

*Ю.А. МИТИКОВ*, канд. техн. наук, доц., зав.каф., ДНУ им. О. Гончара,  
Днепропетровск

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПОЛЕТНОГО НАДДУВА МНОГОБЛОЧНЫХ СТУПЕНЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ**

Розглянути проблеми проектування систем наддування багатоблочних багаторазових ступенів ракет-носіїв. Розглянуто процеси при аварійному вимиканні блоку, наведено рекомендації.

**Ключові слова:** багатоблочні ракети, системи наддування, аварійне вимикання блоку, рекомендації

Рассмотрены проблемы проектирования систем наддува многоблочных многоразовых ступеней РН. Рассмотрены процессы при аварийном выключении блока, приведены рекомендации.

**Ключевые слова:** многоблочные ракеты, системы наддува, аварийное выключение блока, рекомендации.

The problems of designing multi-block systems boost levels of reusable launch vehicle. The processes of emergency shutdown block, with recommendations.

**Keywords:** multi-block missiles, pressurization system, emergency shutdown block recommendations.

### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами**

В настоящее время в связи с возрастающей конкуренцией на рынке оказания пусковых услуг все большее значение приобретают проектные решения, направленные на снижение затрат по выведению полезной нагрузки на орбиту. Одним из таких решений является использование многоблочных первых ступеней носителей, позволяющее существенно сократить номенклатуру разрабатываемых изделий. При этом с одной стартовой позиции можно запускать (в зависимости от потребностей) носители легкого, среднего, тяжелого и сверхтяжелого классов. В этом случае также упрощаются проблемы транспортировки ступеней с завода-изготовителя на испытательную базу и космодром. В качестве примера многоблочных ступеней можно привести все многочисленное семейство «Союз-2», РН «Энергия», РН «Ариан-V», РН «Ангара», РН «Русь-М» и др. В некоторых ракетных комплексах под флагом экономии средств рассматривается многократное использование первых ступеней. Например, на РН «Энергия» первые ступени должны были использоваться 10 раз, а их двигательные установки – 20 раз [1]. Ракетный комплекс «Ангара – Байкал» Российской Федерации в настоящее время также рассматривается с многократным использованием первых ступеней.

В большинстве случаев, а при наличии космонавтов на борту или возвращаемого корабля – в обязательном порядке, выдвигается требование при отказе одного из элементов (в самом тяжелом случае – одного блока) обеспечение выведения объекта на такую орбиту, с которой возможно его спасение. Важно отметить, что при полете с одним неработающим блоком, как

правило, исключается требование многократного использования всех ступеней данной РН. Это объясняется невозможностью обеспечения нормального разделения блоков с большими остатками топлива на борту и их последующего безопасного приземления. Возникает проблема такого построения системы питания двигательных установок (ДУ) ракетных блоков, которая бы при максимальной простоте наиболее полно соответствовала выдвигаемым требованиям.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья**

Рассмотрим в общем виде процессы, которые происходят в системе питания ДУ работающих блоков носителя при наступлении нештатной ситуации, продолжением которой является отключение одного из блоков. Первое, что надо сразу отметить, в этом случае падает продольная перегрузка, соответственно, уменьшается давление компонентов на входе в двигатели работающих блоков. Возникает угроза кавитационного срыва быстроходных центробежных насосов. Компенсировать этот возможный провал давления в системе питания может система наддува (СН). Возникает специфический вопрос, – Как наиболее эффективно обеспечить работоспособность работающих двигателей и в штатных ситуациях, и в аварийных, на какие условия и какими ресурсами должна обладать СН?

Поиск автором публикаций на тему проектирования СН многоблочных жидкостных РН с учетом эффективной работоспособности ДУ как в штатной ситуации, так и во всех нештатных, показал практически полное отсутствие работ в этом направлении. Так, первые ступени РН «Энергия» проектировались исходя из самого тяжелого из всех возможных случаев – наступление аварийной ситуации в любой момент времени [1]. При этом правильном постулате, за основу при проектировании систем наддува (СН), топливных баков бралась огибающая всех возможных аварийных ситуаций (рис.1).

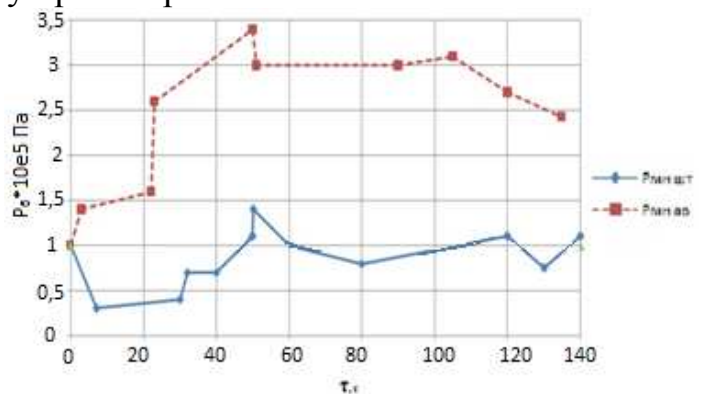


Рис. 1. Давление газа в баке окислителя I ступени РН «Энергия»:  $P_{мин шт}$  – минимально-необходимое давление газа в баке при штатной траектории;  $P_{мин ав}$  – минимально-необходимое давление газа в баке при всех возможных аварийных траекториях (огибающая кривая).

Насколько такое решение однозначно, правильно, и каковы его последствия, рассмотрим далее. Как видно из приведенных графиков, расхождение между штатными минимально-необходимыми давлениями газа в баке и огибающей минимально-необходимых давлений газа в баках при всех нештатных ситуациях различно по времени полета и колеблется в пределах от  $1 \times 10^5$  Па до  $2,3 \times 10^5$  Па.

Таким образом, запасы рабочего тела, проходные сечения трактов наддува, толщины баков при таком подходе выбираются из гипотетического случая –

полета по огибающим аварийные ситуации траекториям, чего, естественно, в действительности быть не может. СН заблаговременно работает исключительно на аварийные ситуации, обеспечивая в среднем на  $2 \times 10^5$  Па большее давление во всех топливных баках всех блоков со старта носителя.

### **Формулирование целей статьи**

Рассмотрим техническую задачу в следующей постановке применительно к многоблочной РН. Ее первые ступени жидкостные (кислород и керосин) и многократного применения при полете по штатной траектории. При наступлении аварийной ситуации, которая заканчивается выключением аварийного блока носителя, остальные блоки обеспечивают выведение космического объекта на орбиту, с которой возможно его спасение. При этом, все блоки первой ступени, как аварийный, так и неаварийные, повторному использованию не подлежат.

Для решения задачи выведения объекта на нужную орбиту для его спасения применяются различные технические решения: аварийный слив жидкого кислорода из выключенного блока с требуемым расходом, выключение блока, симметричного аварийному, форсирование ДУ работающих блоков. За основу логики работы РН при наступлении НШС в разные моменты полета принята логика, реализованная на РН «Энергия» [1].

Целью настоящей работы является исследование процессов, которыми сопровождается выключение мощных ЖРД в аварийных ситуациях, выработка рекомендаций по проектированию систем питания многоблочных РН при выключении аварийного блока в полете, обеспечивающих при требуемой надежности существенное снижение массы РН.

### **Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов**

Рассмотрим основополагающий момент выключения мощного современного ЖРД в аварийной ситуации. При констатации системой управления РН нештатной ситуации (НШС) на одном из блоков, требующей выключения его ДУ, выключение двигателя происходит в полном соответствии со штатной схемой его выключения и никак иначе. Это значит, что спад тяги с учетом импульса после действия тяги будет происходить не менее трех секунд. В соответствии со спадом тяги будут уменьшаться и продольная перегрузка, и давление компонентов топлива на входах в работающие двигатели. Таким образом, нештатная ситуация по входному давлению наступает не ранее чем через три секунды с момента подачи команды на его выключение.

Далее, наступление НШС в зависимости от времени полета вызывает разные действия системы управления полетом. Так, при наступлении НШС на старте и до 40 с полета выключение одного блока из пяти (работает вторая ступень) приводит к незначительным отличиям по продольной перегрузке от штатного полета. С 40 с полета и практически до конца работы первых ступеней при НШС одновременно с аварийным блоком выключается ДУ симметричного блока. Но одновременно с этим из неработающих блоков начинается интенсивный слив жидкого кислорода через специальные системы с расходом, в среднем, вдвое превышающим его номинальный расход через двигатель. Такое мероприятие

приводит к заметному уменьшению массы носителя и увеличению продольной перегрузки.

Наиболее тяжелым случаем для обеспечения работоспособности ДУ являются НШС перед самым началом (за 3 – 5 с) штатного дросселирования ДУ

(на рис. ~ 115 с). В этом случае гидравлические потери еще максимальны, а давление столба топлива уже заметно уменьшилось за счет его выработки. В это время отличия в потребных давлениях газа в баках при НШС и ШС максимальны и достигают  $2,3 \times 10^5$  Па. Собственно снижение продольной перегрузки до уровня НШС наступает за время не менее 3 с. После начала дросселирования ДУ потребные давления газа в баках в обоих случаях заметно снижаются из-за уменьшения гидравлических потерь, пропорциональных, как известно, квадрату расхода (рис.2). Для снижения последствий аварийного выключения ДУ в это время помимо аварийного слива кислорода (двойным расходом по сравнению с номинальным) форсируют ДУ всех работающих блоков, после чего их плавно дросселируют.

Следует отметить еще один очень важный момент. Если давление газа в баке

окислителя при ШС в полете поддерживать то, которое надо в этом случае, т.е. на уровне не выше  $1,8 \times 10^5$  Па, то прогрев кислорода в баке не превысит ~  $-177^\circ\text{C}$ . При давлении газа в баке в полете на уровне  $4 \times 10^5$  Па (исходя из принятой на РН «Энергия» концепции

изначальной готовности к худшей НШС), прогрев кислорода составит  $-174^\circ\text{C}$ . Только за счет поддержания «правильного» давления газа в баке можно снизить потребное давление газа в нем в самый тяжелый из

возможных НШС (~ 115 с) на  $0,45 \times 10^5$  Па. Потребное давление на входе в двигатель, как известно, состоит из давления насыщенных паров компонента (при данной температуре) и антикавитационного запаса.

Таким образом, пик максимально-необходимого давления газа в баке при наступлении НШС имеет продолжительность 1 – 2 с, учитывая, что собственно снижение продольной перегрузки до уровня НШС наступает за время не менее 3 с. После чего потребное давление газа в баке заметно уменьшается благодаря принятым мерам.

Главный вывод из проведенного исследования – потребное минимально-необходимое давление газа в баке при НШС наступает не мгновенно, скачком на  $\sim 2 \times 10^5$  Па, а плавно нарастает в течение ~3с, после чего существенно снижается благодаря принятым мерам (слив кислорода из неработающих двигателей, форсирование работающих двигателей). Гипотетически огибающая минимально-

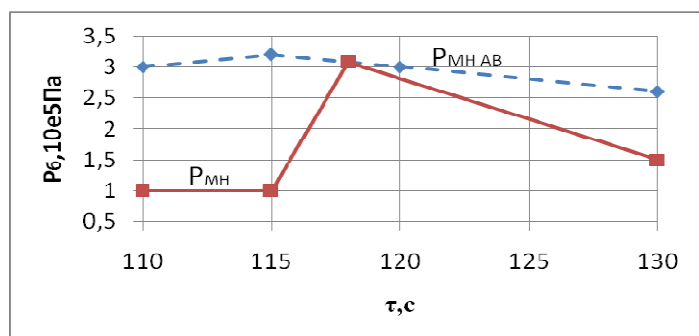


Рис.2. Давление газа в баке при реализации НШС на 115 с полета:  $P_{МН}$  – минимально-необходимое давление газа в баке окислителя при наступлении НШС на 115с полета;  $P_{МН АВ}$  – огибающая кривая минимально-необходимых давлений газа в баке при наступлении НШС в любой момент полета

необходимых давлений газа в баках работающих блоков при НШС на самом деле является огибающей кратковременных реально возможных «пиков» потребного давления газа в баке при наступлении НШС в любой момент времени.

Максимальная потребная величина давления газа в баке при НШС наступает за несколько секунд до начала планового дросселирования двигательных установок перед их выключением.

Полученные результаты позволяют по иному подойти к проектированию СН многоблочных РН [2]. СН должна структурно состоять из двух частей. Первая её часть и основная обеспечивает чистым рабочим телом (например, гелием) потребное давление газа в баках при ШС. При наступлении НШС задействуется её вторая часть, быстродействующая, позволяющая в течение 2 – 2,5с увеличить давление газа в баке на  $\sim 2 \times 10^5$  Па. Учитывая, что все блоки при НШС не подлежат повторному использованию, тут выбор у конструктора большой, т.к. допускается использовать эффективные, но не идеально «чистые» продукты сгорания. Это могут быть и твердотопливные газогенераторы (быстродействие от 0,05с), например, на основе азиды натрия, использующиеся для наддува подушек безопасности автомобилей, и химически активные вещества, организуемые внутри бака т.н. химнаддув [3], например, пусковое горючее ПГ-02 для бака с жидким кислородом. Быстродействие электрогидроклапанов, обеспечивающих его впрыск, незначительно уступает быстродействию твердотопливных газогенераторов.

При наличии в составе РН небольшого числа блоков, например, трех, когда выключение одного из блоков при НШС существенно снижает продольную перегрузку, а значит, потребуются значительное повышение давления газа в баках работающих блоков, предлагается давление газа в баках инертным газом поддерживать на уровне выше потребностей ШС.

При реализации предложенных мероприятий, учитывая высокий уровень надежности всех систем ракетного комплекса, НШС для системы питания действительно будет рассматриваться как исключительное явление, а не как штатное. Тут также необходимо учесть, что запасы прочности для аварийной ситуации меньше, чем для штатного режима.

Проведенные проработки реализации предложенного способа наддува применительно к первым ступеням РН «Энергия», показывают выигрыш в полезной нагрузке не менее 450 кг.

### **Выводы из данного исследования**

Проведенные исследования реальной физической картины, происходящей в системах питания ДУ многоблочной РН при наступлении НШС, позволяют обоснованно подойти к проектированию систем наддува.

Установлено, что потребное минимально-необходимое давление газа в баке при НШС наступает не мгновенно, скачком на  $\sim 2 \times 10^5$  Па, а плавно нарастает в течение  $\sim 3$ с, после чего существенно снижается благодаря принятым мерам (слив кислорода из неработающих двигателей, форсирование работающих двигателей). Используемая ранее при расчетах огибающая минимально-необходимых давлений газа в баках работающих блоков при НШС на самом деле является

огибающей кратковременных реально возможных «пиков» потребного давления газа в баке при наступлении НШС в любой момент времени.

Предложено СН для многоблочной РН проектировать конструктивно из двух частей. Первая её часть и основная обеспечивает чистым рабочим телом (например, гелием) потребное давление газа в баках при ШС. При наступлении НШС задействуется её вторая часть, быстродействующая, позволяющая в течение 2 – 2,5 секунд увеличить давление газа в баке на требуемую величину.

При необходимости увеличить давление газа в баке на существенную величину, предложено давление газа в баке при ШС поддерживать основной системой на промежуточном уровне, выше потребностей ШС.

Для упрощения (снижения величины потребного прироста давления) решения поставленной задачи при реализации самой сложной (для СН) НШС, а именно, за несколько секунд до планового дросселирования ДУ, необходимо поддерживать в полете давление газа в баке с кислородом на максимально низком уровне. Такое решение уменьшает прогрев жидкого кислорода, а, следовательно, снижает его температуру на входе в двигатель и потребности в увеличении давления на входе в него.

**Список литературы:** 1.Губанов, Б.И. Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора. Т.3. «Энергия - Буран» [Текст] / Б.И. Губанов. – Нижний Новгород. : НИЭР, 1988 г. – 432с.2.А.с. 319638 СССР, МПК F02k 11/00ж, В64d 37/24. Способ наддува топливного бака [Текст] / Митиков Ю.А. (СССР). – 4520022; заявл. 01.09.89; опубл. 01.10.90.3.Беляев, Н.М. Системы наддува топливных баков ракет [Текст] /Беляев Н.М. – М. : Машиностроение,1976. – 335 с.

*Поступила в редколлегию 15.05.2012*

**УДК 62-663.7(045)**

**В.И. РЫНДЯЕВ**, канд.техн.наук, ст. преп., УИПА, Харьков

## **КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ТРАНСМИССИЙ СОВРЕМЕННЫХ КОКСОВЫХ МАШИН**

Запропоновані часткові критерії оцінки проектних рішень систем трансмісії коксових машин. Показано, що першочергове значення для кількісної оцінки критеріїв працездатності мають значення еквівалентних і максимальних динамічних навантажень.

**Ключові слова:** критерії оцінки, навантаження, система трансмісії.

Предложены частные критерии оценки проектных решений систем трансмиссий коксовых машин. Показано, что первостепенное значение для количественной оценки критериев работоспособности имеют значения эквивалентных и максимальных динамических нагрузок.

**Ключевые слова:** критерии оценки, нагрузки, система трансмиссий.

Proposed special criteria for assessing design solutions of systems of transmission of coke machines. It is shown that the primary importance to quantify the performance criteria are equivalent and maximum values of dynamic loads.

**Keywords:** evaluation criteria, loads, the transmission system.