

УДК 629.764.064

М. Л. Волошин, С. А. Куда, Р. В. Михальчишин

КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Представлен комплекс расчетно-аналитических мероприятий, позволяющих повысить полезный объем баков и обеспечивающих дополнительный ресурс работы двигателей на примере ракеты-носителя, одной из разработок ГП "КБ "Южное". Изложено расчетно-экспериментальное подтверждение работоспособности пневмогидравлической системы подачи в измененных условиях, обеспечивающих существенное повышение энергомассовых характеристик РН.

Подано комплекс розрахунково-аналітичних заходів, які дозволяють підвищити об'єм баків і забезпечують додатковий ресурс роботи двигунів на прикладі ракети-носія, однієї з розробок ДП "КБ "Південне". Викладено розрахунково-експериментальне підтвердження працездатності пневмогидравлічної системи подачі у змінених умовах, що забезпечують істотне підвищення енергомасових характеристик РН.

The paper presents a complex of analytical calculation measures that allow increasing tanks useful volume and ensure engines' additional operational lifetime by the example of a launch vehicle, one of Yuzhnoye SDO developments. The calculated-experimental confirmation is set forth of the operability of pneumohydraulic supply system in the changed conditions that ensure considerable increase of launch vehicle power and mass characteristics.

Высокие энергетические характеристики – это основной показатель конструктивного совершенства ракет-носителей, а их достижение является главной целью при разработке космического ракетного комплекса. Важнейший фактор в процессе достижения высоких энергетических характеристик РН – эффективность использования топливной системы.

На примере одной из разработок ГП "КБ "Южное" представлен комплекс уже реализованных мероприятий:

- повышение дозы заправки компонентами топлива баков I и II ступеней РН;
- существенное увеличение (в ~6 раз) продолжительности заключительного автономного участка (после выключения маршевого двигателя) работы рулевого двигателя II ступени, что особенно важно для запуска

коммерческих космических аппаратов различного класса.

Изложено расчетно-экспериментальное подтверждение работоспособности пневмогидравлической системы подачи (ПГСП) в измененных условиях, обеспечивающих существенное повышение энергомассовых характеристик РН.

На рис. 1 представлен цикл обеспечения увеличенной дозы заправки, который отражает взаимосвязь начальных газовых объемов и температуры компонентов топлива (КТ).

Роль газовой подушки в баке очень важна, особенно в условиях обеспечения такого сложного запуска с большими перегрузками и уникальной системой предварительного наддува (СПН) впрыском ракетного топлива.

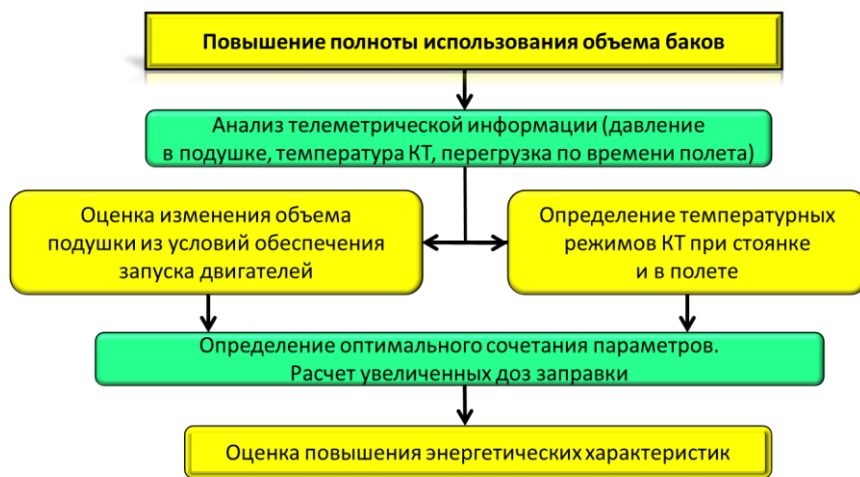


Рис. 1. Цикл мероприятий по увеличению дозы заправки

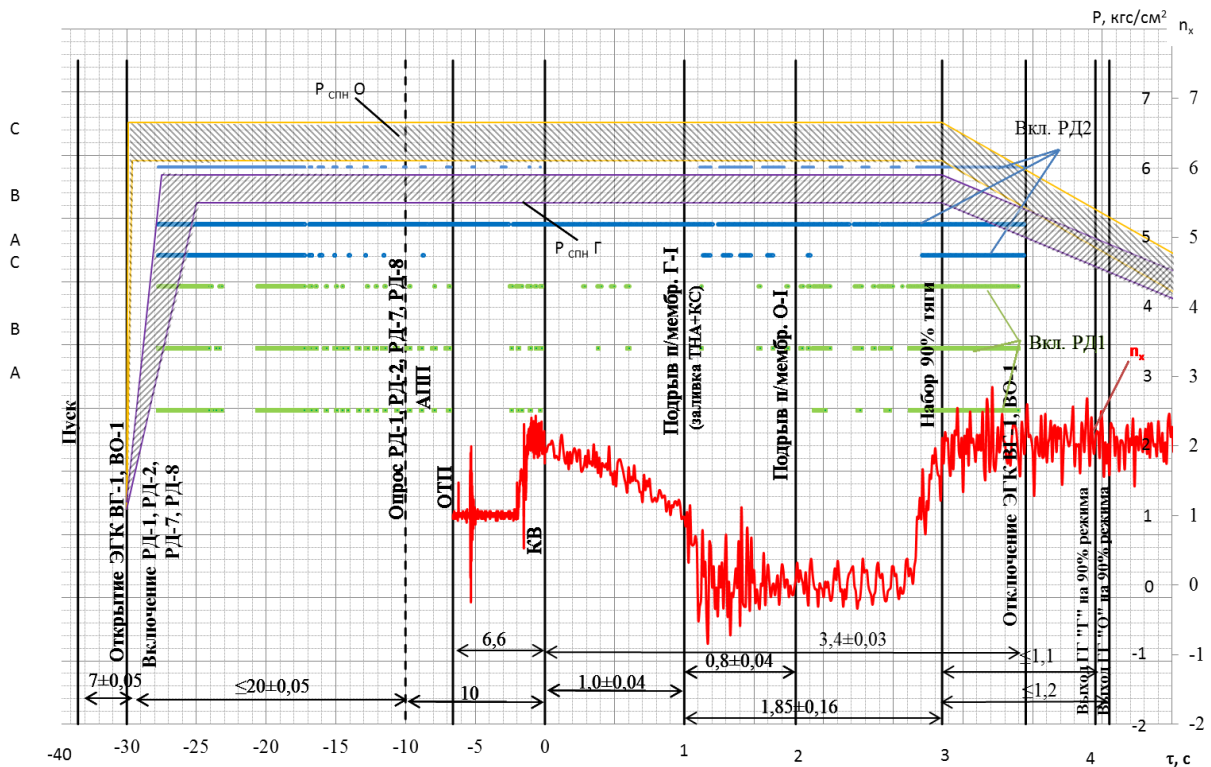


Рис. 2. Работа системы наддува при запуске РН:

$P_{спн}$ – давление в баке; ОТП – окончание точного приведения; ЭГК – электрогидроклапан; КВ – контакт высоты; АПП – аварийное прекращение пуска; ГГ – газогенератор; ТНА – турбонасосный агрегат; КС – камера сгорания

На рис. 2 показана динамика изменения перегрузки n_x , параметров СПН и основной системы наддува (давления в топливных баках) на участке запуска РН при ее выходе из транспортно-пускового контейнера. Как видно из рис. 2, системы надежно обеспечивают требуемые давления в баках при резком изменении осевой перегрузки: от практически невесомости (нулевое значение) до двух единиц.

Повышение доз заправки проводилось комплексно. С учетом значений статистических температур заправляемого топлива и фактических начальных объемов подушек в баках (таблица) было предусмотрено дозаправить дополнительное топливо в баки, назначив более высокий уровень заправки по соответствующему датчику. Для доработанной технологии заправки несколько понизили исходную температуру заправляемого топлива. При этом параметры штатной ПГСП (диапазон температуры топлива, начальные объемы подушек в баках и давления в них), условия работы внутрибаковых устройств и предохранительных клапанов не выходили за допустимые пределы.

Выбор оптимальных объемов подушек в

баках V_i и определение их зависимости от температуры для нескольких вариантов уровней заправки проводятся по формулам, приведенным в [1].

Контроль изменения среднemasовой температуры в баках при стоянке на старте РН в ТПК в течение 20-30 сут без превышения ее допустимых значений оценивается по формуле

$$T = T_C + (T_O - T_C) \exp(-\alpha_E F / (cG) \cdot \tau),$$

где T_C – среднemasсовая температура;

T_O – температура окружающей среды;

G – расход компонента топлива;

F – площадь прогрева,

полученной после решения и преобразования уравнения

$$\frac{cG}{F} \frac{dT}{d\tau} + \alpha_E (T_O - T_C) = 0,$$

где $\alpha_E = \alpha_k + \alpha_i$;

α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи рассчитывался для случая свободной конвекции [2];

$$\alpha_l = \varepsilon_{pr} \sigma \cdot \left[\left(\frac{T_o}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot (T_o - T_c)^{-1}$$

Расчет проведен из условия, что температура заправки равна температуре окружающей среды.

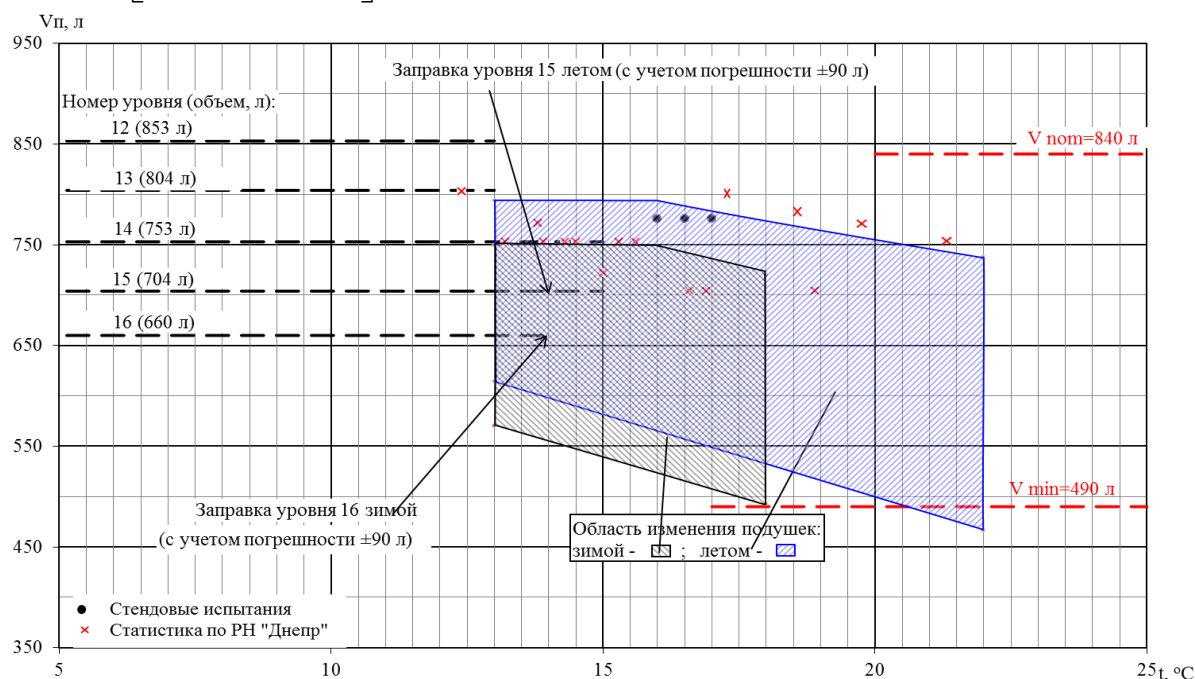


Рис. 3. Допустимые пределы изменения подушки баков в измененных условиях

Зависимость свободного газового объема от температуры

Параметры заправки	Летний период				Зимний период			
	О1	Г1	О2	Г2	О1	Г1	О2	Г2
Диапазон температуры в баке, °С	12–14,9	10–12,9	15–16,9	13–15,9	10–11,9	10–12,9	12–14,9	13–15,9
Уровни системы контроля заправки (СКЗ) при штатной заправке	13	13	14	14	12	13	13	14
Уровни СКЗ дозаправки	15	15	15	15	15	16	15	16
Рабочие запасы КТ, кгс	108249	108619	40680	40828	108249	108619	40680	40828
Вес дозаправляемых КТ, кгс	701	320	85	39	1071	468	176	74
Минимальный объем подушки на момент старта, л	1650	1100	600	550	1610	1100	600	550

Примечание. О1 – бак окислителя I ступени; О2 – бак окислителя II ступени; Г1 – бак горючего I ступени; Г2 – бак горючего II ступени

На рис. 3 представлена зависимость начальных газовых объемов и температуры компонентов топлива при стоянке (перед стартом) в летнее и зимнее время для одного из баков. Исходя из результатов стендовых испытаний и состоявшихся пусков проведены исследования с учетом погрешности доз заправки и температурных изменений, которые показали, что в зависимости от сезонных условий баки можно дозаправлять на 2-3 уровня выше относительно штатных значений (таблица). Также показаны основные параметры ступени при изменении дозы заправки.

Таким образом, за счет одновременной комбинации повышения температуры

заправляемого топлива и увеличения его заправляемого объема проведенный комплекс расчетов позволил повысить дозу заправляемых КТ на 1145 кг в летний период и на 1789 кг – в зимний, что, в свою очередь, позволяет повысить энергетические характеристики РН на ~8...11% для круговой орбиты 500 км.

Как известно из [1], с точки зрения оптимизации и точности обеспечения орбитальных параметров в запускаемых КА весьма важны заключительный и длительный импульсы тяги (после выключения маршевого двигателя). Так, например, высокой конкурентности РКН "Зенит" способствует воз-

возможность работы второй ступени после выключения маршевого двигателя в течение 70-90 с на заключительном участке автономной работы рулевого двигателя (РД).

Кроме того, необходимо было прежде

всего гарантировать повышенный ресурс работы рулевой двигательной установки. Это было подтверждено положительными результатами ресурсных испытаний.

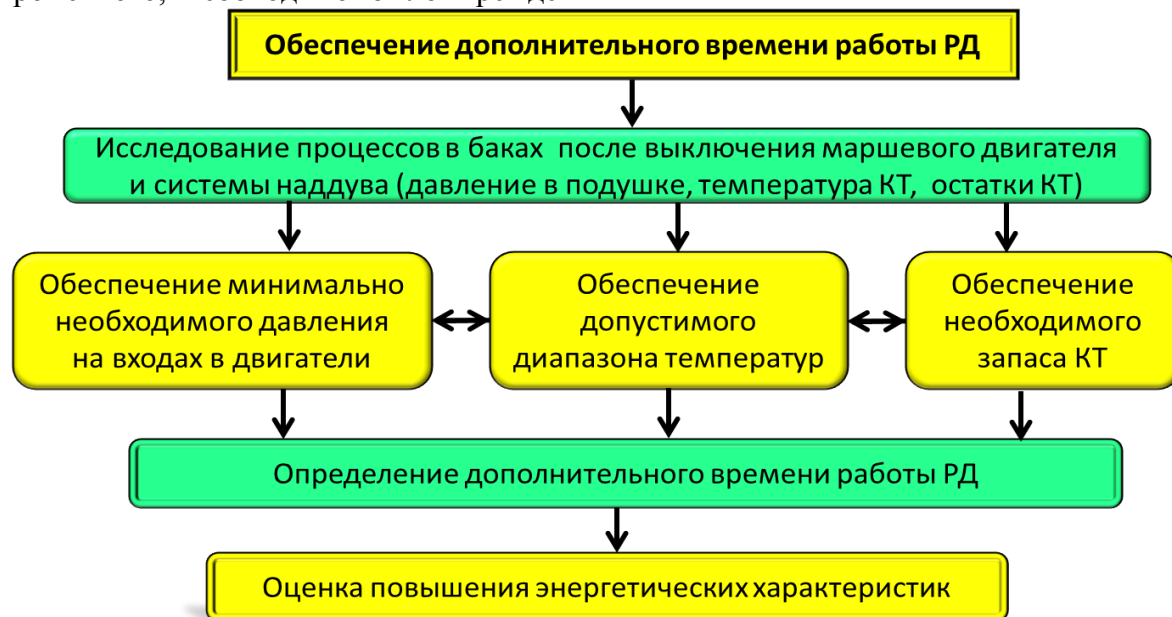


Рис. 4. Цикл мероприятий по увеличению времени работы двигателя

На рис. 4 представлен комплекс мероприятий по обеспечению автономного наддува баков, который является результатом уникального сочетания требуемых давлений на входе в двигатель, допустимого диапазона температур и необходимого запаса КТ.

Температура компонентов топлива на входе в РД определялась с учетом сопутствующего (в момент выключения маршевого двигателя) уникального эффекта, подробно описанного и проиллюстрированного в статье [3].

При этом после выключения маршевого двигателя под действием резкого ударного изменения тяги за счет перемешивания остаточного компонента температура его "зеркала" не повышается, а становится равной среднemasсовой температуре на входе в РД, которая не превышает допустимых значений.

На рис. 5 представлен расчет максимального времени работы рулевого двигателя. Показано изменение предварительных значений температур компонентов топлива по времени автономной работы рулевого двигателя.

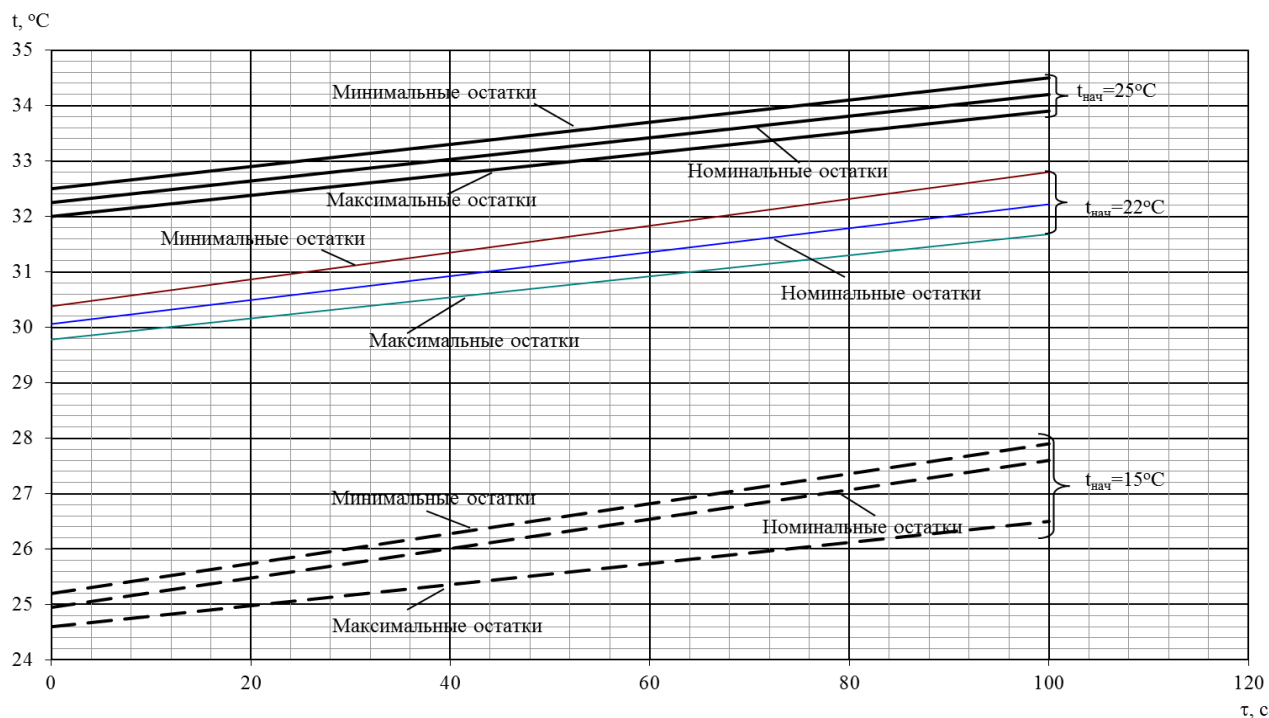


Рис. 5. Результаты расчета температур КТ при дополнительной работе РД

Время дополнительной работы за счет использования остаточных энергетических ресурсов (после выключения маршевого двигателя и системы наддува) определяют по формуле

$$\tau_{\max} = \frac{V_{\text{П нач}}}{Q} \left(\frac{P_{\text{нач}} T_{\text{кон}}}{P_{\text{кон}} T_{\text{нач}}} - 1 \right),$$

где τ_{\max} – максимальное время дополнительной работы; $V_{\text{П нач}}$ – начальный объем газовой подушки на момент выключения МД; Q – объемный расход КТ на рулевой двигатель; $T_{\text{нач}}$, $T_{\text{кон}}$ – среднemasсовая температура газовой подушки в начале и в конце участка автономной работы рулевого

двигателя; $P_{\text{нач}}$, $P_{\text{кон}}$ – давление газа в подушке в начале и в конце участка автономной работы рулевого двигателя (конечное определяется минимальным давлением при обеспечении работоспособности рулевого двигателя).

На рис. 6 показаны изменение давления в баке при автономной работе рулевых двигателей и минимально необходимые давления в баке для обеспечения работы РД, значения настроек предохранительного клапана и результаты летных испытаний. Из рис. 6 следует, что при начальной температуре 25°C работоспособность двигателя может нарушаться, поэтому принято ограничение по начальной температуре топлива 22°C [4].

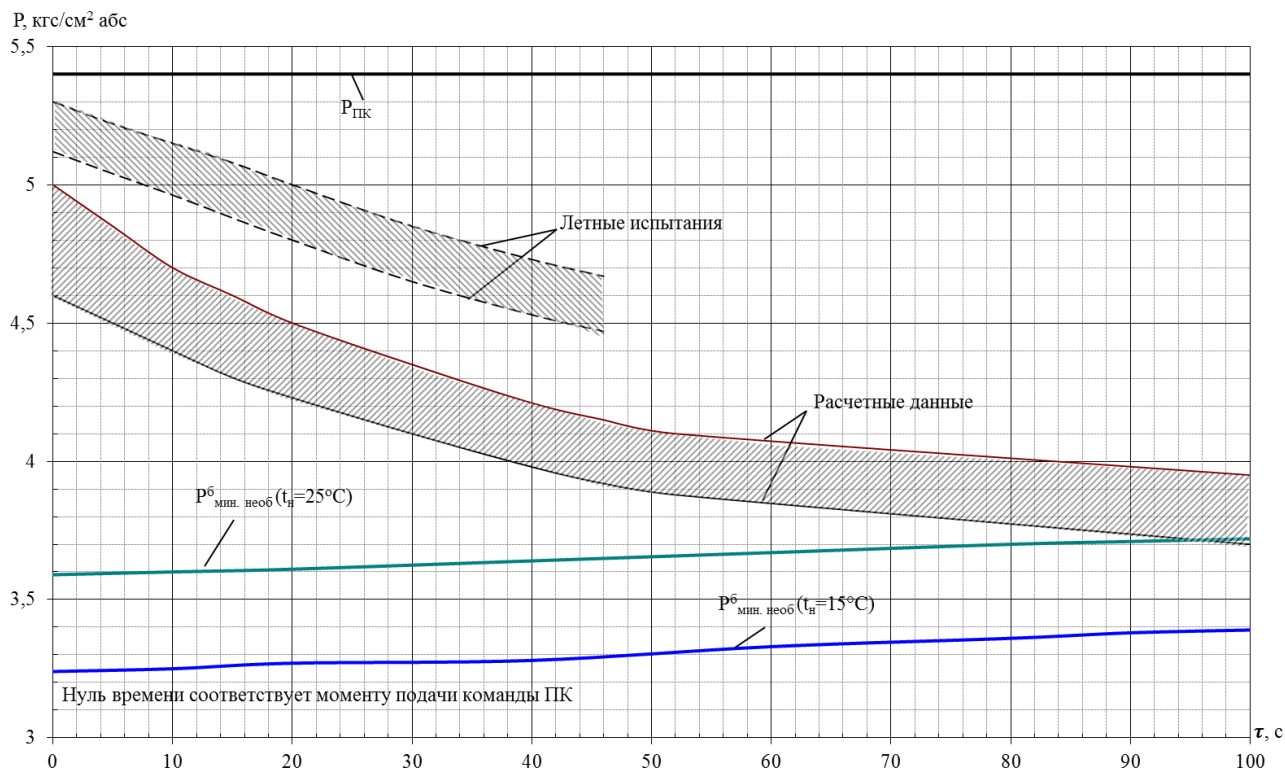


Рис. 6. Давление в топливных баках на дополнительном участке

Выводы

Дозаправка баков окислителя и горючего I и II ступеней РН дополнительно к штатной дозе технически возможна и составляет в летний период 8%, в зимний – 13%.

Расчетно-экспериментальным путем подтверждена возможность дополнительной автономной работы рулевых двигателей до 100 с.

В измененных условиях пусков сохраняется в целом работоспособность ПГСР компонентов топлива в двигатели.

В целом вышеприведенные мероприятия позволили повысить массу выводимой полезной нагрузки на ~12% (в летний период) и ~15% (в зимний период) для круговой орбиты 500 км.

Список использованной литературы

1. Логвиненко А. И. Перспективы развития пневмогидравлических систем современ-

ных РН // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2014. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное".

2. Увеличение доз заправки компонентами топлива баков 1-й и 2-й ступеней РН "Днепр" за счет снижения их температуры, начальных газовых объемов в баках и изменения технологии заправки 21.16850.123 ОТ: Техн. отчет / ГП "КБ "Южное". – 54 с.

3. Определение границы работоспособности ПГСР 2-й ступени при увеличенном времени автономного режима работы РД (после выключения МД) 21.16234.123 ОТ: Техн. отчет / ГП "КБ "Южное". – 75 с.

4. Остославский И. В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева. – М.: Машиностроение, 1969. – 499 с.

Статья поступила 23.08.2017