

УДК 531.3

С. А. ДАВЫДОВ, Н. В. АБРАМЕНКО

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ ВЕРХНИХ СТУПЕНЕЙ НА ЗАКИПАНИЕ КРИОГЕННОГО ТОПЛИВА ПРИ ЗАПУСКЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В статье рассмотрена задача оптимизации стартовой массы разгонных блоков, работающих на криогенном топливе, за счет минимизации давления газовой подушки наддува баков путем анализа конструктивных особенностей трубопроводов подачи топлива. Для решения поставленной задачи была разработана обобщенная математическая модель влияния конструктивных особенностей трубопроводов верхних ступеней на температуру кипения криогенного топлива в этом трубопроводе. Представленная математическая модель может быть использована при проектировании перспективных разгонных блоков, работающих на энергетически выгодных компонентах топлива.

Ключевые слова: криогенное топливо, разгонный блок, трубопровод.

Введение

Большинство известных ракет-носителей (РН) одноразового использования выполнено по трехступенчатой схеме: две маршевых ступени, которые выводят полезный груз на опорную орбиту, и разгонный блок (или верхняя ступень), который предназначен для перемещения полезного груза с опорной орбиты на целевую орбиту или направления их на отлетные и межпланетные траектории. Для выполнения этого разгонный блок (РБ) должен иметь возможность выполнять один или несколько маневров, связанных с изменением скорости полета, для чего в каждом случае предполагается включение маршевого двигателя. Между этими включениями следуют продолжительные (до нескольких часов) участки пассивного полета по переходным орбитам или траекториям. Таким образом, любой РБ должен иметь маршевый двигатель многократного включения, а также дополнительную реактивную систему или двигательную установку, обеспечивающую ориентацию и стабилизацию движения РБ с космического аппарата и создание условий для запуска маршевого двигателя. При этом масса РБ должна быть минимальной [1].

Одним из важных вопросов, решаемых при выборе принципиальной схемы РБ является выбор двигателя и компонентов топлива. Маршевый двигатель РБ может быть как жидкостным, так и твердотопливным. Жидкостные реактивные двигатели (ЖРД) имеют ряд преимуществ перед твердотопливными ракетными двигателями (ТТРД), особенно по точности достижения расчетного значения им-

пульса, возможности многократного включения и выключения двигателя. С другой стороны они более сложные, более дорогие, требуют более тщательной проработки вопросов обеспечения теплового режима топливных емкостей, особенно при применении низкокипящих и криогенных компонентов топлива [1].

Постановка задачи исследования

Жидкие топлива делят на одно-, двух- и трехкомпонентные. Современные двигатели чаще используют двухкомпонентные топлива, в составе которых есть окислитель и горючее. Такое топливо сравнительно безопасное в эксплуатации, имеет широкий спектр отработанных компонентов. К трехкомпонентным принадлежат топлива, содержащие окислитель, горючее и компонент с малой молекулярной массой, как правило, тоже топливо, например, жидкий водород, метан и т.д. Применение третьего компонента увеличивает удельный импульс двигателя, но усложняет его конструкцию и ухудшает массовые характеристики конструкции. Однокомпонентные топлива обеспечивают небольшой удельный импульс, их преимущества заключаются в простоте конструкции двигательной установки, повышенной безопасности носителя. Двухкомпонентные топлива классифицируют по окислителю, так как именно он зачастую определяет особенности топливной пары. По этому признаку различают кислородные, азотно-кислотные, азоттетроксидные, пероксидводородные и фторные топлива. По интервалам температур, в пределах которого

компоненты находятся в жидком состоянии, топлива делят на высококипящие и низкокипящие. Высококипящими называют те топлива, которые в условиях эксплуатации имеют температуру кипения превышающую 298 К (25°C), их хранят без расходов на выпаривание. Низкокипящие компоненты топлива в условиях стандартного давления имеют температуру кипения меньшую 298 К. Среди низкокипящих топлив выделяют группу криогенных топлив, температура кипения которых меньше 120 К. Такие компоненты невозможно хранить в жидком состоянии без применения специальных мер. К этой группе топлив относятся имеющие в своем составе жидкий кислород, водород, фтор и метан. Последние 40 лет чаще применяют топливо кислород + керосин (рис. 1) [1, 2].

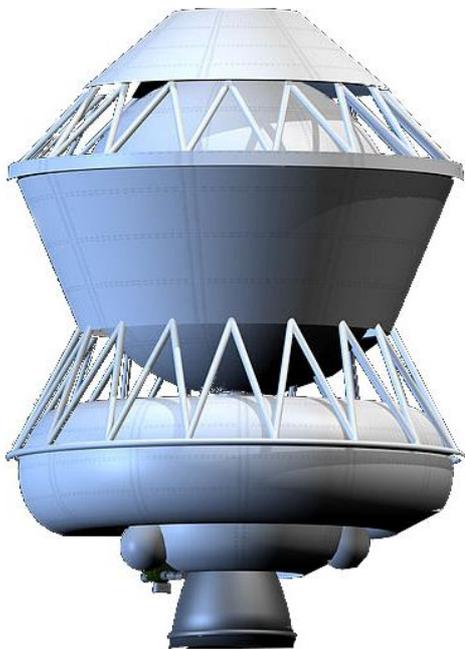


Рис. 1. Разгонный блок ДМ на криогенных компонентах топлива кислород + керосин

Это топливо обеспечивает относительно высокий удельный импульс тяги, нетоксичное, его хорошо освоено. Более эффективно топливо кислород + водород. Оно обеспечивает самый высокий удельный импульс. В то же время водород взрывоопасен, хранить и транспортировать его можно только в жидком состоянии при очень низких температурах, близких к абсолютному нулю (минус 273°C). И это представляет очень серьезную проблему [2].

Также перспективными парами являются кислород + метан и применение разгонного блока с двигательной установкой на этих компонентах (рис. 2), обеспечивает повышение энергетической

эффективности носителя (РН «Союз») в ~1,5 раза по сравнению со штатным РБ «Фрегат-СБ».

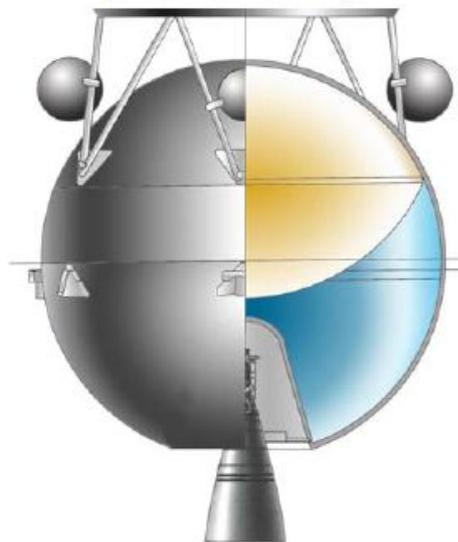


Рис. 2. Разгонный блок на компонентах топлива кислород + метан для РН «Союз»

В каждом случае, применение криогенных компонентов топлива на борту РБ предусматривает использование подушки наддува высокого давления в баке от 4 до 8 атм, с целью повышения температуры кипения этого топлива. При проектировании топливного отсека по критерию оптимизации минимальной массы необходимо снижать внутреннее давление в отсеке до минимального для уменьшения толщины стенки бака, а с другой стороны, снижая давление, снижается и температура кипения топлива. Кроме того, при решении данной задачи в сторону минимизации внутрибакового давления, возникает проблема подачи топлива к двигательной установке (ДУ). Т.е. при прохождении криогенного компонента топлива по трактам пневмогидросистемы питания, которая содержит различные конструктивные элементы, такие как: заборное устройство, система фильтрации топлива, сужения, расширения, изгибы трубопроводов, элементы автоматики (пускоотсечной клапан) и т.д. (рис. 3), ведет к местным сопротивлениям потоку и понижению давления, что, в свою очередь, может привести к закипанию топлива при более низком давлении [1].

Общая длина трубопроводов на верхних ступенях может достигать 2 – 5 метров, что тоже ведет к потере давления на трение по трубопроводу. Пускоотсечные клапаны также являются своего рода расходными шайбами и создают дополнительное местное сопротивление потока. Таким образом, при расчете потерь давления потока криогенного топлива по трубопроводу, и зная величину и место приложе-

ния тепловых потоков от агрегатов и систем РБ, можно определить участок, на котором произойдет закипание этого топлива.

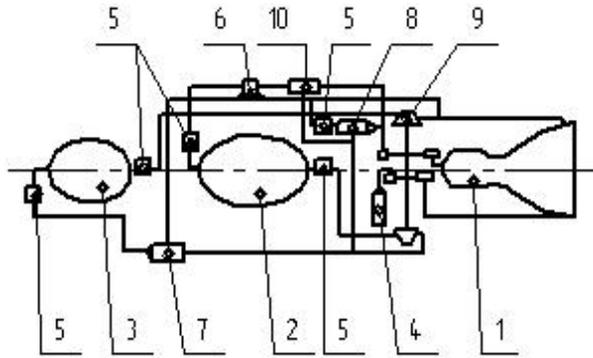


Рис. 3. Схема насосной системы подачи топлива: 1 – камера ДУ; 2 – бак окислителя; 3 – бак горючего; 4 – пиростартер; 5 – пускоотсечной клапан; 6 – газовый редуктор давления; 7 – жидкостной газогенератор; 8 – жидкостной газогенератор; 9 – турбонасосный агрегат; 10 – смеситель

Численный метод моделирования движения потока жидкости по сливной магистрали

В общем случае расчетная схема потерь давления в трубопроводе представлена на рис. 4.

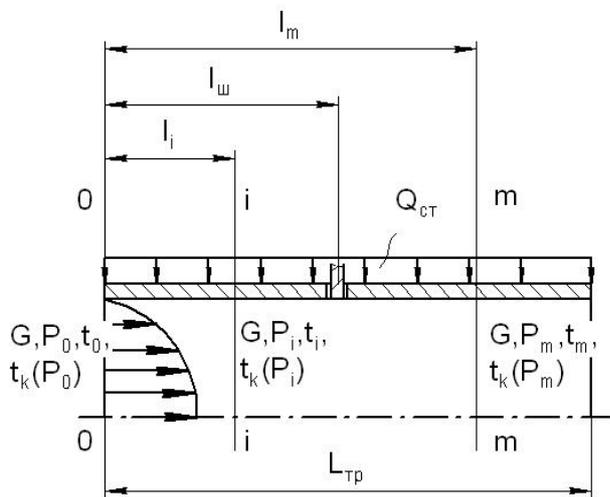


Рис. 4. Расчетная схема потерь давления в трубопроводе

На каждом i -ом участке трубопровода давление будет падать, а температура кипения топлива будет расти. Для определения участка трубопровода, на котором давление будет критическим, вначале запишем уравнение Бернулли [3]:

$$P_{i-1} + \frac{\rho \cdot V_{i-1}^2}{2} = P_i + \frac{\rho \cdot V_i^2}{2} + \Delta P_{тр}, \quad (1)$$

где P_i и P_{i-1} – давление на i -ом и $(i-1)$ -ом участке трубопровода соответственно, Па;
 ρ – плотность топлива, кг/м³;

V_{i-1} и V_i – скорость потока на i -ом и $(i-1)$ -ом участке трубопровода соответственно, м/с;

$\Delta P_{тр}$ – потери давления по трубопроводу, в зависимости от его конструктивного исполнения, Па.

Если предположить, что на всех участках трубопровода поперечное сечение не меняется, то скорость потока постоянна и давление на i -ом участке будет равно:

$$P_i = P_{i-1} - \Delta P_{тр}, \quad (2)$$

$$\Delta P_{тр} = \lambda_{гидр} \cdot \frac{\Delta l}{D} \cdot \frac{\rho V_i^2}{2} + \xi \cdot \frac{\rho \cdot V_i^2}{2}, \quad (3)$$

где $\Delta l = l_i - l_{i-1}$ – шаг по трубопроводу, м;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления шайбы, $\xi = 0.12$;

D – диаметр трубопровода, м;

$\lambda_{гидр}$ – коэффициент гидравлического сопротивления на трение.

Далее необходимо записать условие, при котором топливо может закипеть [2]. Для этого составим уравнение теплового баланса.

$$dQ_{ст} = dQ_{ж}, \quad (4)$$

где $dQ_{ст}$ – элементарный поток количества тепла, который воспринимает стенка трубопровода от агрегатов и приборов РБ, Дж;

$dQ_{ж}$ – элементарное количество тепла, получаемое топливом от стенки трубопровода, Дж.

$$dQ_{ж} = c dm (t_2 - t_1), \quad (5)$$

где c – удельная теплоёмкость топлива, Дж/кг·К;

dm – элементарная масса топлива, которая получила элементарное количество тепла от стенки трубопровода, кг;

t_1 – температура топлива на первом участке, К;

t_2 – температура топлива на втором участке или температура топлива после нагрева от стенки трубопровода, К.

Элементарный поток количества тепла, который воспринимает стенка трубопровода от агрегатов и приборов РБ, можно записать в следующем виде:

$$dQ_{\text{ст}} = \int_0^{\tau} \int_0^F \lambda \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial \delta} dF d\tau = \lambda \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial \delta} dF \cdot \tau, \quad (6)$$

где $dF = \pi \cdot D \Delta l$ – элементарная площадь трубопровода, через которую передается тепловой поток, м^2 ;

δ – толщина стенки трубопровода, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен трубопровод, $\text{Дж/м}\cdot\text{К}\cdot\text{с}$;

τ – время воздействия тепла на участок трубопровода, с;

$t_{\text{ст}}$ – температура стенки трубопровода, К.

Если представить шаг по трубопроводу как $\Delta l = V \cdot d\tau$, а элементарную массу топлива как $dm = G d\tau$ и подставив в уравнения (5) и (6) в (4), поделив при этом на $d\tau$, получим:

$$\lambda \cdot \frac{t_{\text{ст}} - t_2}{\delta} \cdot \pi \cdot D \cdot dl = c \cdot G \cdot (t_2 - t_1). \quad (7)$$

Из уравнения (7) можно вывести условие незакипания топлива на i -ом участке:

$$\lambda \cdot (t_{\text{ст}} - t_i) \cdot l_i \cdot \pi \cdot D \geq \delta \cdot c \cdot G \cdot (t_i - t_k(P_i)). \quad (8)$$

Анализ результатов численных расчетов

Данная задача решалась для РБ ДМ на криогенных компонентах топлива кислород + керосин [1].

В качестве исходных данных принимались следующие значения [1, 3, 4]:

- топливо – «жидкий кислород»;
- температура стенки трубопровода – $+20^\circ\text{C}$;
- начальная температура топлива – -200°C ;
- материал трубопровода – АМг6;
- расход топлива – 20 кг/с;
- давление в баке – 7 атм;
- диаметр трубопровода – 50, 100 и 200 мм;
- длина трубопровода – 1 м;
- трубопровод содержит клапан (расходную шайбу) на расстоянии от заборного устройства – 500 мм.

Результаты расчетов представлены на рис. 5, 6.

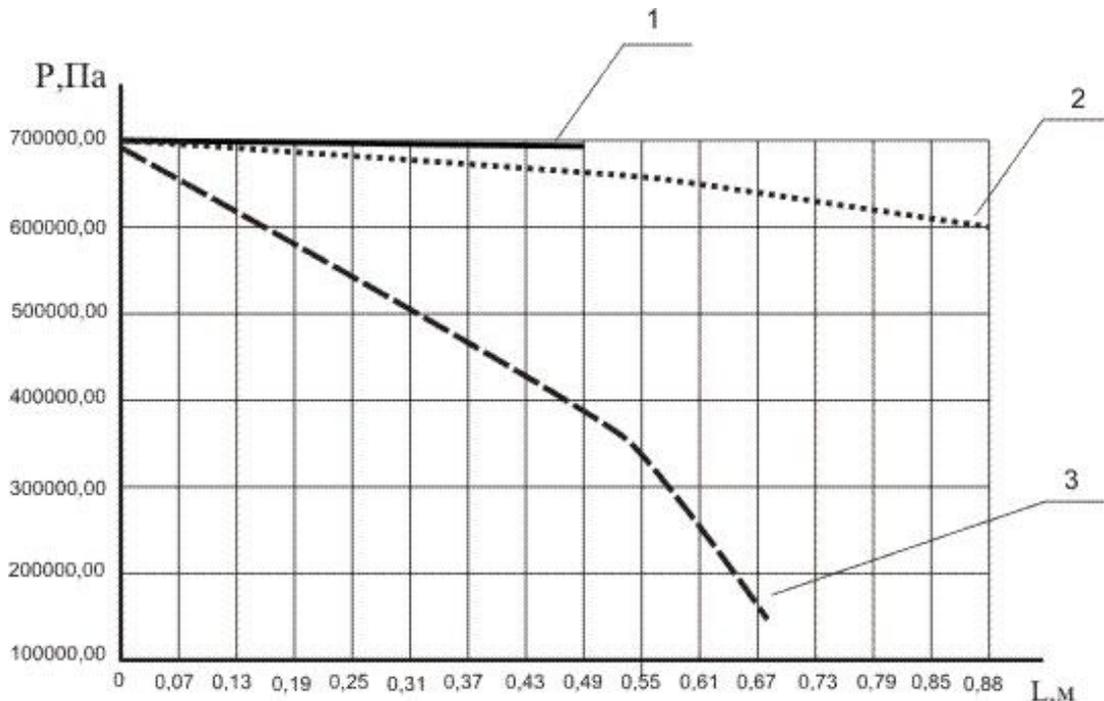


Рис. 5. Падение давления потока жидкого кислорода по трубопроводу длиной 1 метр различного диаметра: 1 – для диаметра трубопровода 0,2 м; 2 – для диаметра трубопровода 0,1 м; 3 – для диаметра трубопровода 0,05 м

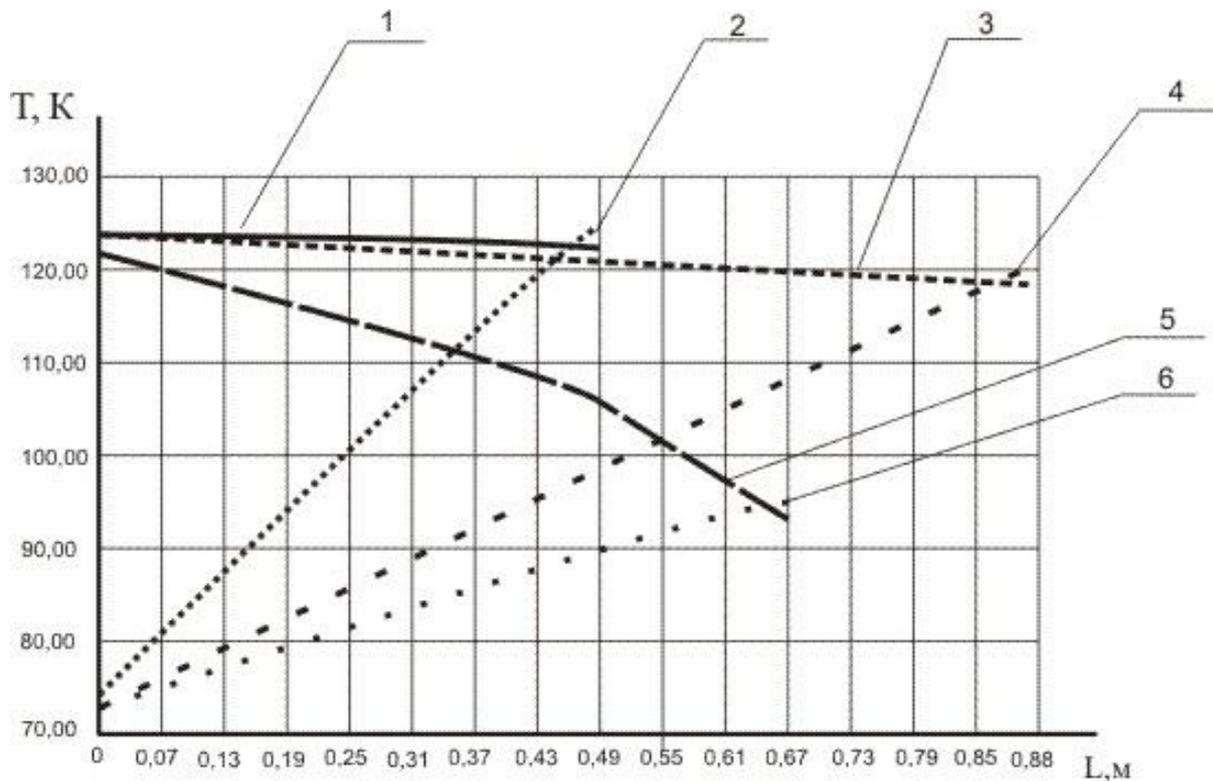


Рис. 6. Изменение температуры потока (T) жидкого кислорода и температуры кипения (T_k) по трубопроводу длиной 1 метр различного диаметра:

- 1 – график температуры кипения топлива для диаметра трубопровода 0,2 м;
- 2 – график температуры потока топлива для диаметра трубопровода 0,2 м;
- 3 – график температуры кипения топлива для диаметра трубопровода 0,1 м;
- 4 – график температуры потока топлива для диаметра трубопровода 0,1 м;
- 5 – график температуры кипения топлива для диаметра трубопровода 0,05 м;
- 6 – график температуры потока топлива для диаметра трубопровода 0,05 м;

По результатам расчетов видно, что при падении давления потока жидкого кислорода по трубопроводу, за счет местных сопротивлений и трения, повышается температура кипения, а также сам поток топлива также нагревается от стенки трубопровода. Когда две температуры (температура кипения кислорода T_k и температура потока T топлива) совпадают (рис. 6), то происходит местное кипение топлива, что может привести к нарушению работы двигателя РБ.

Места «переломов» на графиках (рис. 5 и 6) соответствуют местным сопротивлениям потока топлива (в данном случае это расходная шайба или клапан), что ведет к существенному повышению температуры кипения топлива.

Заключение

При выборе конструктивно-компоновочной схемы разгонных блоков, работающих на криогенных компонентах топлива, которые являются наиболее энергетически выгодными, необходимо учи-

тывать вероятность закипания компонентов топлива в гидротрактах с учетом падения давления по последнему. Повышение давления газовой подушки наддува в баке приводит к утолщению стенки бака и тем самым увеличивает массу всего РБ. Анализ конструктивных особенностей трубопроводов (вход в трубопровод – заборное устройство; гидроклапаны; перегибы и т.д.) дает возможность оптимизировать давление газовой подушки бака и тем самым снизить стартовую массу РБ.

Литература

1. Линник, А. К. Особливості проектно-конструкторської розробки верхніх ступенів [Текст] : навч. посібник / А. К. Линник. – Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровський національний ун-т, 2007. – 94 с.
2. Моисеев, Н. Н. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость [Текст] / Н. Н. Моисеев, В. В. Румянцев. – М.: Издательство «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1965. – 440 с.

3. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических аппаратов [Текст] : монография / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. М. Поляев, А. Л. Синцов, В. Ф. Сухоставец. – М. : УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997. – 328 с.

4. Tegar, J. R. Influence of pressure transients on the performance of capillary propellant acquisition systems [Text] / J. R. Tegar // AIAA paper. – № 597. – 1976. – 8 p.

Поступила в редакцию 27.11.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии производства летательных аппаратов», А. Ф. Санин, Днепровский национальный университет им. О. Гончара, Днепровск.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТРУБОПРОВІДІВ ВЕРХНІХ СТУПЕНІВ НА ЗАКИПАННЯ КРІОГЕННОГО ПАЛИВА ПРИ ЗАПУСКУ РУХОВОЇ УСТАНОВКИ

С. О. Давидов, Н. В. Абраменко

У статті розглянуто задачу оптимізації стартової маси дорозгінних блоків, що працюють на кріогенному паливі, за рахунок мінімізації тиску газової подушки наддуву баків шляхом аналізу конструктивних особливостей трубопроводів подачі палива. Для вирішення поставленого завдання було розроблено узагальнену математичну модель впливу конструктивних особливостей трубопроводів верхніх ступенів на температуру кипіння кріогенного палива цього трубопроводу. Представлена математична модель може бути використана при проектуванні перспективних дорозгінних блоків, що працюють на енергетично вигідних компонентах палива.

Ключові слова: кріогенне паливо, дорозгінний блок, трубопровід.

MATHEMATICAL MODEL OF PIPELINE FEATURES CONSTRUCTIVE UPPER STAGE ON BOILING OF CRYOGENIC FUEL WHEN PROPULSION SYSTEM STARTUP

S. O. Davidov, N. V. Abramenko

The article considers the problem of optimizing the initial mass boosters working on cryogenic fuel, by minimizing the pressure of the gas cushion tank pressurization by analyzing the structural features of the fuel line. To solve this problem would be developed generalized mathematical model of the impact of design features pipelines upper stages at the boiling point of the cryogenic fuel in this pipeline. Representation of the mathematical model can be used in the design of prospective boosters working on energetically favorable propellants.

Key words: cryogenic fuel, booster, pipeline.

Давыдов Сергей Александрович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и конструкции ЛА», Днепровский национальный университет им. О. Гончара, Днепровск, Украина

Абраменко Наталья Владимировна – инженер I категории лаборатории гидрогазодинамики, Днепровский национальный университет им. О. Гончара, Днепровск, Украина, natalia.dnu@gmail.com.