

УДК 629.78.036.54-043.79:533.682

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСАДОЧНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПИЛОТИРУЕМОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУЙ НА ПОСАДОЧНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

© 2016 г. Архипов А.Б.¹, Брюханов Н.А.², Дементьев В.К.², Дядькин А.А.²,
Комаров В.В.¹, Пономарев Н.Б.¹, Пономарев А.А.¹

¹ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (Центр Келдыша)
Ул. Онежская, 8, г. Москва, Российская Федерация, 125438, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Представлены результаты модельных экспериментальных исследований коэффициентов расхода и удельного импульса тяги сопла вертикального торможения посадочной твердотопливной двигательной установки возвращаемого аппарата перспективного пилотируемого транспортного корабля, картины течения в этом сопле и распределения давления по посадочной поверхности в зоне взаимодействия струи с поверхностью.

Экспериментальные исследования выполнены на модели масштаба 1:1,5 сопла вертикального торможения с регулируемым критическим сечением прямоугольной формы с макетом фрагмента кормовой части возвращаемого аппарата и имитатором посадочной поверхности на сопловом дифференциальном стенде ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Полное давление рабочего тела перед соплами изменялось в диапазоне 60...120 кгс/см². Испытания проведены на высокотемпературных продуктах сгорания воздушно-этанолового топлива и на холодном воздухе. Выполнен пересчет полученных экспериментальных данных на натурные условия.

Ключевые слова: возвращаемый аппарат, посадочная твердотопливная двигательная установка, посадочная поверхность, сопло с регулируемым критическим сечением, коэффициент расхода сопла, коэффициент удельного импульса тяги сопла, газодинамическое воздействие сверхзвуковой струи на поверхность.

EXPERIMENTAL STUDIES OF PERFORMANCE OF THE MANNED TRANSPORTATION SPACESHIP'S LANDING PROPULSION SYSTEM AND ITS JETS' GASDYNAMIC EFFECTS ON THE LANDING SURFACE

Arkhipov A.B.¹, Bryukhanov N.A.², Dementyev V.K.², Dyadkin A.A.²,
Komarov V.V.¹, Ponomarev N.B.¹, Ponomarev A.A.¹

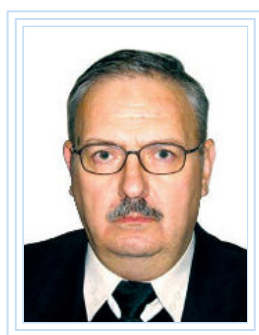
¹SSC FSUE Keldysh Research Centre (Keldysh Centre)
8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russian Federation, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

²S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

The paper presents results of the model experimental studies of the discharge and specific impulse coefficients of the vertical braking nozzle of the future manned transportation spaceship's reentry vehicle's landing solid-rocket motor, flow pattern in this nozzle and pressure distribution on the landing surface's jet impinging area.

The experimental studies have been conducted on a 1:1,5 scaled model of the vertical braking nozzle having a controlled rectangular throat at presence of the reentry vehicle's afterbody fragment model and the landing surface's model in the Keldysh Center's Nozzle Differential Facility. The working body's total pressure have been varied in the 60...120 kgf/cm² range. The tests have been conducted on high-temperature air-ethanol combustion products and on cold air. The obtained experimental data have been scaled to the full-scale conditions.

Key words: reentry vehicle, landing solid-rocket motor, landing surface, nozzle with controlled throat, nozzle discharge coefficient, nozzle specific impulse coefficient, gasdynamic effects of a supersonic jet impinging on a surface.



АРХИПОВ А.Б.



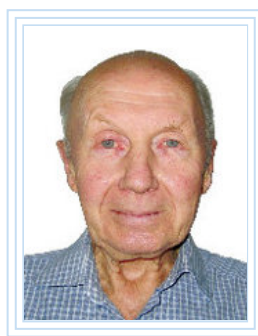
БРЮХАНОВ Н.А.



ДЕМЕНТЬЕВ В.К.



ДЯДЬКИН А.А.



КОМАРОВ В.В.



ПОНОМАРЕВ Н.Б.



ПОНОМАРЕВ А.А.

АРХИПОВ Андрей Борисович — ведущий инженер Центра Келдыша, e-mail: kerc@elnet.msk.ru
ARKHIPOV Andrey Borisovich — Lead engineer at the Keldysh Centre, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

БРЮХАНОВ Николай Альбертович — Генеральный конструктор перспективных космических комплексов и систем РКК «Энергия», e-mail: nikolay.bryukhanov@rsce.ru
BRYUKHANOV Nikolay Albertovich — General Designer of advanced space complexes and systems at RSC Energia, e-mail: nikolay.bryukhanov@rsce.ru

ДЕМЕНТЬЕВ Владимир Константинович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: vladimir.dementiev@rsce.ru
DEMENTYEV Vladimir Konstantinovich — Candidate of Science (Engineering), Lead research scientist at RSC Energia, e-mail: vladimir.dementiev@rsce.ru

ДЯДЬКИН Анатолий Александрович — кандидат технических наук, начальник отдела РКК «Энергия», e-mail: anatoly.a.dyadkin@rsce.ru
DYADKIN Anatoly Alexandrovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Department at RSC Energia, e-mail: anatoly.a.dyadkin@rsce.ru

КОМАРОВ Владимир Всеволодович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра Келдыша, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

KOMAROV Vladimir Vsevolodovich — Candidate of Science (Engineering), Lead research scientist at the Keldysh Centre, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

ПОНОМАРЕВ Николай Борисович — кандидат технических наук, начальник сектора Центра Келдыша, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

PONOMAREV Nikolay Borisovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Subdepartment at the Keldysh Centre, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

ПОНОМАРЕВ Александр Александрович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра Келдыша, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

PONOMAREV Alexander Alexandrovich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Lead research scientist at the Keldysh Centre, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

Введение

При создании пилотируемого транспортного корабля (ПТК) нового поколения большое внимание уделяется вопросам обеспечения мягкой посадки многоразового возвращаемого аппарата (ВА), для чего используется парашютно-реактивная система посадки [1]. Непосредственно у поверхности Земли торможение ВА обеспечивается посадочной твердотопливной двигательной

установкой (ПТДУ), сопла которой расположены на боковой конической поверхности аппарата сегментально-конической формы (рис. 1). В составе многосопловой ПТДУ имеются восемь сопел вертикального торможения (ВТ) и четыре сопла горизонтального торможения (ГТ). Сопла ВТ обеспечивают гашение вертикальной составляющей скорости ВА, а сопла ГТ — горизонтальной составляющей скорости, обусловленной ветровым воздействием при посадке.

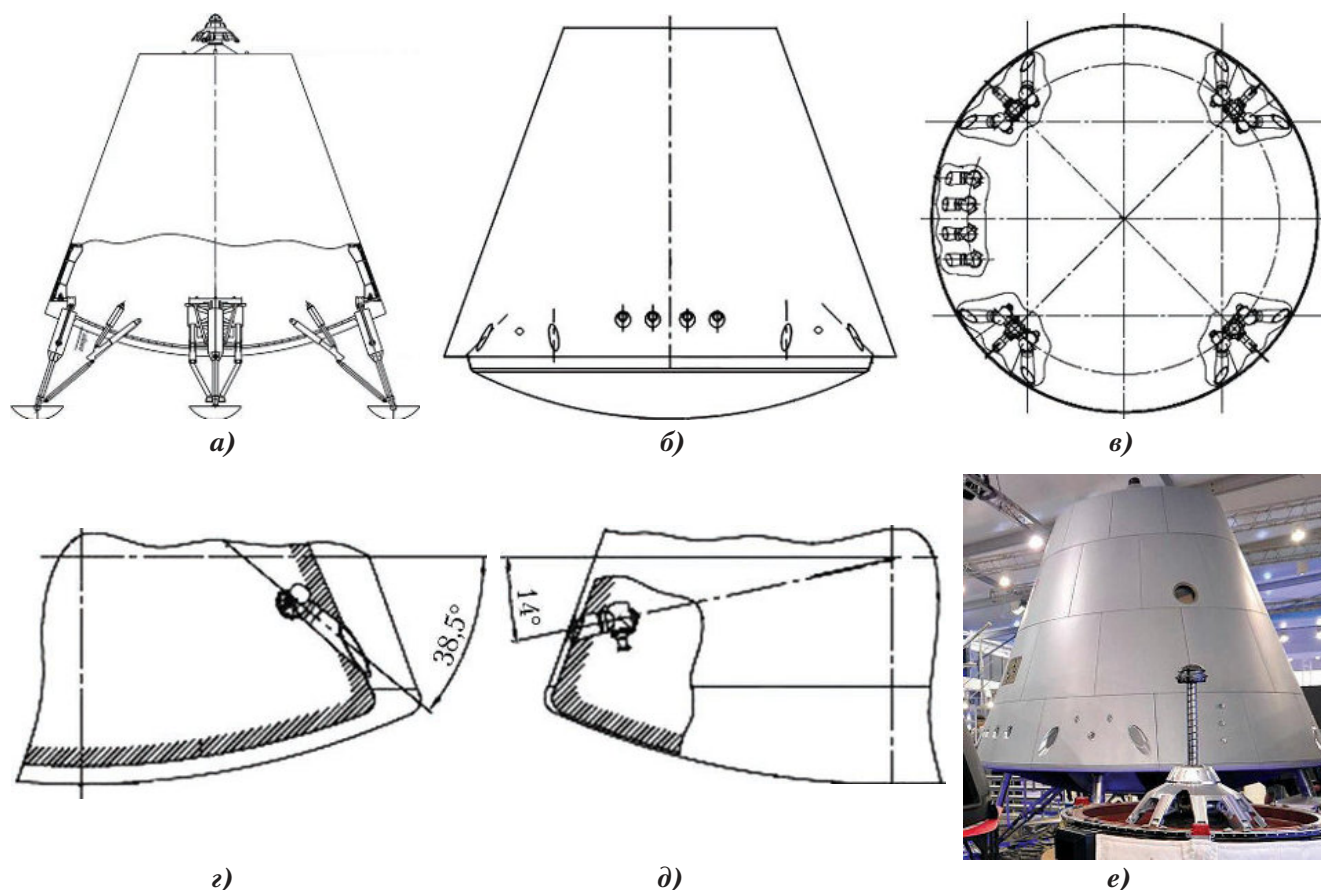


Рис. 1. Схема возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля (ПТК) с посадочной твердотопливной двигательной установкой (ПТДУ): а — ВА с посадочными опорами; б — боковая поверхность ВА с косыми срезами сопел вертикального (ВТ) и горизонтального (ГТ) торможений; в — схема расположения сопел ПТДУ; г — сопло ВТ; д — сопло ГТ; е — макет ВА ПТК на выставке «МАКС-2015»

Сопла ВТ и ГТ имеют цилиндрическую предсопловую полость, перпендикулярную оси сопла и соединяющуюся газовой дорожкой с расположенной выше по потоку другой цилиндрической полостью (рис. 2, а). Продукты сгорания подводятся к цилиндрической полости по общему газоводу от камеры сгорания. Сопла имеют прямоугольное критическое сечение, площадь которого может изменяться с помощью регулятора расхода продуктов сгорания (далее по тексту — поворотной заслонки), и косой срез (рис. 2, а–г). Особенности течения в таких соплах, их расходные и тяговые характеристики, в т. ч. создаваемые ими боковые силы, при разных положениях поворотной заслонки мало изучены. Доступные публикации по данному вопросу отсутствуют.

Особенности течения в таких соплах необходимо учитывать при анализе эффективности ПТДУ и оценке газодинамических сил, действующих на ПТК. Знание воздействий струй сопел ПТДУ на посадочную поверхность необходимо для прогнозирования эрозии и уноса грунта при посадке на неподготовленные площадки, а также — воздействия уносимого грунта на посадочные опоры и днище ВА.

В данной статье представлены результаты модельных экспериментальных исследований, выполненных на модели масштаба 1:1,5 одиночного сопла ВТ ПТДУ в Центре Келдыша на сопловом дифференциальном стенде (СДС) (рис. 3, а, б). В качестве рабочего тела использовались высокотемпературные продукты сгорания воздушно-этанолового топлива с коэффициентом избытка окислителя $\alpha < 1$ (полная температура $T_0 \approx 1\,250\text{ К}$) и холодный воздух высокого давления при таких же, как в натурных условиях, полных давлениях рабочего тела перед соплами $p_k = 60\ldots 120\text{ кгс/см}^2$. На модели воспроизводились также макет фрагмента кормовой части ВА и имитатор посадочной поверхности (рис. 3, в, г). Дифференциальный стенд позволяет получить тяговые характеристики исследуемого сопла на основе измерений разности тяг камер с «эталонным» (с известными характеристиками) и исследуемым соплами (рис. 3, б).

В результате этих исследований определены:

- коэффициенты расхода и удельного импульса тяги сопла ВТ с регулируемым критическим сечением, а также структура течения в расширяющейся части этого сопла при различных перекрытиях критического сечения сопла поворотной заслонкой и различных давлениях рабочего тела в камере сгорания;

- распределения давления от струи сопла ВТ на посадочной поверхности при минимальном расстоянии от днища ВА до посадочной поверхности, соответствующем касанию этой поверхности посадочными опорами.

Параметры моделирования

Для экстраполяции модельных экспериментальных данных на натурные условия исследования на СДС выполнены с использованием в качестве рабочих тел холодного воздуха и высокотемпературных продуктов сгорания воздушно-этанолового топлива со следующими параметрами:

- холодный (с полной температурой $T_0 \approx 290\text{ К}$) воздух высокого давления («холодные» испытания);

- высокотемпературные ($T_0 \approx 1\,250\text{ К}$) продукты сгорания воздушно-этанолового топлива, полученные в стендовой камере сгорания при среднем по камере сгорания массовом соотношении компонентов топлива $K_m = 2,3\ldots 3,2$ (коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0,27\ldots 0,37$) («горячие» испытания).

Эти модельные рабочие тела при таких же, как в ПТДУ, полных давлениях рабочего тела перед соплом p_k отличаются от натурального рабочего тела (продуктов сгорания ПТДУ) не только полной температурой (в ПТДУ $T_0 \approx 2\,900\text{ К}$), но также и другими параметрами, представленными в таблице (для воздушно-этанолового топлива представлены параметры при $K_m = 3,0$). Но при этом степень нерасчетности модельных струй такая же, как у натурных струй.

Таблица

Параметры течений в соплах в натурных и модельных условиях

Параметры рабочего тела	Продукты сгорания ПТДУ		Продукты сгорания топлива воздух+этанол при $K_m = 3,0$		Воздух высокого давления	
$p_k, \text{ кгс/см}^2$	120	80	120	80	120	80
$T_0, \text{ К}$	2 900	2 900	1 250	1 250	290	290
n	1,265		1,3		1,4	
$L_{cl}/L_c, \%$	1,8	2,9	0,7	1,2	0,1	0,1
$L_{cr}/L_c, \%$	5,5	8,6	2,2	3,5	0,3	0,4

В таблице использованы следующие обозначения: n — средний по длине сопла показатель изэнтропии рабочего тела (определяет число Маха и отрыв потока от стенок сопла [2]); L_{cl}/L_c — относительная осевая длина L_{cl} , на которой пограничный слой в сопле ламинарный (L_c — осевая длина от начала поворотной заслонки до середины косого среза сопла).

Величина $L_{\text{сл}}$ определена по критерию ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое в сопле [2], основанному на числе Рейнольдса $Re_L = \rho_0 V_{\text{max}} L_c / \mu_w$, где ρ_0 — плотность заторможенного потока; $V_{\text{max}} = a_0 \sqrt{2/(n-1)}$ — скорость истечения рабочего тела в вакуум (a_0 — скорость звука в камере сгорания); μ_w — вязкость рабочего тела при температуре стенки сопла. При $Re_L \leq 10^7$ пограничный слой в сопле ламинарный, а при $Re_L \geq 3 \cdot 10^7$ — турбулентный; $L_{\text{ст}}/L_c$ — относительная осевая длина $L_{\text{ст}}$, на которой пограничный слой в сопле становится турбулентным.

По данным таблицы видно, что на большей части модели сопла ВТ пограничный слой, как и в натуральных условиях, турбулентный.

В модели сопла ВТ масштаба 1:1,5 воспроизведены (рис. 2):

- форма проточной части предсоплового объема, состоящая из вертикального цилиндра, к которому подводится рабочее тело, цилиндра, в котором установлена поворотная заслонка, регулирующая площадь прямоугольного критического сечения сопла, и патрубка, соединяющего эти цилиндры между собой;
- форма горла сопла прямоугольного сечения, постоянного по длине до начала конической расширяющейся части сопла;
- форма конической расширяющейся части сопла, образованная несколькими коническими поверхностями, абсциссы граничных сечений которых геометрически подобны натурным, а ординаты этих сечений скорректированы относительно натурных для получения такого же, как при показателе изоэнтропии продуктов сгорания ПТДУ $n = 1,265$, числа Маха потока в сопле при показателе изоэнтропии модельного рабочего тела $n = 1,3$;
- косое выходное сечение, расположенное на геометрически подобном натурному расстоянии от горла сопла и под таким же, как у натурального сопла, углом наклона относительно оси сопла.

При испытаниях модели сопла ВТ на СДС определялись:

- коэффициент расхода модели сопла ВТ (с погрешностью $\leq \pm 0,18\%$) по измеренному давлению в ресивере перед делительными соплами (рис. 3, б) в «холодных» испытаниях;
- коэффициент удельного импульса тяги камеры с моделью сопла ВТ с косым срезом (с погрешностью $\leq \pm 0,1\%$) (рис. 2, а, б, г) по измеренной разности тяг между этой моделью и «эталонным» (с известными характеристиками) соплом (рис. 3, б);
- боковая сила, действующая на сопло с косым срезом перпендикулярно оси сопла, с погрешностью ± 2 кгс ($\pm 2\%$ от верхней

границы измерения используемого тензоизмерительного стакана 100 кгс — рис. 3, б);

- давление в камере сгорания с погрешностью $\pm 0,4$ кгс/см²;
- статические давления (с погрешностью $\pm 0,25\%$ от верхнего предела измерения) в 71 точке на внутренней поверхности расширяющейся части сопла вдоль четырех образующих, расположенных в окружном направлении через 90°;
- статические давления (с погрешностью $\pm 0,25\%$ от верхнего предела измерения) в 18 точках на имитаторе посадочной поверхности в зоне воздействия струи сопла на этот имитатор.

Расходные и тяговые характеристики сопла вертикального торможения

Зависимость коэффициента расхода μ сопла ВТ, определенного по результатам испытаний модели масштаба 1:1,5 и перенесенного без изменений на натурные условия, от величины перекрытия заслонкой критического сечения сопла $(1 - F_*/F_{*\text{max}})$, показана на рис. 4, а, где $\mu = m_p/m_{\text{ид}}$; m_p — реальный расход через сопло; $m_{\text{ид}}$ — идеальный расход через сопло в одномерной постановке без учета трения; F_* — текущая площадь критического сечения; $F_{*\text{max}}$ — площадь полностью открытого критического сечения.

Перенос коэффициента расхода без изменений на натурные условия основывается на том, что, согласно работе [2], определяющее влияние на μ оказывает форма сужающейся части сопла, которая у данной модели геометрически подобна натурной, а меньшее влияние — показатель изоэнтропии рабочего тела и толщина вытеснения пограничного слоя. У сопла ВТ его сужающаяся часть подходит к критическому сечению сопла под большим углом и отделена от предсоплового объема уступом, что препятствует развитию пограничного слоя до критического сечения сопла. Кроме того, в сопло поступает сильно возмущенный поток, причем, чем больше открыто критическое сечение сопла, тем сильнее возмущен этот поток. Поэтому коэффициент расхода μ этого сопла определяется только геометрией сужающейся части сопла и предсоплового объема.

Очевидно (и это подтверждают расчеты по программе *Flow Simulation* [3]), что увеличение μ при увеличении $(1 - F_*/F_{*\text{max}})$ связано с уменьшением скорости рабочего тела в предсопловых объемах и, соответственно, уменьшением в них потерь полного давления рабочего тела (рис. 5, а), а также с увеличением равномерности потока в критическом сечении сопла (рис. 5, б).

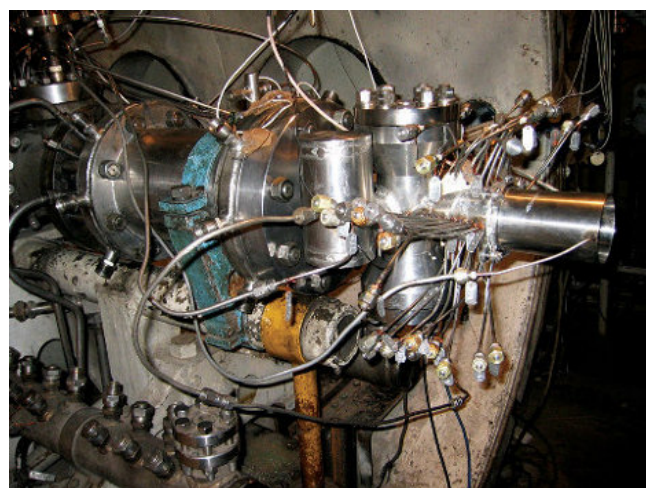
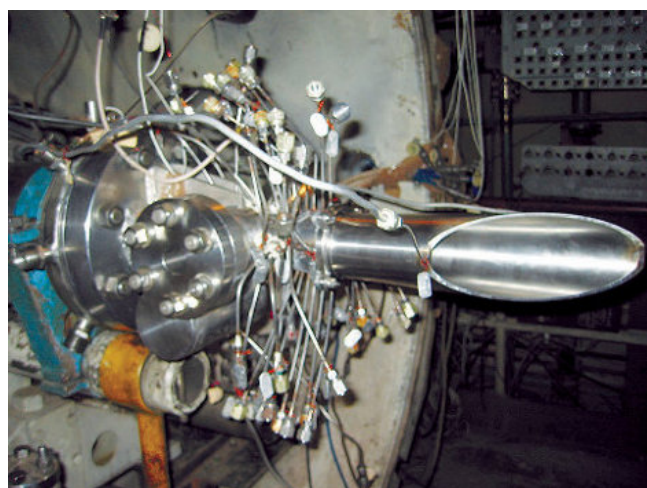
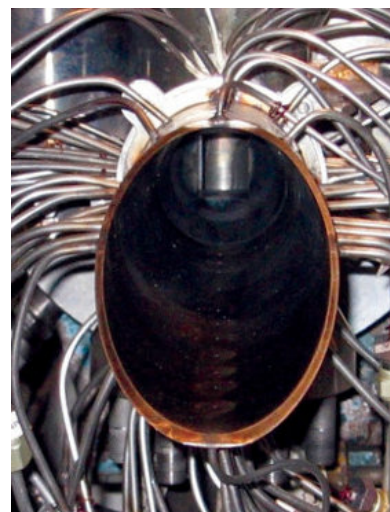
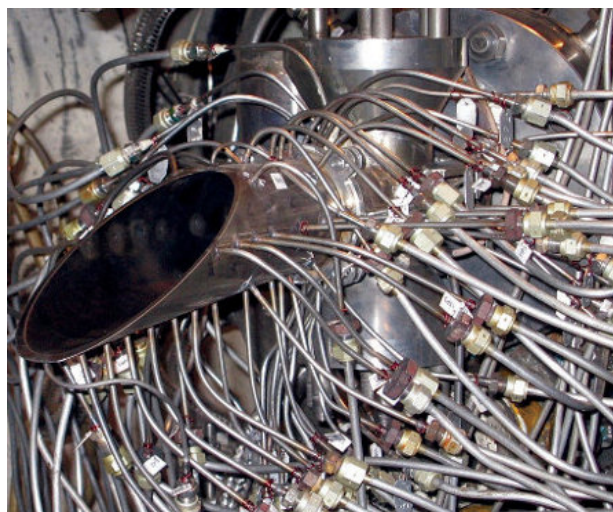
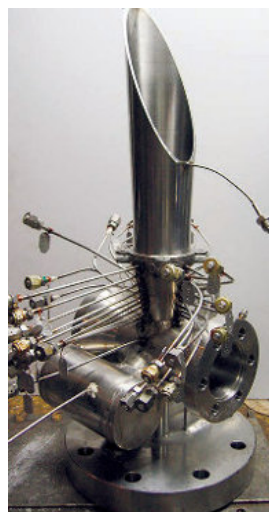
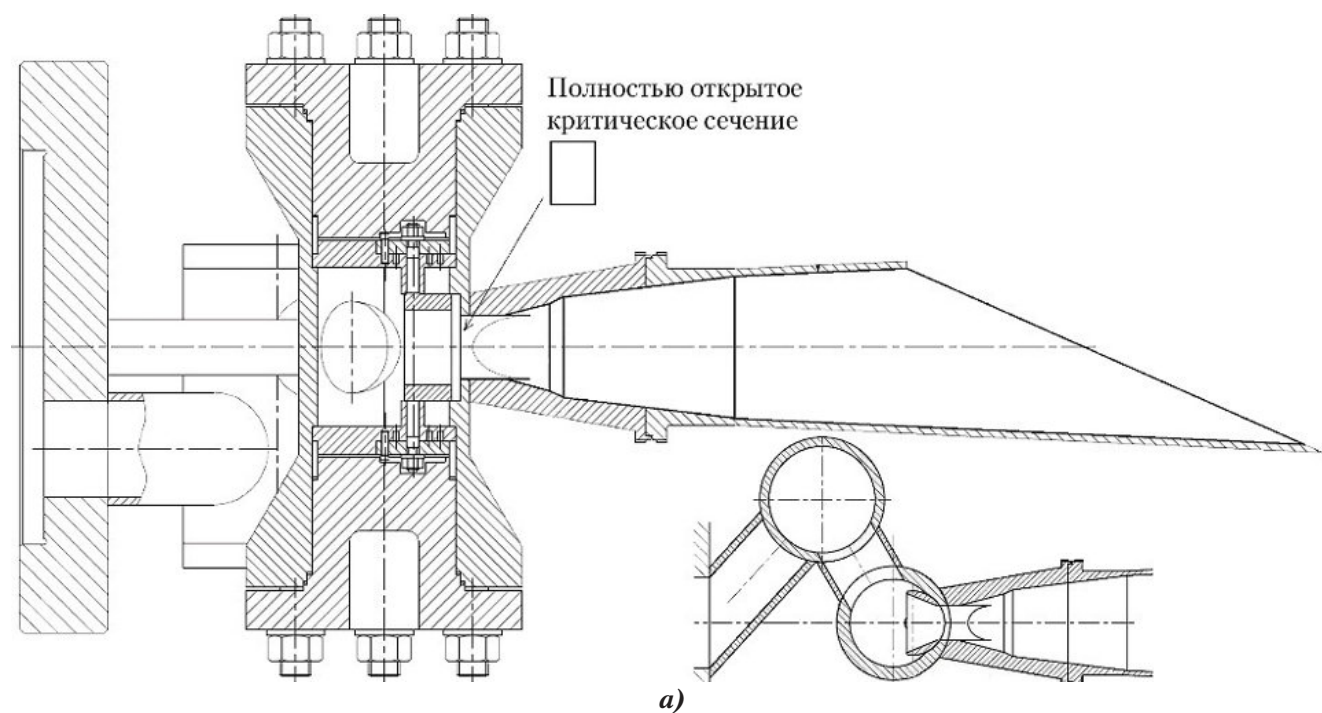
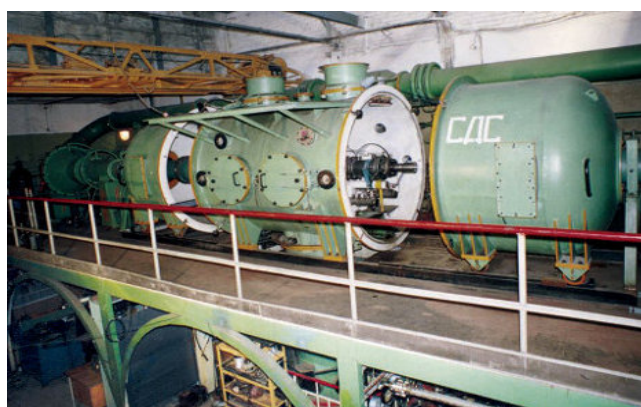
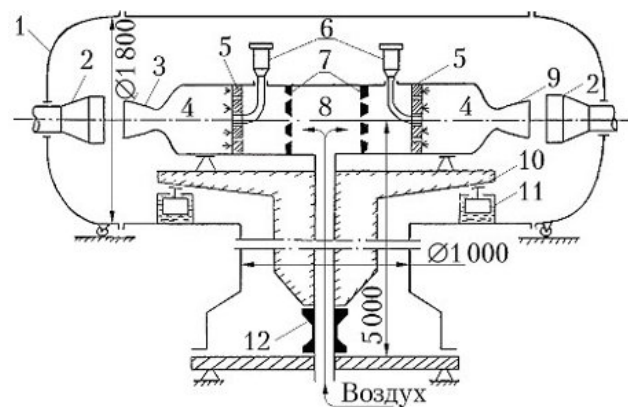


Рис. 2. Модель масштаба 1:1,5 сопла вертикального торможения: а — чертеж модели; б — модель перед установкой на сопловой дифференциальный стенд (СДС); в — модель с трубками измерения статических давлений на внутренней поверхности расширяющейся части сопла; г — модель с косым срезом в испытаниях на СДС с измерением разности тяг; д — модель с прямым срезом в испытаниях на СДС с измерением разности тяг



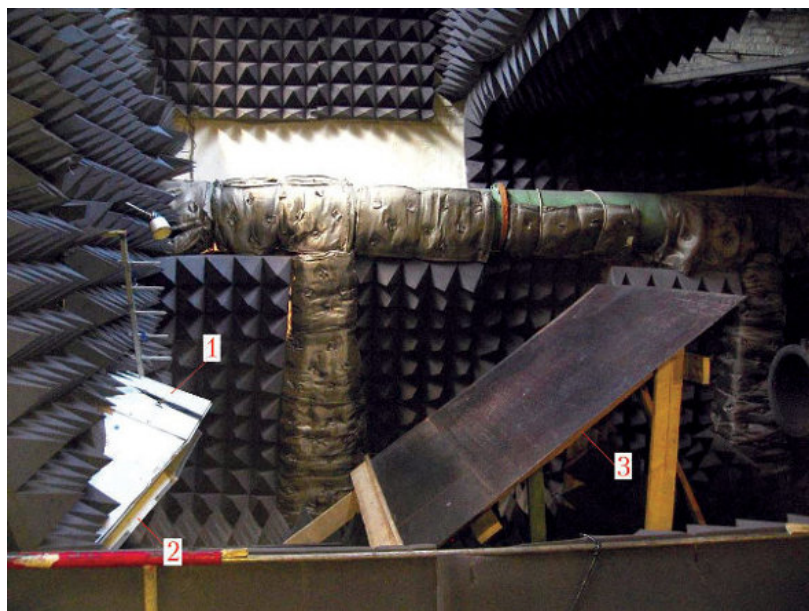
а)



б)

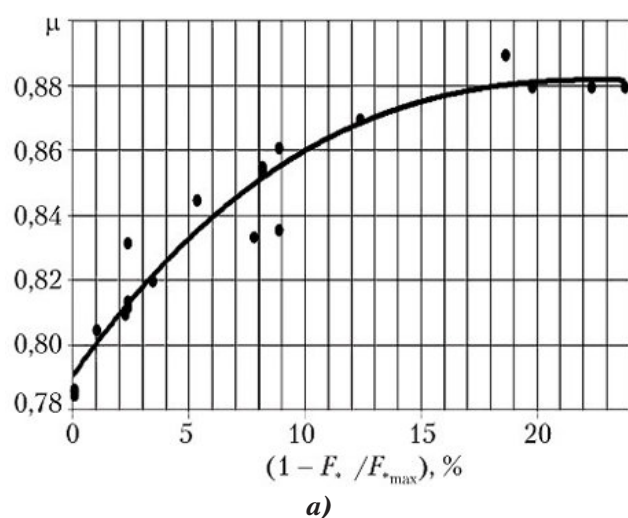


в)

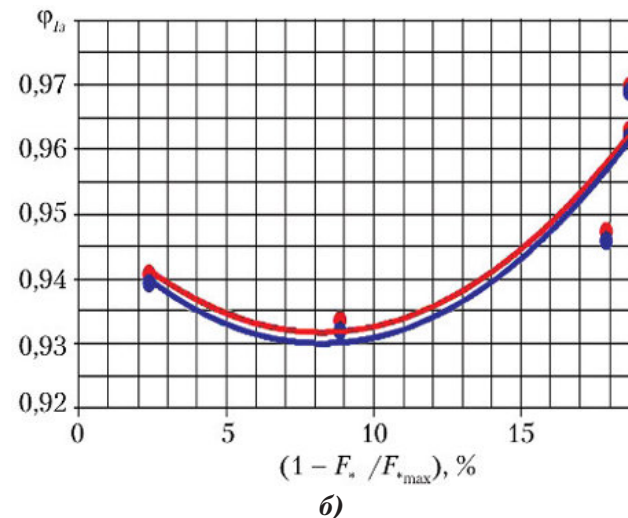


г)

Рис. 3. Сопловой дифференциальный стенд (СДС): а — общий вид СДС без шумопоглощающих покрытий; б — схема СДС: 1 — барокамера; 2 — выхлопные диффузоры; 3 — «эталонное» сопло; 4 — камеры сгорания; 5 — смешивательные головки; 6 — запальники; 7 — блоки делительных сопел; 8 — ресивер; 9 — исследуемое сопло; 10 — подвижная рама; 11 — демпферы; 12 — тензоизмерительный стакан; в — модель сопла вертикального торможения (1) с макетом фрагмента кормовой части ВА (2) на СДС с шумопоглощающими покрытиями; г — модель сопла вертикального торможения (1) с макетом фрагмента кормовой части ВА (2) и имитатором посадочной поверхности (3) на СДС с шумопоглощающими покрытиями



а)



б)

Рис. 4. Прогнозируемые по результатам модельных испытаний зависимости от перекрытия $(1 - F_*/F_{*max})$ критического сечения натурного сопла вертикального торможения: а — коэффициента расхода μ ; б — коэффициента земного удельного импульса тяги $\phi_{из}$; ● — $p_k = 120 \text{ кгс/см}^2$; ● — $p_k = 80 \text{ кгс/см}^2$

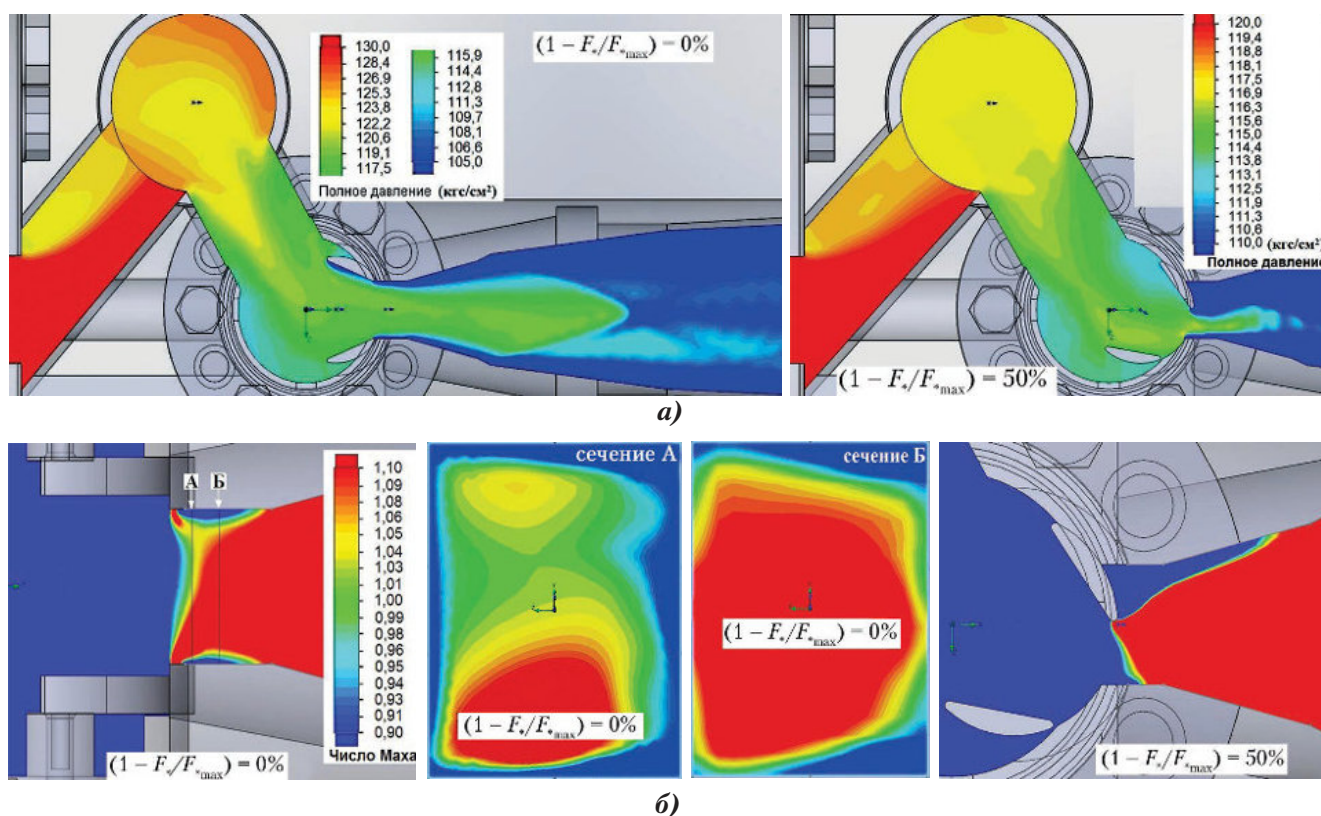


Рис. 5. Расчеты по программе Flow Simulation [3] течения воздуха высокого давления в модели масштаба 1:1,5 сопла ВТ с $(1 - F_*/F_{*max}) = 0; 50\%$: а — полное давление; б — число Маха трансзвукового течения в горле сопла при $(1 - F_*/F_{*max}) = 0\%$ в продольном и поперечных сечениях А и Б, а также при $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$ в продольном сечении

Прогнозируемые по результатам модельных испытаний зависимости от величины $(1 - F_*/F_{*max})$ коэффициента земного удельного импульса тяги ($I_{уз}$) натурного сопла ВТ $\phi_{Iз} = I_{уз}/I_{уз ид}$, где $I_{уз ид}$ — идеальный (термодинамический) пустотный удельный импульс тяги с учетом μ при давлениях в камере сгорания $p_k = 120 \text{ кгс/см}^2$ и $p_k = 80 \text{ кгс/см}^2$, показаны на рис. 4, б. Видно, что они практически одинаковы.

Вследствие того, что сопло ВТ имеет косой срез, на его более длинную стенку со стороны омывающих ее продуктов сгорания действует боковая (перпендикулярная оси сопла) сила $R_{бок пс}$, а с внешней стороны — атмосферное давление p_n . В результате боковая сила $R_{бок з}$, действующая на сопло с косым срезом при атмосферном внешнем давлении p_n , определяется как

$$R_{бок з} = R_{бок пс} - p_n F_{бок},$$

где $F_{бок}$ — площадь проекции косого среза сопла ВТ на плоскость, проходящую через ось симметрии сопла и пересекающую плоскость косого среза по линии, перпендикулярной этой оси (см. рис. 2, а). Прогнозируемые по результатам модельных испытаний зависимости этой боковой силы от перекрытия критического сечения сопла $(1 - F_*/F_{*max})$ показаны на рис. 6, а. Испытания модели сопла

ВТ с прямым срезом (см. рис. 2, д) показали, что асимметрии предсоплового объема и течения в начале расширяющейся части сопла при частично перекрытом критическом сечении не создают боковой силы — ее измеренная в испытаниях этой модели сопла ВТ величина лежит в пределах погрешности измерения. При $p_k = 80 \text{ кгс/см}^2$ вследствие перерасширения потока около стенки концевой части сопла и отсутствия отрыва этого потока от стенок сопла величина $R_{бок з}$ становится отрицательной, так как $p_n F_{бок} > R_{бок пс}$. Соответственно, проекция боковой силы на продольную ось ВА $R_{бок з}$ уменьшает вертикальную составляющую силы тяги ПТДУ при $p_k = 120 \text{ кгс/см}^2$ на 6,5% при $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$ и на 3% при $(1 - F_*/F_{*max}) = 20\%$, а при $p_k = 80 \text{ кгс/см}^2$ — на 1% при $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$, но увеличивает ее на 3% при $(1 - F_*/F_{*max}) = 20\%$ (рис. 6, б).

Картина течения в модели сопла вертикального торможения

Экспериментальные распределения относительного статического давления p_w/p_k вдоль четырех образующих стенок модели сопла ВТ показаны на рис. 7, а: при значениях $(1 - F_*/F_{*max}) = 0; p_k = 73,5 \text{ кгс/см}^2$ (линии 1..4) и при $(1 - F_*/F_{*max}) = 20\%; p_k = 120 \text{ кгс/см}^2$

(линии 5...8). Вертикальным пунктиром отмечено положение начала косого среза сопла. Распределению давления вдоль образующей, выходящей на самую дальнюю кромку косого среза сопла, соответствуют линии 4, 8, а вдоль образующей, выходящей на начало косого среза сопла — линии 2, 6. Линии 1, 5 и 3, 7 относятся к образующим, выходящим на среднюю часть косого среза.

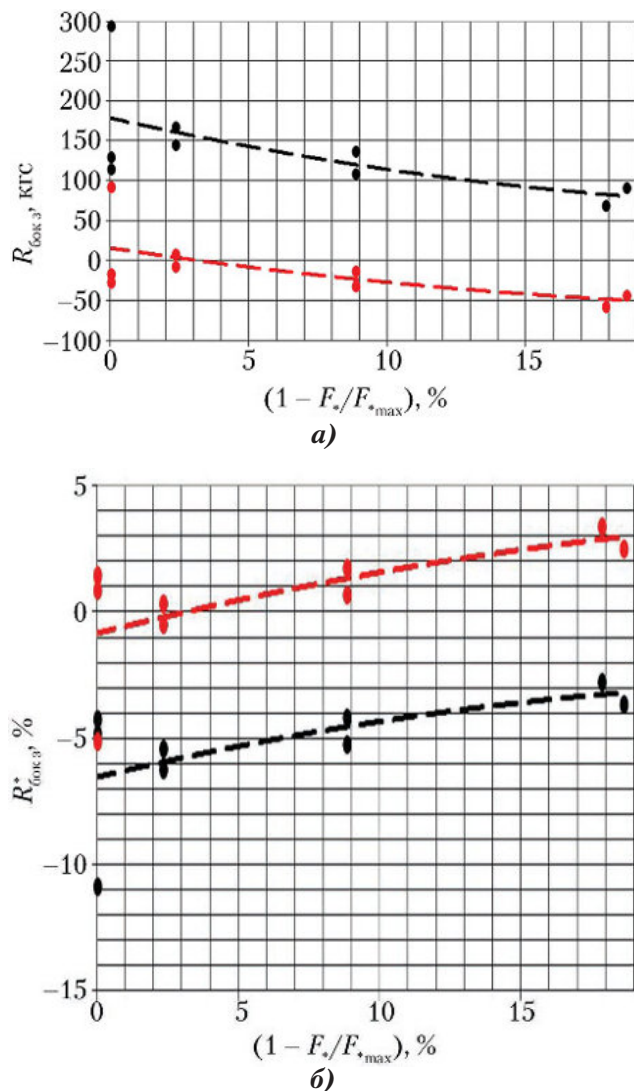


Рис. 6. Прогноз сил, действующих на сопло вертикального торможения: а — боковой силы $R_{бок.з.}$; б — проекции $R_{бок.з.*}$ на продольную ось ВА в процентах от осевой составляющей силы тяги ПТДУ; ● — $p_k = 120 \text{ кгс/см}^2$; ● — $p_k = 80 \text{ кгс/см}^2$

Видно, что течение в сопле безотрывное, имеются подъемы давления в местах изменения угла наклона конического контура и в местах прихода на стенки сопла скачков уплотнения, образовавшихся выше по потоку.

На рис. 7, б, в показаны поля числа Маха потока воздуха в двух взаимно перпендикулярных продольных плоскостях в модельном сопле, рассчитанные по программе *Flow Simulation* [3]. Видна сложная структура скачков уплотнения в сопле.

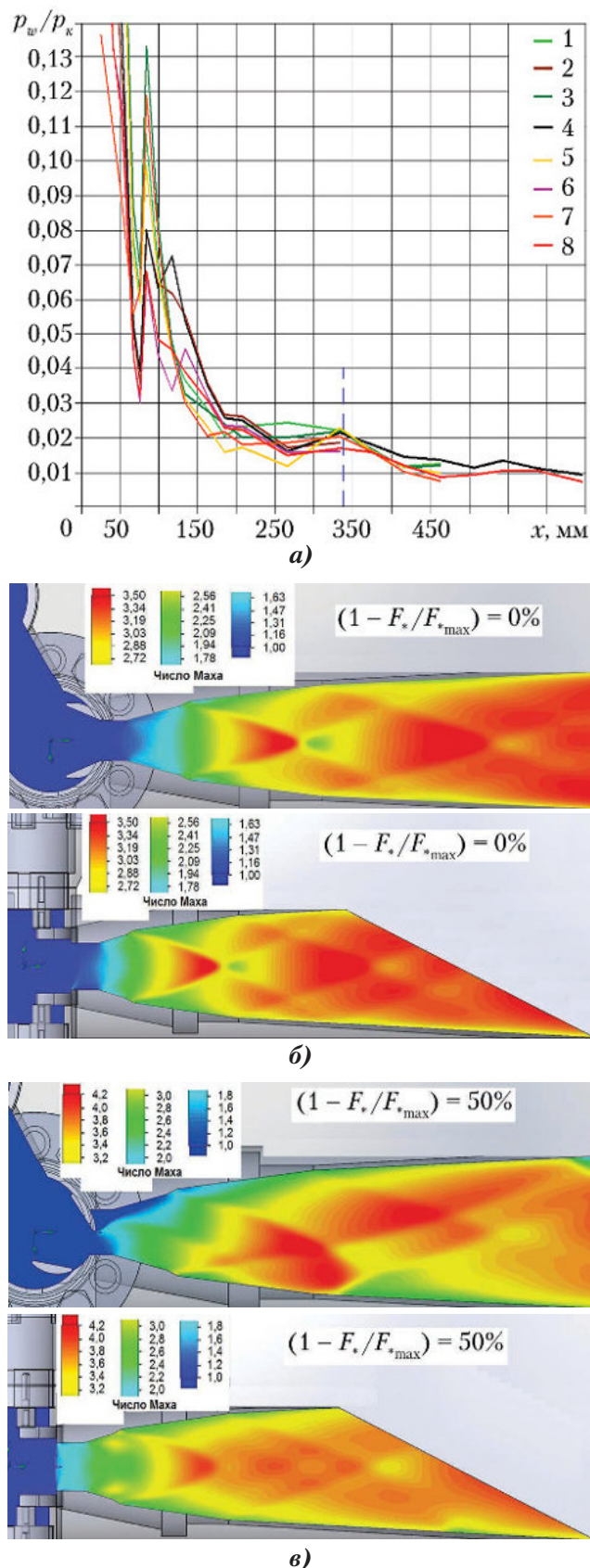


Рис. 7. Картина течения в сопле вертикального торможения: а — экспериментальные распределения относительного статического давления p_w/p_k вдоль четырех образующих стенок сопла (линии 1–4 — $(1 - F^*/F_{*max}) = 0$; $p_k = 73,5 \text{ кгс/см}^2$; линии 5–8 — $(1 - F^*/F_{*max}) = 20\%$; $p_k = 120 \text{ кгс/см}^2$); б, в — рассчитанные по программе *Flow Simulation* картины течения воздуха при различных перекрытиях критического сечения сопла

Воздействие струи сопла вертикального торможения на посадочную поверхность

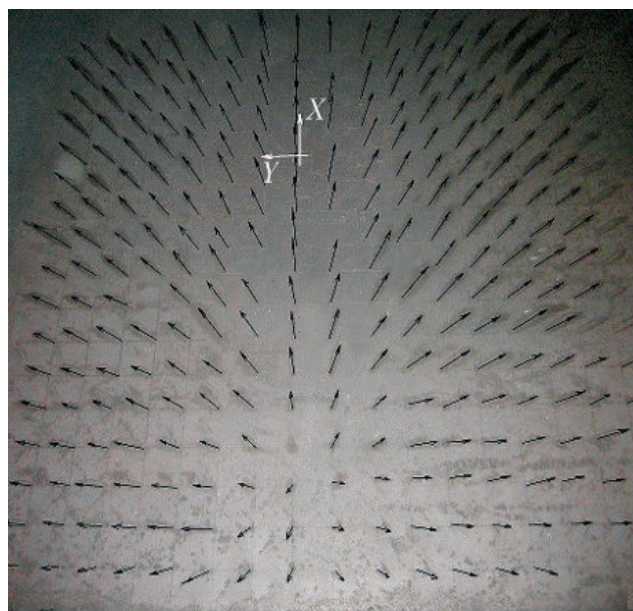
Прогнозируемые по результатам модельных испытаний воздействия струи сопла вертикального торможения на посадочную поверхность при минимальном расстоянии возвращаемого аппарата от этой поверхности, представлены на рис. 8, 9. На рис. 8 показана визуализация структуры растекания «горячей» ($T_0 = 1250\text{ K}$) струи модели масштаба 1:1,5 сопла вертикального торможения по имитатору посадочной поверхности при различных значениях p_k и $(1 - F_*/F_{*max})$. Показанный на рис. 8, а, б центр системы координат является точкой пересечения оси сопла с имитатором посадочной поверхности.

Видно, что центр зоны растекания струи по имитатору посадочной поверхности смещен относительно точки пересечения оси сопла с этим имитатором, что в продольном направлении подтверждается данными, приведенными на рис. 9, а, б, г. На рис. 9, а, б показаны пересчитанные на натурные условия работы посадочной твердотопливной двигательной установки распределения абсолютного и относительного статического давления вдоль линии растекания струи по посадочной поверхности. На рис. 9, в, г приведены зависимости от p_k максимального давления $p_{w\max}$ и координаты $x_{pw\max}$ центра зоны максимального давления струи на посадочной поверхности.

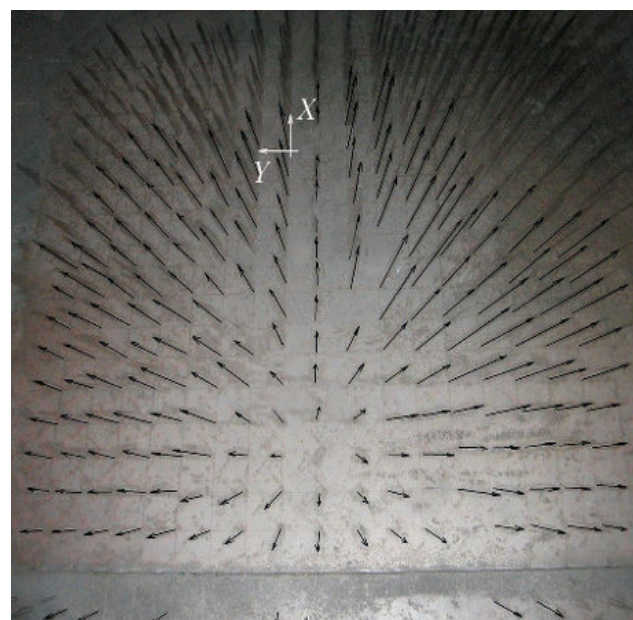
Из рис. 9, г видно, что максимумы давления при $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$, а также при $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$ и $p_k \leq 100\text{ кг/см}^2$ смещены от точек пересечения оси сопла с посадочной поверхностью в сторону продольной оси ВА (в показанной на рис. 8 системе координат в сторону $x_{pw\max} < 0$), что обусловлено поджатием струи на участке косога среза сопла атмосферным давлением к более длинной стороне сопла при перерасширении продуктов сгорания в сопле. Из рис. 9, в видно, что с увеличением угла встречи струи с посадочной поверхностью от 0 до 12° значения $p_{w\max}$ растут.

Из представленных на рис. 9, а, б распределений абсолютного (p_w) и относительного (p_w/p_k) статического давления вдоль продольной линии растекания струи по посадочной поверхности при значениях $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$ и 50% и $p_k = 67...100\text{ кгс/см}^2$ видно, что максимумы p_w/p_k увеличиваются с уменьшением p_k , что явно указывает на неавтономность величины p_w

вследствие перемешивания струи с атмосферным воздухом.



а)



б)

Рис. 8. Визуализация структуры растекания «горячей» ($T_0 = 1250\text{ K}$) струи модельного сопла масштаба 1:1,5 по имитатору посадочной поверхности при: а — $p_k = 87\text{ кгс/см}^2$, $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$; б — $p_k = 100\text{ кгс/см}^2$, $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$

На рис. 9, д, е представлены прогнозируемые зависимости от p_k продольной ($\Delta x_{0,5pw\max}$) и поперечной ($\Delta y_{0,5pw\max}$) длин участка посадочной поверхности с $p_w \geq 0,5p_{w\max}$ под действием струи сопла посадочной твердотопливной двигательной установки. Видно, что $\Delta y_{0,5pw\max} \approx 0,5\Delta x_{0,5pw\max}$, и при уменьшении p_k от 120 до 80 кгс/см^2 эти размеры увеличиваются в ~ 2 раза, по-видимому, вследствие более интенсивного перемешивания газа в струе с окружающей атмосферой.

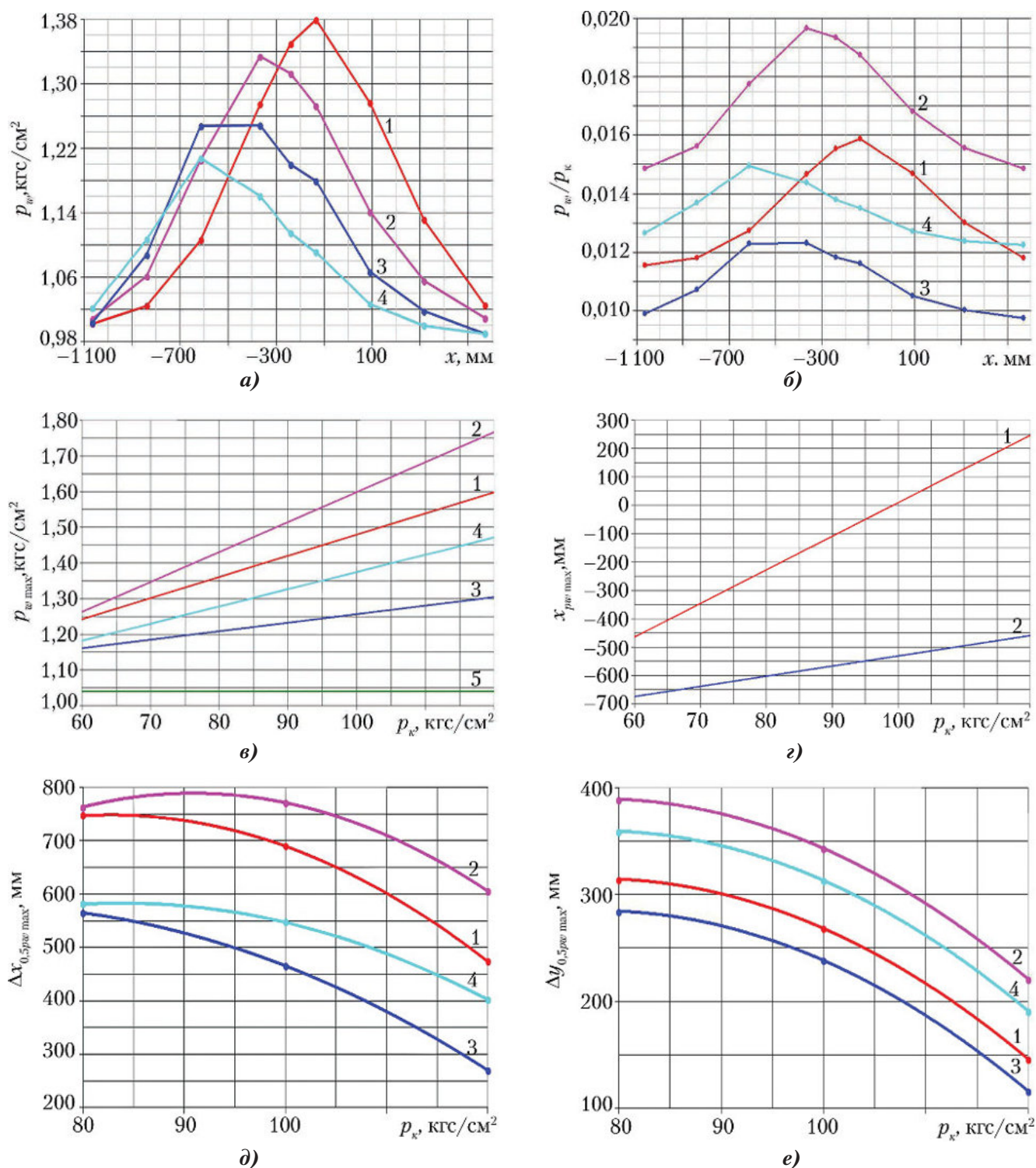


Рис. 9. Прогнозируемые по результатам модельных испытаний распределения статического давления вдоль продольной линии растекания струи по посадочной поверхности: а – $p_w(x)$; б – $p_w(x)/p_k$; 1, 2 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$; 1 – $p_k = 85$ кгс/см²; 2 – $p_k = 67$ кгс/см²; 3, 4 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$; 3 – $p_k = 99$ кгс/см²; 4 – $p_k = 79$ кгс/см²; и их параметры: в – $p_w \max(p_k)$; 1, 3, 5 – $\theta = 0$; 2, 4 – $\theta = 12^\circ$; 1, 2 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$; 3, 4, 5 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$; г – $x_{pw \max}(p_k)$ при $\theta = 0$: 1 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$; 2 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$; д – $\Delta x_{0,5pw \max}(p_k)$; е – $\Delta y_{0,5pw \max}(p_k)$: 1, 2 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 0$; 3, 4 – $(1 - F_*/F_{*max}) = 50\%$; 1, 3 – $\theta = 0$; 2, 4 – $\theta = 12^\circ$ (θ – угол наклона продольной оси ВА к плоскости посадочной поверхности)

Данные экспериментальные исследования преследовали еще одну цель: определение уровней акустических воздействий на внешнюю поверхность ВА при работе ПТДУ, в т. ч. и при взаимодействии струй ПТДУ с посадочной поверхностью. Для решения этой задачи кроме модели масштаба 1:1,5

одиночного сопла ВТ использовалась модель ВА со всеми соплами ПТДУ, выполненная в масштабе 1:7 (выбор указанных масштабов определялся величинами максимальных расходов рабочего тела на СДС). Для упрощения изготовления конструкции модели ВА масштаба 1:7 со всеми соплами ПТДУ

в ней использовались круглые сопла с внезапным поджатием сужающейся части и круглым критическим сечением без механизма его перекрытия, с контуром, аналогичным показанному на рис. 10, а. Геометрия магистралей подвода рабочего тела к соплам этой модели также была упрощена: отсутствовали цилиндрические полости, проходя через которые в натурной ПТДУ, рабочее тело поступает к соплам, как это показано на рис. 1, 2. Для оценки влияния этих отличий на воздействие струи модели сопла ВТ

на имитатор посадочной поверхности, наряду с испытаниями показанной на рис. 2 модели сопла ВТ масштаба 1:1,5, проведены испытания круглых сопел такого же масштаба с таким же коническим контуром расширяющейся части сопла (рис. 10, а, б). Диаметр критического сечения этих круглых сопел $d_* = 29$ мм соответствует полностью открытому критическому сечению прямоугольной формы. Сопло 1 имеет входную сужающуюся часть с внезапным поджатием, а сопло 2 — входную коническую сужающуюся часть.

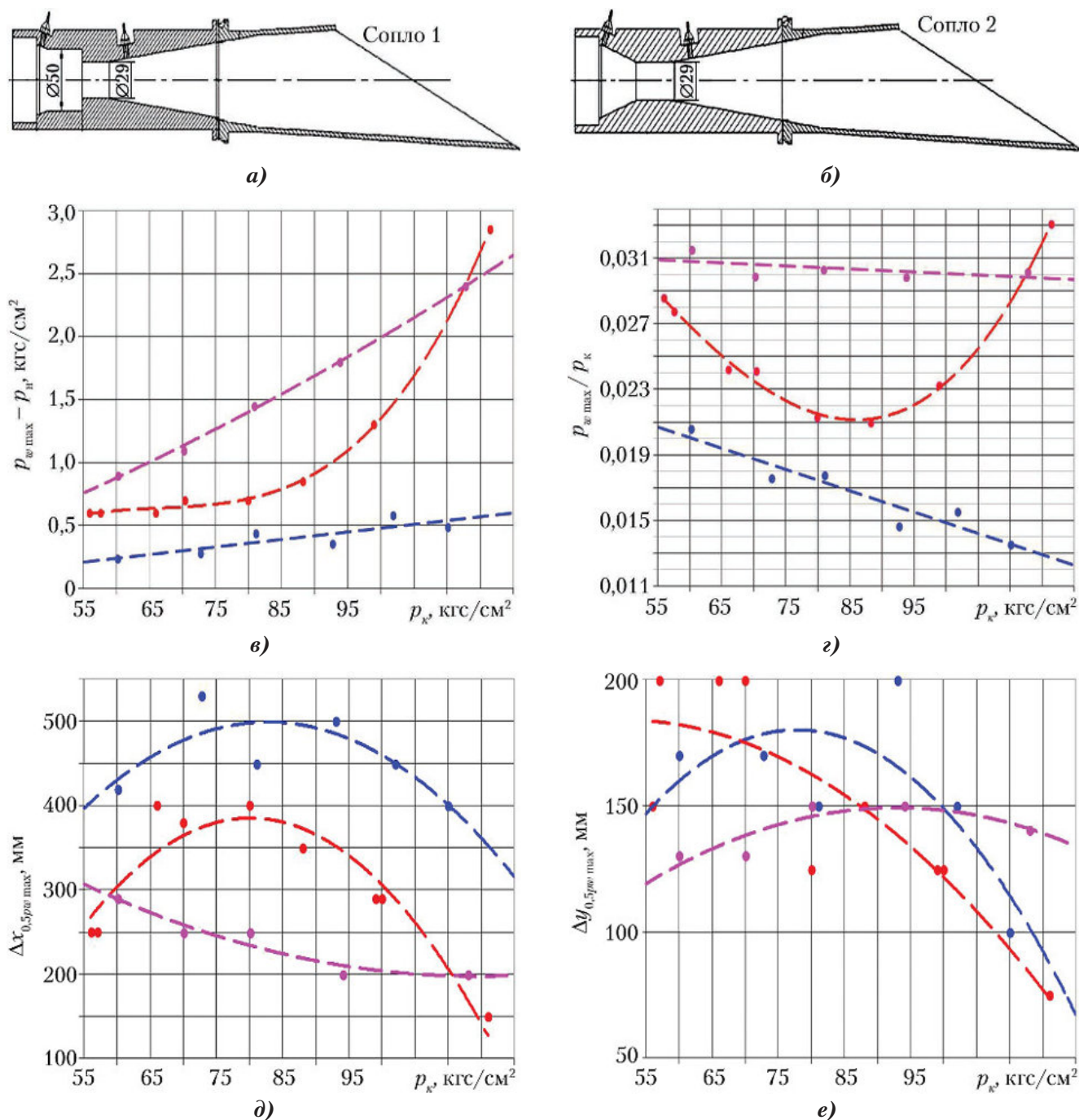


Рис. 10. Модельные круглые сопла вертикального торможения с коническим контуром и косым срезом масштаба 1:1,5 с диаметром критического сечения $d_* = 29$ мм: а — сопло 1 с внезапным поджатием сужающейся части; б — сопло 2 с конической сужающейся частью; в, з, д, е — воздействие «холодных» струй сопел на имитатор посадочной поверхности. — — модель сопла вертикального торможения; — — круглое сопло 1; — — круглое сопло 2

Из представленного на рис. 10, в сравнения максимальных избыточных статических давлений струи на имитаторе посадочной поверхности ($p_{w \max} - p_n$), полученных с моделью сопла ВТ с $(1 - F_*/F_{* \max}) = 0$ и с показанными на рис. 10, а, б круглыми соплами в испытаниях на холодном воздухе, видно, что величина ($p_{w \max} - p_n$) струи круглого сопла 2 в 3,6–4,3 раза выше, чем у модели сопла ВТ. Величина ($p_{w \max} - p_n$) струи круглого сопла 1 при $p_k \leq 100$ кгс/см² лежит заметно ближе к аналогичной величине для струи модели сопла ВТ, превышая ее в 2,0–3,6 раза. При $p_k \geq 110$ кгс/см² ($p_{w \max} - p_n$) струи круглого сопла 1 практически такая же, как у круглого сопла 2. Из рис. 10, г видно, что, в отличие от струи модели сопла ВТ, величина ($p_{w \max}/p_k$) струи круглого сопла 2 практически не зависит от p_k , т. е. автомодельна. Величина $p_{w \max}/p_k$ струи круглого сопла 1 при $p_k \leq 100$ кгс/см² лежит заметно ближе к величине $p_{w \max}/p_k$ модели сопла ВТ и неавтомодельна, т. е. зависит от p_k , но при $p_k \geq 110$ кгс/см² становится практически такой же, как у круглого сопла 2. Это различие в воздействии струй может быть объяснено только существенно более высокой турбулентностью струи сопла ВТ, порожденной сильной завихренностью потока в предсопловом объеме этого сопла с поворотной заслонкой. Это приводит к существенно более интенсивному перемешиванию газа в струе сопла ВТ с окружающим воздухом по сравнению со струями круглых сопел, особенно круглого сопла 2, и повышенной турбулентностью струи круглого сопла 1 из-за внезапного поджатия его сужающейся части по сравнению со струей круглого сопла 2 с конической сужающейся частью. На рис. 10, д, е представлены зависимости от p_k продольной ($\Delta x_{0,5p_{w \max}}$) и поперечной ($\Delta y_{0,5p_{w \max}}$) длин участка посадочной поверхности с $p_w \geq 0,5p_{w \max}$, создаваемого струями сравниваемых сопел. Видно, что $\Delta x_{0,5p_{w \max}}(p_k)$ струи круглого сопла 1 на 20–50% меньше, чем у модели сопла ВТ. У круглого сопла 2 в диапазоне $p_k = 70 \dots 100$ кгс/см² эта величина на ~40% меньше, чем у круглого сопла 1. Зависимости $\Delta y_{0,5p_{w \max}}(p_k)$ от давления струй рассматриваемых сопел мало отличаются друг от друга. Области повышенного давления от струй круглых сопел на имитаторе посадочной поверхности менее вытянутые при том же поперечном размере по сравнению со струей модели сопла ВТ. Аналогично для струи круглого сопла 2 по сравнению со струей круглого сопла 1.

Заключение

Исследования, проведенные на сопловом дифференциальном стенде Центра Келдыша на модели масштаба 1:1,5 сопла вертикального торможения посадочной твердотопливной двигательной установки, позволили путем пересчета модельных экспериментальных данных на натурные условия определить:

- коэффициенты расхода и удельного импульса тяги, а также боковую силу сопла вертикального торможения с регулируемым критическим сечением и картины течения в этом сопле в зависимости от перекрытия критического сечения сопла, в частности, вклад боковой силы сопла вертикального торможения в вертикальную составляющую силы тяги посадочной твердотопливной двигательной установки, уменьшающий эту силу на 6,5% при $p_k = 120$ кгс/см² при полностью открытых критических сечениях сопел;
- распределение давления по посадочной поверхности при воздействии струи сопла вертикального торможения с регулируемым критическим сечением в зависимости от перекрытия критического сечения сопла и давления в камере сгорания;
- влияние форм предсоплового объема, сужающейся части, горла и начального участка расширяющейся части сопла вертикального торможения на распределение давления по посадочной поверхности.

Список литературы

1. Антонова А.П., Брюханов Н.А., Четкин С.В. Средства посадки пилотируемого транспортного корабля нового поколения // Космическая техника и технологии. 2014. № 4(7). С. 21–30.
 2. Пономарев Н.Б., Воинов А.Л., Лозинская И.Г. Расчетные и экспериментальные методы определения удельного импульса тяги нового двигателя / В кн. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование // Под ред. академика РАН Коротева А.С. М.: Машиностроение, 2008. С. 17–80.
 3. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ–Петербург, 2008. С. 219–466.
- Статья поступила в редакцию 03.10.2016 г.

Reference

1. Antonova A.P., Brukhanov N.A., Chetkin S.V. *Sredstva posadki pilotiruемого transportnogo korablya novogo pokoleniya* [Landing equipment of the new generation manned transportation spacecraft]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, no. 4(7), pp. 21–30.
2. Ponomarev N.B., Voinov A.L., Lozino-Lozinskaya I.G. *Raschetnye i eksperimental'nye metody opredeleniya udel'nogo impul'sa tyagi novogo dvigatelya / V kn. Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ikh modelirovanie* [Design and experimental methods for determining specific pulse of a new engine / In book: Work processes in a liquid rocket engine and their simulation]. Ed. RAS academician Koroteev A.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. P. 17–80.
3. Alyamovskii A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike* [SolidWorks 2007/2008. Computer simulation in engineering practice]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg publ., 2008. P. 219–466.