

# ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗВРАЩАЕМОГО АППАРАТА НА ПОСАДОЧНОМ РЕЖИМЕ И ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУЙ НА ГРУНТ

В.В. Жаркова, А.Е. Щеляев, Ю.В. Фишер

ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

А.А. Дядькин, В.П. Сухоруков

РКК «Энергия» им. С.П. Королева, г. Королев, Россия

В настоящий момент актуальной задачей является создание современных конкурентоспособных космических аппаратов. Проектирование и отладка новой техники ставит в один ряд с экспериментальными методами современные программные комплексы, позволяющие значительно уменьшить перечень и объёмы экспериментальных исследований на моделях в аэродинамических трубах и на стендах, а также существенно экономить время и деньги на натурные эксперименты. Однако следует отметить, что любые результаты, полученные путем математического моделирования, корректны только при правильной постановке задачи и требуют верификационных исследований.

Расчеты, представленные в данной работе, проведены с использованием современного программного комплекса численного моделирования аэро- и гидродинамики [FlowVision](#). Объектом исследования является пилотируемый возвращаемый аппарат (ВА), который представляет собой усеченный конус со сферическим лобовым экраном и коническими (с углом раствора  $34^\circ$ ) соплами посадочной твердотопливной двигательной установки (ПТДУ) (рис. 1).

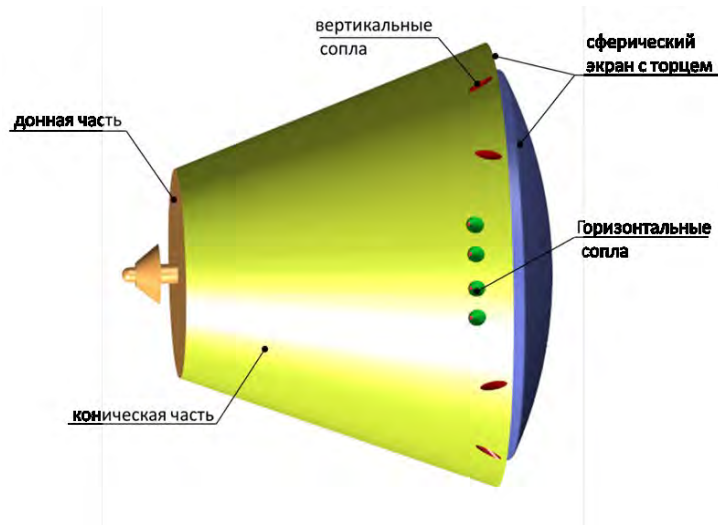


Рис. 1 - Схема возвращаемого аппарата

В решаемой задаче рассматриваются два варианта сопел: сопло натурального изделия для продуктов сгорания твердого топлива ПТДУ ( $d_{кр} = 33\text{мм}$ ) и сопло для воздуха ( $d_{кр} = 36,8\text{ мм}$ ), которые отличаются друг от друга только диаметром критического сечения. Сопло для воздуха, в качестве рабочего тела ПТДУ, предназначено для воспроизведения условий модельных испытаний в аэродинамической трубе У-21 ЦНИИмаш и на стенде ИТПМ СО РАН.

Задачи исследования сводятся к оценке влияния струй ПТДУ на аэродинамические и газодинамические характеристики ВА при изменении высоты аппарата над посадочной поверхностью и при различных углах тангажа, а также определению воздействия струй ПТДУ на посадочную поверхность. Данные исследования представляют практический интерес для разработчиков ВА т.к. струи, взаимодействуя с грунтом, вызывают его эрозию, что может оказаться критичным с точки зрения посадки ВА на опоры приземления, а также загрязнения продуктами эрозии чувствительных элементов системы управления аппарата. Знание газодинамических сил и моментов, действующих на ВА, необходимо для правильного выбора суммарной тяги сопел ПТДУ и анализа динамики движения ВА на посадочном режиме. Исследования влияния типа рабочего тела на величины газодинамических сил и структуру течения около аппарата необходимы для корректного пересчета на натурные условия результатов модельных экспериментальных исследований, в которых в качестве рабочего тела ПТДУ используется холодный воздух.

При моделировании обтекания аппарата рассматриваются три основных расчетных случая:

- обтекание ВА с выключенной двигательной установкой при движении на парашюте (с вертикальной скоростью) и при ветровом сносе (с горизонтальной скоростью);
- обтекание ВА на посадочном режиме при различных высотах и углах тангажа с работающими соплами (только вертикальными и одновременно вертикальными и горизонтальными);
- обтекание ВА на посадочном режиме при различных высотах с работающими вертикальными соплами ПТДУ и различных рабочих телах: продукты сгорания твердого топлива и воздух.

Для расчета аэродинамических характеристик трехмерная геометрическая модель ВА помещается в расчетную область, которая представляет собой параллелепипед и отличается по размерам для каждой конкретной постановки задачи. При моделировании обтекания аппарата с неработающей двигательной установкой данная область имеет размеры в  $40 \times 56 \times 18$  [м] (рис. 2). Модель аппарата помещается в центр расчетной области с координатами  $[0;0;0]$  м.

При работающей двигательной установке расчетная область увеличивается и ее размеры составляют  $76 \times 38 \times 30$  [м].

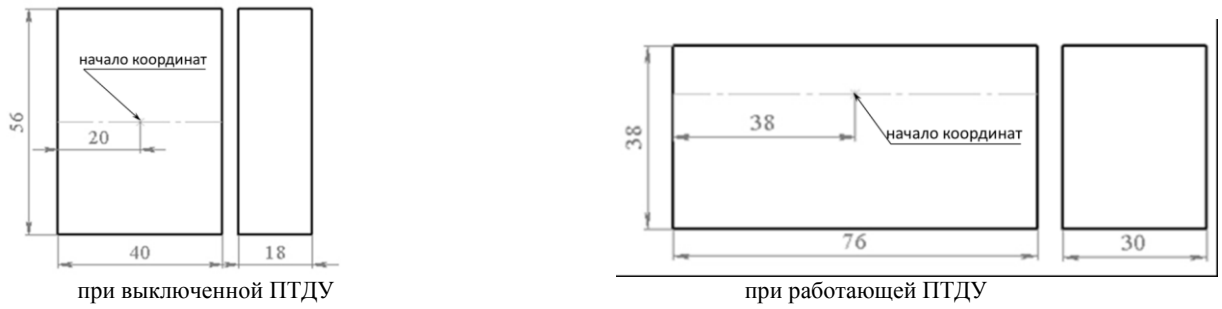


Рис. 2 – Схема расчетной области

На границах расчетной области и помещенных в нее объектов расставляются граничные условия (ГУ), показанные на рис. 3. На ГУ «вход», установленном на поверхности сопел, задаются значения скоростей и температур, определяемые конкретным расчетным режимом работы ПТДУ.

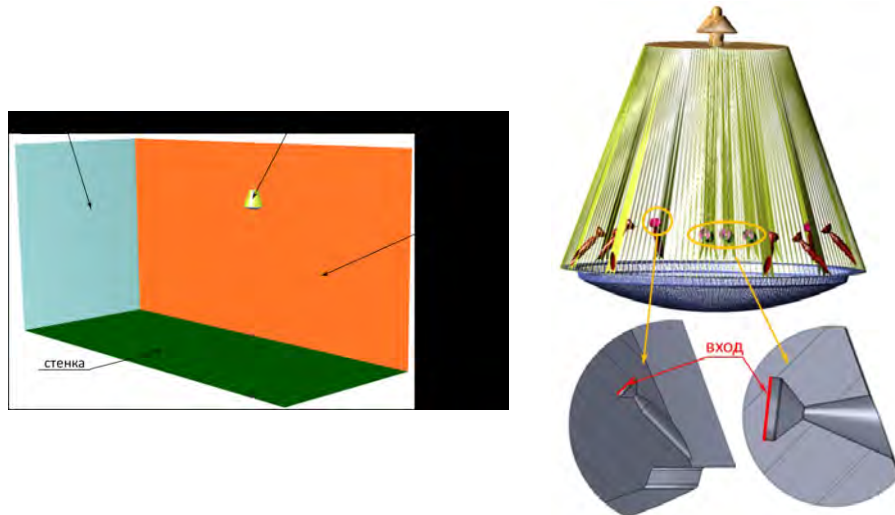


Рис. 3 – Расстановка граничных условий. Все неуказанные ГУ – «свободный выход»

Чтобы разрешить все особенности задачи расчетная сетка адаптируется в зонах, имеющих большие градиенты полей скоростей, давлений и температур. Ввиду большой разницы между характерными размерами аппарата и сопел ДУ при расчете используется адаптация до 4-го уровня.

Вид начальной сетки, а также сечение расчетной сетки на режиме посадки в плоскости вертикальных сопел показаны на рис. 4.

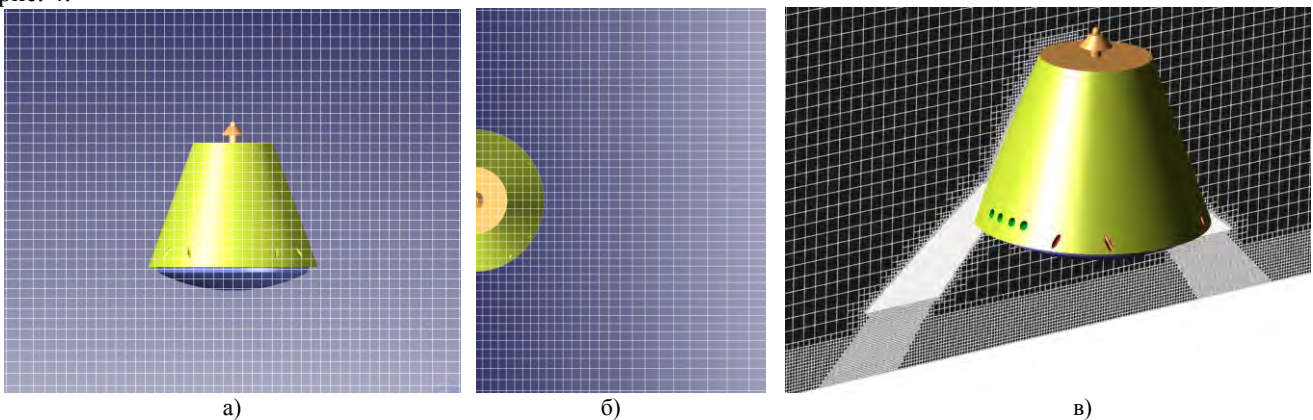


Рис. 4 – Вид расчетной сетки: а, б — начальная сетка в области ВА, в — расчетная сетка на режиме посадки в плоскости вертикальных сопел

Расчет осуществлялся на вычислительных ресурсах компании ТЕСИС, в том числе с частичным привлечением ресурсов вычислительного кластера «Ломоносов» (НИВЦ МГУ) в режиме 128 – 512 ядер на один расчетный вариант. Время, необходимое для сходимости одного варианта задачи, варьируется в диапазоне 168 – 504 часов непрерывного счета.

По результатам проведенных исследований выявлена особенность обтекания ВА с выключенной двигательной установкой - обширная зона отрыва, расположенная за угловой кромкой в зоне стыка сферического экрана с конической частью корпуса аппарата, а также пониженное избыточное давление на конической части ВА. Данное явление наблюдается как при движении на парашюте, так и при ветровом сносе (рис. 5)

Изменение угла атаки (угла тангажа) в диапазоне от  $0^0$  до  $12^0$  при вертикальном и горизонтальном ветре практически не оказывает влияния на величины коэффициентов продольной  $C_x$ , нормальной  $C_y$  силы и момента тангажа  $m_z$ .

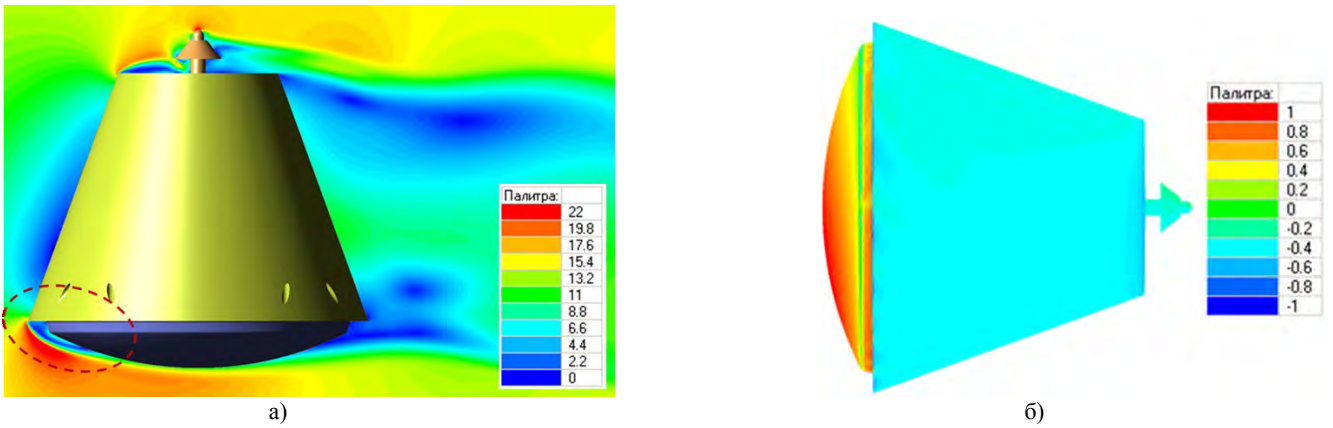


Рис. 5 – а — поле скоростей [м/с] в плоскости симметрии ВА при  $V_{гориз} = 15,0$  [м/с],  $h = 20$  [м],  $\phi\alpha = -120$ ;  
 б — распределение избыточного давления [Па] по боковой поверхности аппарата при  $V_{верт} = 15,0$  [м/с],  $h = 20$  [м]

В случае нулевого угла атаки (угла тангажа) нормальная сила обусловлена асимметрией течения около конической части корпуса ВА. При работе вертикальных сопел взаимодействие струй ПТДУ с посадочной поверхностью создает сложную пространственную картину течения с возвратными токами в пространстве между ВА и посадочной поверхностью; структура течения меняется с изменением высоты  $h$  (рис. 6).

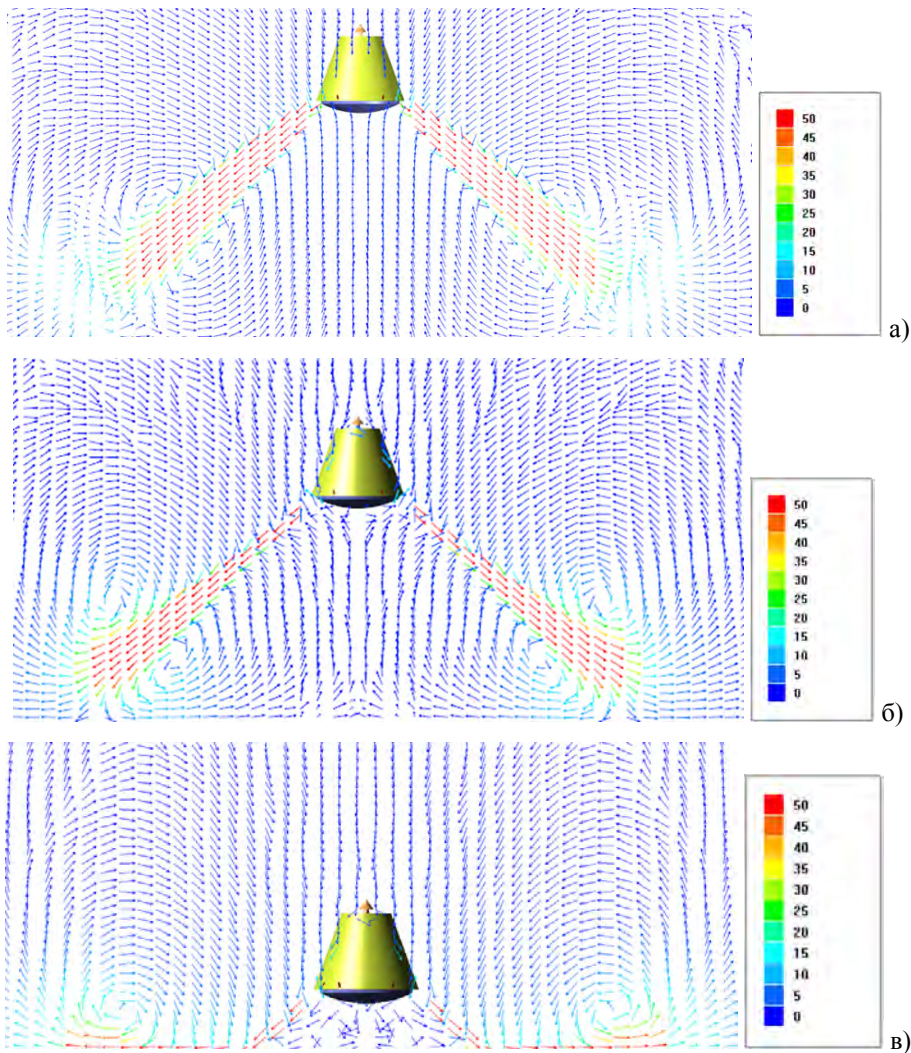


Рис. 6 – Изменение структуры течения с изменением высоты  $h$ : а —  $h = 20$  м,  
 б —  $h = 10$  м, в —  $h = 2$  м

Величина продольной газодинамической силы ВА складывается из составляющих продольных сил, обусловленных конической частью корпуса ( $X_{конич}$ ), сферическим экраном ( $X_{экрана}$ ) и донной частью корпуса ( $X_{дон}$ ). На всех высотах при работе вертикальных сопел вклад донной части аппарата в формирование продольной силы незначителен (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что на больших высотах ( $h \geq 5,0$  м) в условиях слабого влияния посадочной поверхности определяющее влияние на величину и знак продольной силы ВА оказывает коническая часть корпуса ( $X_{конич}$ ); определенный вклад в суммарное значение продольной силы вносит сферический экран ( $X_{экрана}$ ); возникновение этих

составляющих обусловлено эжектирующим воздействием струй на течение около конической поверхности и сферической части экрана - давление в этих зонах понижается.

На малых высотах ( $h \leq 5,0$  м) в результате взаимодействия струй с посадочной поверхностью меняется структура течения - вблизи зоны взаимодействия возникает вихревое течение большой интенсивности (вблизи внешней, по отношению к аппарату, границы струй) – в результате понижается давление на части конической поверхности вблизи ее сопряжения со сферическим экраном и особенно на сферическом экране, что обуславливает отрицательные значения продольной силы ВА.

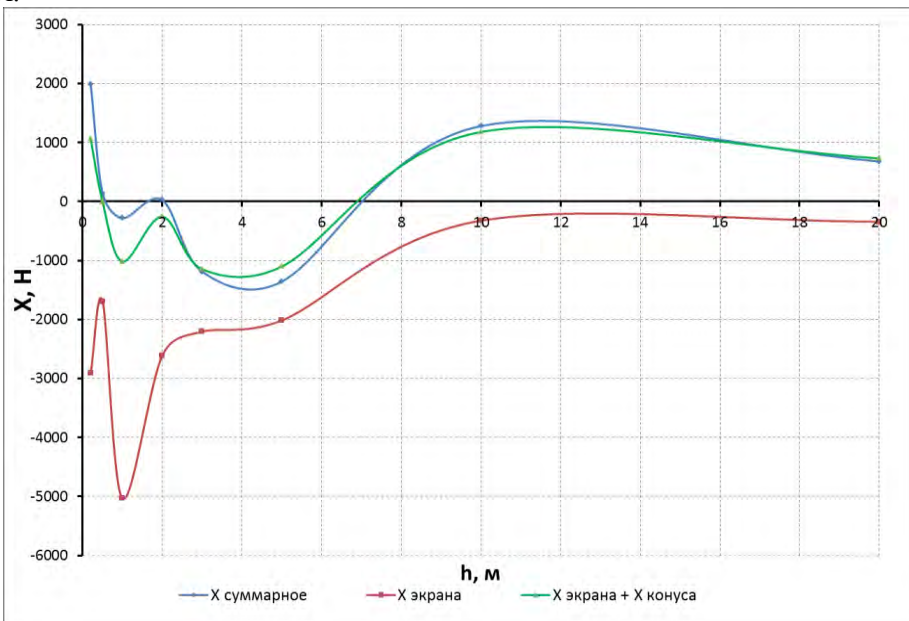


Рис. 7 – Изменение составляющих продольной силы X в зависимости от высоты (горячие струи) при работающих вертикальных соплах. При нулевом угле тангажа  $\varphi_\alpha = 0^0$

При дальнейшем уменьшении высоты ( $h \leq 3,0$  м) зона интенсивного циркуляционного течения оказывает все большее влияние на распределение давления по конической части корпуса и оно начинает превалировать над понижением давления на сферическом экране - в результате суммарная сила X снова меняет свой знак (рис. 7).

При рассмотрении одновременной работы вертикальных и горизонтальных сопел видно, что структура течения и характер кривой, описывающей поведение продольной силы, а также вклады составляющих частей аппарата в продольную силу аналогичны кривым, построенным при работе только вертикальных сопел (рис. 8 и 9, 10). На рис. 8 показаны также значения аэродинамической продольной силы при неработающей ПТДУ и движении с вертикальной скоростью, равной 15 м/с, и при ветровом воздействии со скоростью ветра 15 м/с. Видно, что газодинамические составляющие продольной силы, обусловленные работой ПТДУ, не превышают величины аэродинамической продольной силы и невелики по абсолютной величине. Негативное влияние струй на величину продольной силы (уменьшение эффективной тяги) и, соответственно, на выбор суммарной тяги ПТДУ, не превышает  $\sim 7\%$  от величины номинальной тяги.

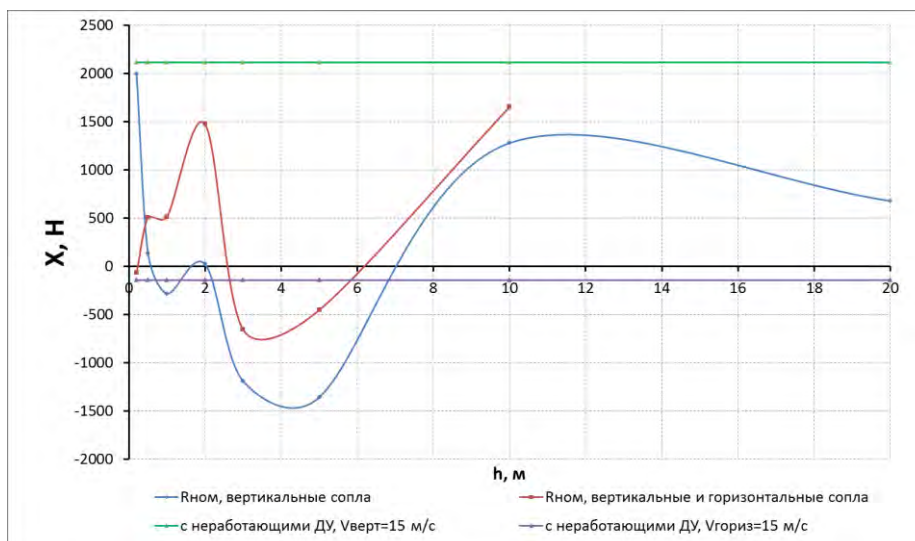


Рис. 8 – Влияние высоты и режима работы сопел ПТДУ на величину продольной силы ВА при одновременно работающих вертикальных и горизонтальных соплах. При  $\varphi_\alpha = 0^0$

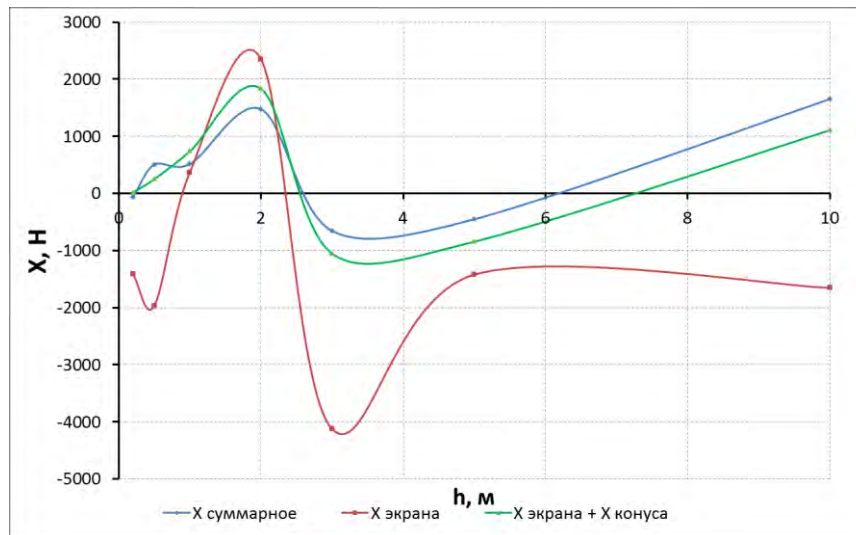


Рис. 9 – Изменение составляющих продольной силы  $X$  в зависимости от высоты (горячие струи) при одновременно работающих вертикальных и горизонтальных соплах. При нулевом угле тангажа  $\varphi = 00$

С изменением угла тангажа величина газодинамической составляющей продольной силы меняется незначительно.

На рис. 10 представлено изменение пространственной структуры течения в пространстве между ВА и посадочной поверхностью при одновременной работе вертикальных и горизонтальных сопел с изменением высоты  $h$ .

Анализ обтекания ВА с холодными воздушными струями вертикальных сопел на разных режимах работы ПТДУ (при минимальной, номинальной и максимальной тяге) показывает, что изменение рабочего тела двигателя существенно меняет характер зависимостей продольной силы ВА от высоты  $h$  (рис. 11 и 7).

Расчеты воздействия струй на посадочную поверхность показывают, что зоны интенсивного воздействия расположены на достаточно большом расстоянии от окружности, соответствующей положению посадочных опор при касании земли, равной  $d=4840$  мм. Уровни максимальных избыточных давлений при высоте  $h=1$  м (в момент касания) достигают  $0,484$  кгс/см<sup>2</sup> при тяге ПТДУ, равной  $22000$  кгс. При этом размеры зон максимального давления малы. Типовое распределение избыточного давления на посадочной поверхности показано на рис. 12.

Результаты расчетных исследований подлежат верификации с использованием результатов испытаний модели с горячими струями на стенде Центра им. М.В. Келдыша и моделей с холодными струями в аэродинамических установках ЦНИИмаш и ИТПМ СО РАН.

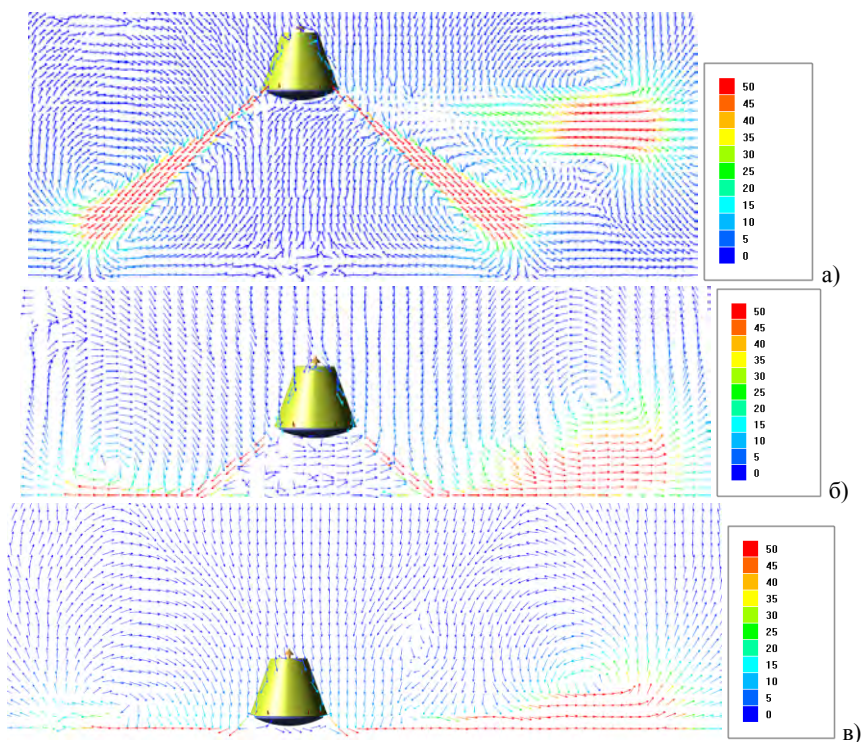


Рис. 10 – Изменение структуры течения при одновременной работе вертикальных и горизонтальных сопел с изменением высоты  $h$ : а —  $h = 10$  м, б —  $h = 3$  м, в —  $h = 0,2$  м

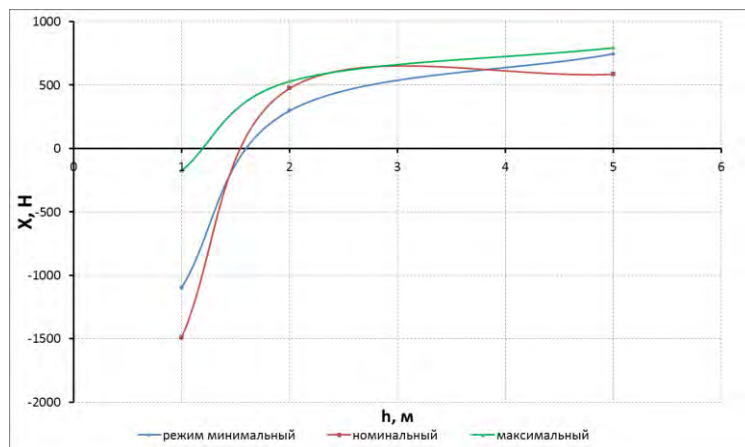


Рис. 11 – Влияние высоты и режима работы сопел ПТДУ с холодными струями на величину продольной силы ВА

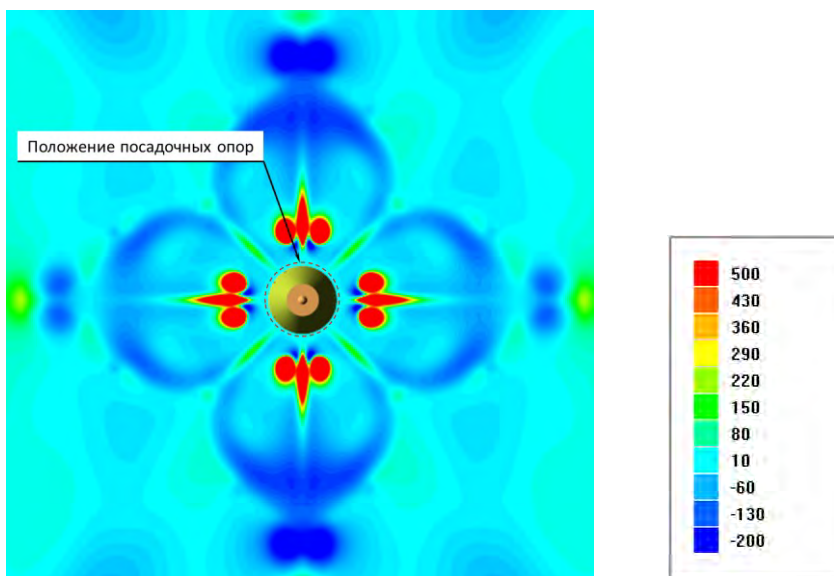


Рис. 12 - Распределение избыточного давления [Па] при обтекании холодными струями на посадочной поверхности для  $n_{a \min}$ ,  $\varphi_{\alpha} = 0^{\circ}$ ,  $h = 2$  [м]

#### Список литературы

1. Дядькин А.А., Михайлова М.К., Щеляев А.Е. Математическое моделирование обтекания возвращаемого аппарата с работающей посадочной двигательной установкой. – Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2010». Москва, 6 – 9 апреля 2010 г. – М.: РУДН, 2010. – 380 с.
2. Дядькин А.А., Михайлова М.К., Сухоруков В.П., Щеляев А.Е. Математическое моделирование обтекания возвращаемого аппарата с работающей посадочной двигательной установкой. – Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2011». Москва, 5 – 8 апреля 2011 г. – Том 1. – М.: РУДН, 2011. – 164 с.