

Таблиця 4

Влияние параметра эллиптичности на сверхкритическое число Re и коэффициент сопротивления цилиндра при $\varepsilon / d = 4 \cdot 10^{-3}$

t	$\lg Re_\varepsilon$	$\lg Re$	$\lg Re_x$	C_x
0,5	3,72	6,12	5,58	0,7
1,0	3,83	6,23	6,12	1,0
2,0	4,6	7,0	6,6	1,34

Выводы. На основе асимптотического метода и модели пристенного вязкого течения разработаны аналитические соотношения для расчета коэффициента сопротивления эллиптического цилиндра с шероховатой поверхностью при переходном и турбулентном режимах отрывного обтекания. Предложенные соотношения обеспечивают удовлетворительное согласование расчетных и опытных данных в широких диапазонах изменения определяющих параметров.

Библиографические ссылки

1. Гювен О. Модель обтекания круговых цилиндров с шероховатой поверхностью при высоких числах Рейнольдса / О. Гювен, В. Пател, С. Фарелл // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1977. – № 3. – С. 144–154.
2. Девнин С. И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: справочник / С. И. Девнин. – Л., 1983. – 320 с.
3. Пицьк Л. Е. Расчет влияния режимов обтекания на аэродинамику эллиптического цилиндра с шероховатой поверхностью / Л. Е. Пицьк, Л. Л. Пицьк // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка. – 2011. – № 4. – С. 112–116.
4. Пицьк Л. Е. Расчет влияния числа Рейнольдса на сопротивление и теплоотдачу цилиндра и эллипсоида в несжимаемом потоке / Л. Е. Пицьк, Л. Л. Пицьк // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка. – 2008. – № 4. – С. 127–132.

Надійшла до редколегії 01.09.2012.

УДК 629.764.02

П. В. Семененко

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное”
им. М.К. Янгеля»*

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТИ СКОРОСТИ СПАДА ДАВЛЕНИЯ ПОД ГОЛОВНЫМ ОБТЕКАТЕЛЕМ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ДНЕПР»

На основі аналізу деяких особливостей перебудови зовнішнього обтікання ракети-носія «Дніпро» при переході ним трансзвукових швидкостей визначено спосіб керування швидкістю падіння тиску у зоні розміщення космічного апарату.

Ключові слова: дренавання, швидкість падіння тиску, зона розміщення космічного апарату.

На основании анализа некоторых особенностей перестройки внешнего обтекания ракеты-носителя «Днепр» при прохождении им трансзвуковых скоростей определен способ управления скоростью спада давления в зоне расположения космического аппарата.

Ключевые слова: дренирование, скорость спада давления, зона размещения космического аппарата.

© П. В. Семененко, 2012

The way of controlling pressure falling in the area of cosmic apparatus location has been determined on the basis of analyzing some peculiarities of the reconstruction of the external streamlining “Dnepr” rocket carrier while it’s passing through the zone of transonic speed.

Key words: draining, pressure falling velocity, the area of cosmic apparatus location

Введение. «Днепр» относится к лёгкому классу средств выведения космических аппаратов. Первоначально он не разрабатывался как средство выведения космических аппаратов. Он имеет свои конструктивные особенности и баллистические параметры, несколько отличающиеся от традиционных средств выведения космических аппаратов (КА). Использование ракеты-носителя (РН) «Днепр» в качестве средства выведения требует дополнительных исследований.

В связи с непрерывным совершенствованием КА к нему растут эксплуатационные требования. Прежние требования ужесточаются, появляются новые. Некоторые элементы конструкции современных КА могут быть чувствительны не только к определённым зависимостям изменений давления в районе его размещения, но и к скорости спада давления (ССД). Для многих КА данный эксплуатационный параметр является критерием его работоспособности.

Для расширения области применения РН «Днепр» как средства выведения КА необходима организация способов управления величиной ССД. Актуальным является уменьшение максимального уровня ССД. С помощью систем дренирования (СД) можно влиять на величину ССД.

В [6] была проведена обработка телеметрических данных пусков по характеру внешнего обтекания третьей ступени и величинам ССД. Было признано целесообразным провести этап теоретических исследований.

Целью настоящего этапа теоретических исследований является выявление особенности величины ССД при помощи организации СД для РН «Днепр».

Задачи исследования такие:

- постановка задачи о влиянии распределения внешнего давления на III ступени и площадей дренажных устройств на характер изменения ССД;
- разработка методики и алгоритма расчета ССД;
- теоретическое подтверждение возможности существования и взаимозависимости двух пиков ССД при прохождении трансзвуковой скорости полёта РН;
- определение рациональных значений эффективной площади;
- нахождение оптимальных значений эффективной площади двигательной установки (ДУ), реализующей минимальный уровень ССД;
- выдача практических рекомендаций.

Общие данные и особенности СД РН «Днепр». На рис. 1 показаны обобщенные данные о дренировании III ступени РН «Днепр» и диапазоны изменений ССД в зоне размещения КА на трансзвуковом участке полёта РН.

На рис. 1,а дана обобщенная по всем пускам характеристика СД: размещение КА, места расположения доминирующих негерметичностей и ДУ.

Процесс дренирования объёмов III ступени в полёте характеризуется двумя случаями: опорожнение или наддув. Опорожнение или наддув сухих отсеков зависит от: конструкции ДУ, расположения негерметичностей, коэффициентов давления на дренажных устройствах и на негерметичностях, а также от траектории выведения КА. На различных элементах конструкции, имеющих негерметичности, в разные моменты времени могут реализовываться оба случая дренирования. В определённой степени это зависит от характера внешнего обтекания компоновки III ступени, распределения на нём внешнего давления.

На рис. 1,б показаны обобщенные по всем пускам [1] величины и характер ССД, реализующиеся при пусках ракеты-носителя «Днепр». На графике выделяются две области, характеризующиеся пиками давлений ССД. Первый на

~ 33 с полёта, второй – ~ 35 с. Отмечены минимальные и максимальные значения ССД.

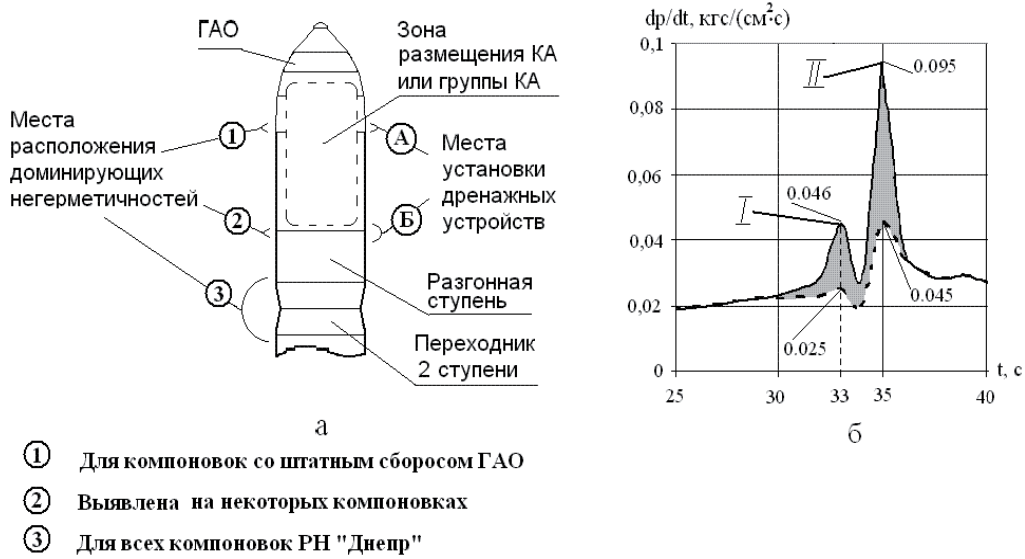


Рис. 1. Общие данные о дренировании III ступени РН «Днепр» (а) и диапазоны изменений скорости спада давления на трансзвуковом участке полёта РН (б)

Пики I и II образуются при прохождении зоны трансзвуковых скоростей полёта (число Маха $0,8 < M < 1,2$). Перестройка течения на поверхности РН происходит в разное время на различных её элементах, что приводит к резким изменениям давления на поверхности РН. Перестройка течения на внешней поверхности РН является причиной возникновения пиков I и II в зоне размещения КА. Величины этих пиков различны от пуска к пуску, но характерны для каждой конкретной СД.

При прохождении участка траектории полета РН, на котором происходит существенный спад внешнего давления, в объеме V_1 отмечались два пика ССД с небольшим временным интервалом между ними. Регулировать и управлять величинами двух пиков возможно с помощью выбора параметров СД.

Постановка задачи об определении ССД. Рассматривались два смежных объема V_1, V_2 , соединенных между собой отверстиями с площадью поперечного сечения S_{12} . Каждый из объемов имел свои отверстия (S_1, S_2), с помощью которых происходило сообщение с атмосферой. На рис. 2,а показана упрощенная СД двух смежных объемов: зоны размещения КА и примыкающей к ней разгонной ступени. В данной расчётной схеме учтены только основные параметры дренирования S_1, S_2 и S_{12} . В частности, не учтены доминирующие негерметичности, особенности фильтров и других устройств, которые могут оказывать влияние на ССД, но в данной постановке задачи приняты как второстепенные.

Исходными параметрами являлись: S_1, S_2, S_{12} ;

- характеристики внешней среды – величины давлений и плотностей в районе отверстий с внешней средой в зависимости от времени $P_{1H}(t), \rho_{1H}(t), P_{2H}(t), \rho_{2H}(t)$;
- характеристики конструкции – величины объемов V_1, V_2 ;
- характеристики отверстий – величины $S_1, \mu_1, S_2, \mu_2, S_{12}, \mu_{12}$, где S_i – площади отверстий, μ_i – коэффициенты расхода.

Ставится задача: при заданных объемах V_1, V_2 , заданных параметрах внешней среды $P_{1H}(t), \rho_{1H}(t), P_{2H}(t), \rho_{2H}(t)$, путем варьирования параметров дренирования $S_1, \mu_1, S_2, \mu_2, S_{12}, \mu_{12}$ подобрать такое их сочетание, при котором реализуется общий минимально возможный уровень ССД.

На рис. 2,б показана типичная для конструкции III ступени РН «Днепр» картина перестройки внешнего обтекания. В количественном отношении она характеризуется коэффициентами давлений, реализующихся на дренажных площадях S_1, S_2 . Здесь представлена обобщённая качественная картина внешнего обтекания III ступени.

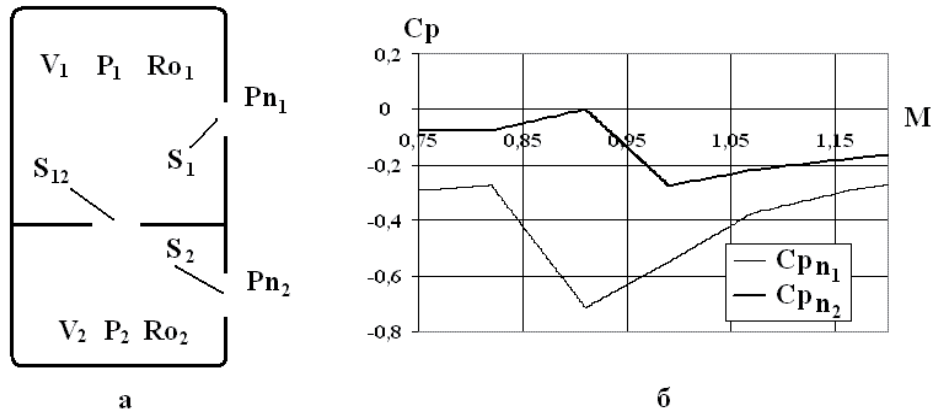


Рис. 2. Смежные объемы V_1 и V_2 , соединенные между собой S_{12} (а), и коэффициент давления в местах установки дренажных площадей S_1 и S_2

Характерной особенностью обтекания является условие их поочередных резких спадов и подъемов при различных числах Маха. Такая особенность перестройки течения с дозвуковой скорости на сверхзвуковую на разных элементах при различных числах Маха не является чем-то новым [2, 3, 5]. На данном этапе теоретических исследований впервые предпринята попытка использовать эту особенность перестройки течения для практических целей. Зная заранее картину внешнего обтекания III ступени, подобрать таким образом параметры СД, чтобы величина ССД была минимальной.

Методика расчета ССД. Массовый секундный расход \dot{G} через ДУ определялся по формуле [1]

$$\frac{dG}{dt} = \dot{G} = \mu S \sqrt{\frac{2k}{k-1} P \rho \left[\left(\frac{P_H}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_H}{P} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]}, \quad (1)$$

где $\mu \cdot S = F_{эф}$ – эффективная площадь отверстия (m^2); $k = 1,4$; P ($Па$), ρ ($кг/м^3$) – параметры газа внутри объема, из которого истекает газ; P_H ($Па$) – параметры внешней среды.

Градиент давления ССД вычислялся по зависимости [4]

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} k (\dot{G}_{вх} - \dot{G}_{вых}), \quad (2)$$

где $R = 287,15$ ($Дж/(кг \cdot K)$); $T = 283,15$ (K); $\dot{G}_{вх}$, $\dot{G}_{вых}$ – массовые секундные расходы газа, поступающего и истекающего соответственно; V (m^3) – объем.

Замыкает систему уравнений (1), (2) выражение для определения изменения величины плотности газа в объеме [4]

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{(\dot{G}_{вх} - \dot{G}_{вых})}{V}. \quad (3)$$

В разрабатываемой методике было принято предположение о том, что перетекание масс газа происходит при постоянной температуре, $T = const$ (изотермический процесс).

Исходная система дифференциальных уравнений, основанная на выражениях (1), (2), (3) и описывающая процессы перетекания газа из объема в объем и в атмосферу, была представлена в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dG_1}{dt} = \mu_1 \cdot S_1 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\left(\frac{P_{1H}}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{1H}}{P_1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]} \\ \frac{dG_2}{dt} = \mu_2 \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_2 \cdot \rho_2 \cdot \left[\left(\frac{P_{2H}}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{2H}}{P_2} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]} \\ \frac{dG_{12}}{dt} = \mu_{12} \cdot S_{12} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]} \\ \frac{dP_1}{dt} = \frac{RT}{V_1} \cdot (\dot{G}_1 - \dot{G}_{12}) \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{RT}{V_2} \cdot (\dot{G}_2 + \dot{G}_{12}) \\ \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{(\dot{G}_1 - \dot{G}_{12})}{V_1} \\ \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{(\dot{G}_2 + \dot{G}_{12})}{V_2} \end{array} \right. \quad (4)$$

Особенности алгоритма решения системы семи дифференциальных уравнений (4). Систему (4) нельзя в полном смысле назвать системой. Её решение можно проводить несовместно, а отдельным решением каждого уравнения в последовательности, указанной в (4). В то же время интегрирование системы дифференциальных уравнений (4) имеет некоторые особенности, которые не позволяют напрямую, без разработки специального алгоритма, применять стандартные программы численного интегрирования. В исходном положении, когда все четыре пары параметров газа в объемах V_1, V_2 и на отверстиях равны между собой ($P_1 = P_2 = P_{1H} = P_{2H}, \rho_1 = \rho_2$), перетекание масс газа не происходит. Для начала движения масс газа достаточно, чтобы хотя бы одно из значений давлений было отличным от других. Обычно это – изменение величины давления на одной из отверстий P_{1H} или P_{2H} . Особенностью расчета данного алгоритма является то, что исходная система уравнений (4) в процессе расчета не остается в своем первоначальном виде, а может быть модифицирована. Если на i -ом шаге интегрирования давление в объеме V_1 больше, чем в объеме V_2 ($P_1 > P_2$), то алгоритм расчета происходит по выражениям (4) в порядке их расположения. Физически это означает, что масса газа из объема V_1 перетекает в объем V_2 . Поэтому в формулах для P и ρ , для объема V_1 \dot{G}_{12} имеет знак «минус», для объема V_2 – знак «плюс».

При обратной картине перетекания масс газа, когда $P_1 < P_2$ и масса газа перетекает из объема V_2 в объем V_1 , меняются не только знаки на противоположные в последних четырех формулах системы (4) перед \dot{G}_{12} , но и само выражение для \dot{G}_{12} . Для этого случая оно трансформируется в следующий вид:

$$\frac{d\dot{G}_{12}}{dt} = \mu_{12} S_{12} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_2 \rho_2 \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]}. \quad (5)$$

Аналогичной модификации подвергаются первые два уравнения системы (4), если происходит не истечение газа, а его втекание, то есть $P_1 < P_{1H}$, $P_1 < P_{2H}$. Соответственно меняются знаки на противоположные в последних четырех уравнениях перед \dot{G}_1 , \dot{G}_2 .

Алгоритм минимизации общего уровня ССД на данном этапе разработки методики, ввиду малого количества параметров дренирования, состоит в простом переборе значений параметров дренирования и выборе наименьшего значения ССД.

Результаты расчётов. На рис. 3 показана наиболее характерная картина значений скорости спада давления в объёме V_1 по времени прохождения трансзвуковой зоны. Наблюдается два пика ССД: пик I и пик II. С помощью изменений величины S_1 можно влиять на величины пиков I и II и тем самым управлять величиной ССД. При малых значениях S_1 пик I имеет своё минимальное значение, а пик II в наибольшей степени превосходит пик I. При увеличении значений S_1 величина пика I увеличивается, а пик II уменьшается. При определенном значении S_1 величина пика превосходит значение пика II.

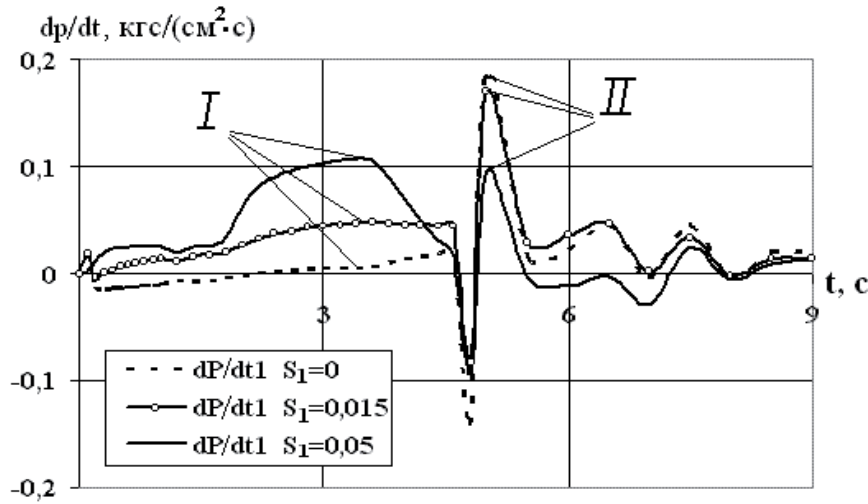


Рис. 3. Обобщённая картина значений скорости спада давления в объёме V_1 , демонстрирующая взаимосвязь пиков I и II

Результаты (рис. 3) были проанализированы, обработаны и представлены в более наглядном и удобном виде для проведения различного рода анализов. На рис. 4 представлены результаты дополнительного анализа динамики изменения величин пиков.

Здесь выделены четыре участка, которые отображают увеличение или уменьшение значений пиков и их соотношение.

Участок 1. Происходит увеличение значений пика I и пика II. Причем значение пика II больше значения пика I. Этот участок назван нерациональным изменением значения S_1 .

Участок 2. Характеризуется дальнейшим увеличением значений пика I, но уменьшением значения пика II. Так как максимальный уровень ССД определяется значением пика II, то общий максимальный уровень ССД на этом участке снижается с увеличением значения S_1 . Этот участок изменений значений S_1 признан рациональным.

Участок 3. S_1 равно $0,045 \text{ м}^2$. Значения пика I и пика II равны между собой. Минимально возможный общий уровень ССД. Оптимальное значение – S_1 .

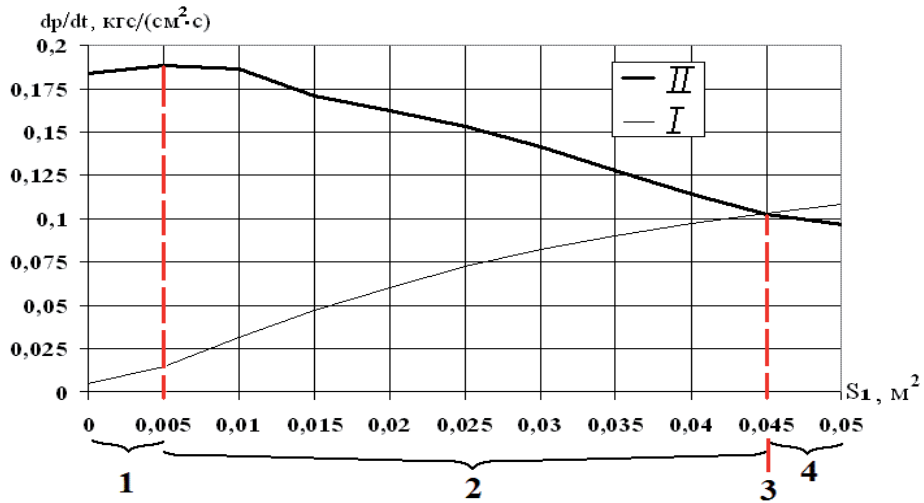


Рис. 4. Динамика изменения величины пика I и пика II в зависимости от величины площади S_1

Участок 4. Величина пика I продолжает увеличиваться, а величина пика II уменьшаться. Но в отличие от участка 1, значение пика I больше значения пика II. Нерациональный участок изменения значений – S_1 .

На рис. 5 показано влияние на границы разделения выделенных выше участков величины площади S_{12} ДУ12, посредством которого происходит сообщение между объемами V_1 и V_2 .

Для более детального анализа закономерностей ССД от S_1 были выявлены и определены точки излома «■» и точки пересечения «●». Точки излома разделяют рациональные и нерациональные участки значений S_1 , точки пересечения дают оптимальные значения S_1 .

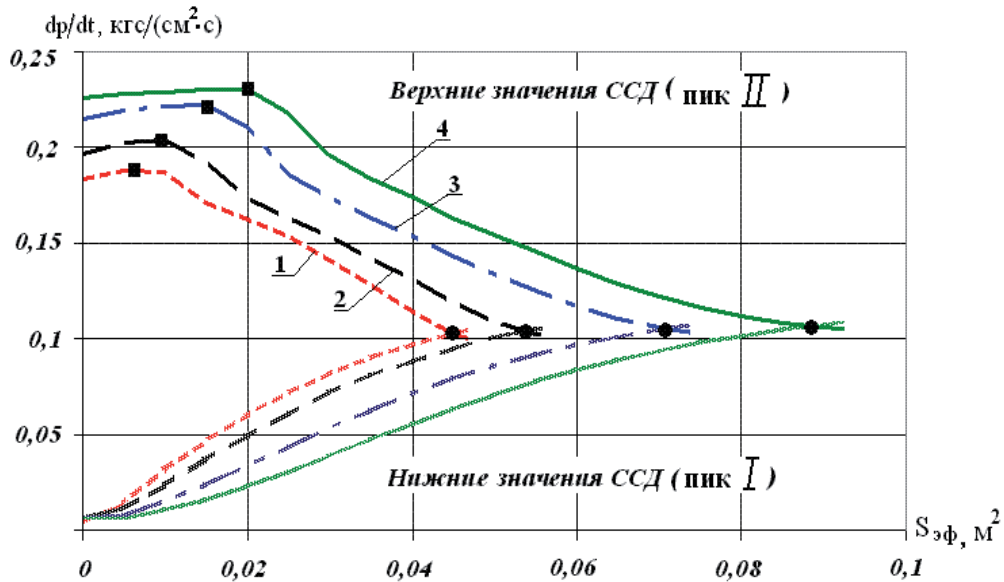


Рис. 5. Влияние на границы разделения выше выделенных участков величины площади S_{12}

В табл. 1 даны значения S_1 для точек излома и точек пересечения в зависимости от S_{12} .

Таблиця 1

Влияние на границы разделения выше выделенных участков величины площади S_{12}

№	$S_{12}, \text{м}^2$	$S_1, \text{м}^2$ (точка излома)	$S_1, \text{м}^2$ (точка пересечения)
1	0,005	0,005	0,045
2	0,01	0,01	0,055
3	0,02	0,015	0,075
4	0,03	0,02	0,09

Анализ представленных результатов показал, что с увеличением значения площади S_{12} для получения точек излома и точек пересечения необходимо увеличивать величину площади S_1 . Кроме того, с увеличением значения площади S_{12} растёт общий уровень значений ССД.

Дальнейшие исследования были продолжены для штатной компоновки III ступени РН «Днепр». Рассмотрен вариант увеличения площади S_1 на конической части с малым углом конусности (до 5 град). Площадь S_2 представлена группой сравнительно близко расположенных друг к другу негерметичностей. Они располагаются на стыке разгонной ступени с переходником II ступени, люков переходника II ступени и стыках самого переходника II ступени. Внутреннее сообщение между объёмами происходит посредством фильтра. При расчётах за значение всех дренажных площадей (S_1, S_2, S_{12}) принималось значение их эффективных площадей. На рис. 6 представлены результаты расчётов ССД для штатной компоновки третьей ступени РН «Днепр». Анализ результатов проведенных исследований для космического аппарата с заданными массогабаритными характеристиками показали качественное совпадение с предыдущими теоретическими исследованиям зависимостей ССД от параметров дренирования и наличие явно выраженных точек излома и точек пересечений.

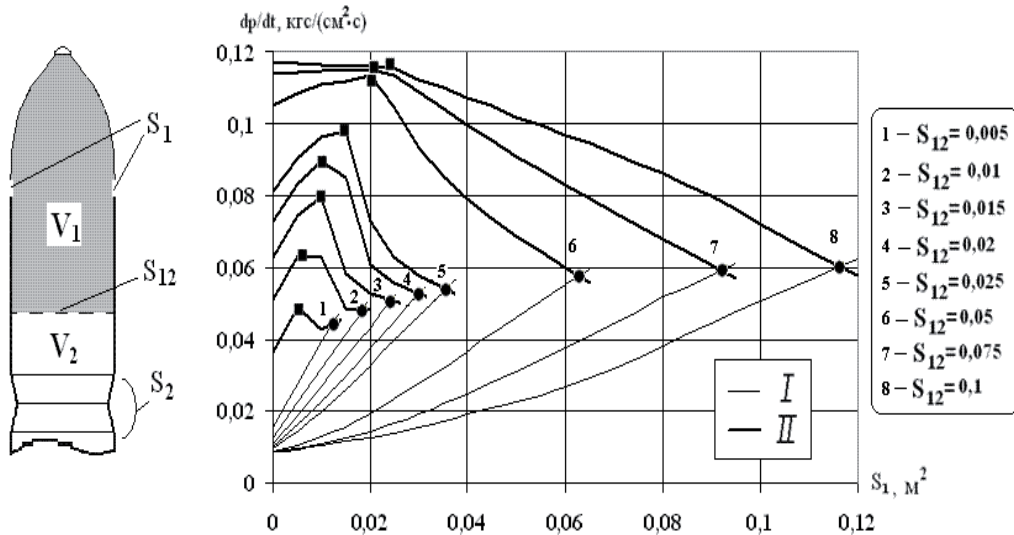


Рис. 6. Зависимости ССД для штатной компоновки космической головной части ракеты-носителя (КГЧ РН) «Днепр»

Выводы. 1. Поставлена и решена задача о влиянии площадей дренажных устройств на характер изменения ССД (градиента давления);

2. Выявлено экспериментально [6] и подтверждено настоящими теоретическими исследованиями, что характерной особенностью ССД РН «Днепр» является

ся наличие двух пиков на коротком промежутке времени при прохождении трансзвуковой скорости полёта РН;

3. Выявлена отличительная особенность ССД: взаимосвязь пиков I и II. При увеличении значения пика I значение пика II уменьшается и наоборот;

4. Определены рациональные значения площадей ДУ1, при которых начинается уменьшение величин максимального пика II;

5. Установлено, что минимально возможный уровень величин ССД реализуется при равенстве пика I и пика II;

6. Для штатной компоновки третьей ступени РН «Днепр» с заданными массогабаритными характеристиками найдены оптимальные абсолютные значения площади дренажного устройства ДУ1, при которых реализуется минимально возможный уровень величин ССД (равенство пиков I и II);

Практические рекомендации. 1. На основании результатов исследований появляется возможность предварительного выбора оптимальных соотношений характеристик ДУ без проведения расчётов на персональном компьютере.

2. Результаты исследований позволяют проводить оперативную оценку изменений величин ССД при изменении параметров ДУ. Это позволяет сократить число пробных лётных испытаний и повысить эксплуатационные возможности РН «Днепр».

3. При оптимальных параметрах ДУ реализуется минимальный уровень ССД, благодаря которому расширяются возможности использования РН «Днепр» в качестве средства выведения КА.

4. Практическое применение результатов исследований показано на примере штатной компоновки КГЧ РН «Днепр». Благодаря организации оптимальной ДУ1, уменьшение максимального значения пика II удалось снизить на 50%. С помощью изменения характеристик фильтра (ДУ12) возможно уменьшение величин двух пиков ещё до 25%.

Направление дальнейших исследований. Представление результатов проведенных исследований в обобщенном виде, в результате которых оптимальные характеристики дренажных устройств будут представлены в виде их отношений (в безразмерном виде).

Библиографические ссылки

1. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

2. Итоговый отчет по результатам подготовки и проведения пуска РН «Днепр-1» с КА «TerraSar-X»: техн. отчет / ГП «КБ «Южное». – Днепропетровск, 2007. – 130 с. – №121/128 НТП.

3. Итоговый отчет по результатам пуска РН «Днепр-Восток»: техн. отчет / ГП «КБ «Южное». – Днепропетровск, 2005. – 156 с. – № 60295 КБ.

4. **Казакевич А. А.** Автоколебания (помпаж) в компрессорах / А. А. Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.

5. **Петров К. П.** Аэродинамика ракет / К. П. Петров. – М.: Машиностроение, 1976. – 136 с.

6. **Семененко П. В.** Исследование скорости спада давления под головным обтекателем ракеты-носителя «Днепр» / П. В. Семененко // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 14, т. 2. – С. 161–168.

Надійшла до редколегії 29.12.2011.