воздуха от времени с измерениями температуры среды и температуры панелей жидкостной системы обеспечения температурных режимов в полёте.

Конкретное практическое применение программного обеспечения «Outflow» связано с задачами по адаптации зарубежных космических аппаратов (КА) к средствам выведения. Космический аппарат защищен голов-

ным обтекателем на протяжении стартовой подготовки и в полете до выхода в верхнюю атмосферу. Обеспечение температурных требований «Документа контроля интерфейса» (ДКИ) и «Тепловой модели космического аппарата» является необходимым условием запуска как на этапе стартовых операций, так и в полете. Это одна из основных задач, решаемых разработчиком ракеты, предоставляющим услуги по запуску. Стартовые операции, в частности, продувка воздухом с определённой температурой и прокачка панелей жидкостной системы терморегуляции (ЖСОТР), поддержание панелей ЖСОТР в необходимом диапазоне температур в зависимости от времени года являются первым шагом к поддержанию требуемого температурного диапазона. Но после отключения воздушной системы терморегуляции (ВСОТР) за 1,5 часа до старта и жидкостной системы терморегуляции (ЖСОТР) за 10 минут до старта, процессы теплообмена, происходящие под ГО, не поддаются управлению. Процессы теплообмена, происходящие под ГО в полете, были описаны математически в рамках «Outflow» с целью расчёта всех необходимых для обеспечения температурных режимов параметров:

- температуры внутренних поверхностей ГО на конических и цилиндрической проставках, обращенных к КА, требования к которым приведены в ДКИ;
- температуры элементов тепловой модели КА, требования к которым приведены в «Тепловой модели КА»;
- коэффициентов теплообмена ко всем конструктивным элементам под ГО.

В некоторых случаях в «Тепловой модели КА» перечисляются отдельно возможные воздушные полости в КА в виде элементов тепловой модели. При помощи программного обеспечения «Outflow» проводятся расчёты температуры этих элементов, то есть температуры воздуха в течение всего полета до сброса головного обтекателя, а также коэффициентов теплообмена от этих воздушных полостей к соседним элементам тепловой модели.

#### Литература

1. Сивухин Д.В. *Общий курс физики, Том II, Термодинамика и молекулярная физика*, // - М: Изд. «Наука», 1975.- 551 с.
2. Якоб М. *Вопросы теплопередачи* // М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 518 с.
3. Уонг Х. *Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник*, // - М: Атомиздат.-1979.-211 с.

Материал поступил в редакцию 20. 02. 2011 г.