

УДК 533.6.01.15 – 533.6.07.13

УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ ЗВУКОВОГО УДАРА, СОЗДАВАЕМОГО ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ, ПУТЕМ КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС ОБТЕКАНИЯ

3. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. М. Фомин, В. Ф. Чиркашенко, В. Ф. Волков, А. М. Харитонов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск

E-mails: fomin@itam.nsc.ru, chirkash@itam.nsc.ru, volkov@itam.nsc.ru, khar@itam.nsc.ru

С использованием экспериментальных и расчетных данных исследуется влияние основных факторов криогенного воздействия на процесс формирования средней зоны звукового удара и аэродинамические характеристики летательного аппарата. Проведено сравнение экспериментальных данных, полученных с использованием в качестве инжектируемой жидкости спирта или жидкого азота, что позволило определить суммарное влияние температуры и испарения хладагента. На основе численного моделирования процесса криогенного воздействия распределенной инъекции воздуха исследовано влияние температуры. Сравнение результатов численных расчетов и экспериментальных данных позволило определить влияние процесса испарения хладагента на формирование возмущенного течения. Показано, что для повышения эффективности способа криогенного воздействия (уменьшения расхода) необходимо интенсифицировать процесс испарения хладагента при его выходе на обтекаемую поверхность.

Ключевые слова: сверхзвуковой самолет, звуковой удар, головная ударная волна, инъекция хладагента, структура течения.

Введение. Настоящая работа является продолжением исследований возможности управления параметрами звукового удара (ЗУ) путем криогенного воздействия на процесс обтекания летательного аппарата [1, 2]. Результаты работ [1, 2] получены на примере модифицированного степенного тела. Замена носовой части степенного тела вращения (при заданном удлинении), имеющего оптимальное сопротивление при умеренных сверхзвуковых скоростях, на носовую часть с касательным сферическим затуплением обеспечивает (при определенных удлинении и радиусе затупления) дополнительное снижение сопротивления. Такая замена позволяет существенно уменьшить интенсивность головной ударной волны (УВ) в средней зоне ЗУ. Протяженность области минимизации ЗУ (средней зоны) определяется удалением по высоте от тела, на котором происходит взаимодействие головной УВ с распространяющейся с большей скоростью промежуточной висячей УВ, формирующейся вблизи поверхности тела. Противоречивость требований, предъявляемых к геометрическим параметрам модифицированного степенного тела (удлинении, радиусе затупления) для обеспечения снижения интенсивности ЗУ и сопротивления, приводит к необходимости ограничения протяженности по высоте области минимизации ЗУ.

Разработаны методы управления параметрами висячей УВ (интенсивность, положение), позволяющие сместить точку начала взаимодействия головной УВ с догоняющей ее промежуточной УВ на большие расстояния. В [1] показано, что за счет снижения температуры потока в области формирования висячей УВ (в тепловом пограничном слое) путем прокачки хладагента внутри модели можно уменьшить интенсивность промежуточной УВ на 50 %. При этом уменьшение скорости распространения промежуточной УВ позволяет увеличить протяженность средней зоны до величины, равной 1500 диаметрам (калибрам) тела. Однако эта величина существенно меньше высоты крейсерского полета сверхзвукового самолета, равной $6000 \div 7000$ калибров. Для увеличения эффективности криогенного воздействия в области зарождения висячей УВ в [2] предложен способ организации конвективного теплообмена путем распределенного выдува хладагента с поверхности тела. Это позволило существенно снизить температуру потока в области формирования висячей УВ, а следовательно, и скорость распространения возмущений по сравнению с соответствующими значениями, полученными в [1]. Установлено, что существенное влияние на процесс формирования висячей УВ оказывает жидкий контур эффективного тела, образующегося вблизи поверхности вследствие инъекции хладагента. В инжектируемом слое в результате испарения хладагента происходит изменение его агрегатного состояния из жидкого в газообразное. Форма жидкого контура зависит от способа инъекции и режима истечения хладагента и оказывает существенное влияние на распределение давления вблизи тела, не меняющееся вплоть до больших удалений от него. Таким образом, параметры ЗУ и аэродинамическое сопротивление тела зависят от положения области перфорации на теле, степени перфорации и режима истечения хладагента. За счет формирования протяженной зоны расширения распределенная инъекция хладагента за сферическим затуплением с уменьшающейся по длине тела степенью перфорации обеспечила существенное смещение вниз по потоку области формирования висячей УВ. В результате уменьшение интенсивности головной УВ (на 40 %) достигалось на расстояниях, приблизительно равных 7000 калибров, что свидетельствует о возможности практического применения данного способа. Наблюдающееся при этом уменьшение импульса положительной фазы возмущенного давления при незначительном увеличении интенсивности головной УВ указывает на возможность уменьшения сопротивления тела.

Для реализации данной технологии на борту летательного аппарата необходимо размещать определенный запас хладагента, что приводит к снижению полезной нагрузки. Эти потери можно уменьшить путем уменьшения расхода хладагента и аэродинамического сопротивления летательного аппарата. Относительный расход инжектируемого хладагента составляет 7–8 % реализованного в условиях эксперимента [2] расхода воздуха, набегающего на миделево сечение модели. Этот расход необходимо уменьшить приблизительно до 1 %, что можно обеспечить за счет уменьшения угла раствора сектора, в котором осуществляется инъекция (в работе [2] этот угол составляет 180°), и протяженности зоны перфорации. Поскольку способ инъекции оказывает существенное влияние на перераспределение давления, дальнейшее уменьшение расхода хладагента может быть достигнуто путем его оптимизации. При этом аэродинамическое сопротивление летательного аппарата не должно превышать исходную величину (без инъекции хладагента).

Для решения данной задачи с учетом физических представлений о процессе криогенного воздействия, полученных в [2], в настоящей работе определяются вклады массы хладагента, его температуры и процесса испарения в формирование структуры течения, обеспечивающей снижение уровня ЗУ и аэродинамического сопротивления летательного аппарата. Полученные данные позволят проводить поиск способов распределенной инъекции и режимов истечения хладагента, удовлетворяющих условиям поставленной задачи.

Влияние процесса испарения и температуры инжектируемого хладагента на процесс формирования средней зоны ЗУ. Численное моделирование процесса формирования течения вблизи модифицированного степенного тела при распределенной инжекции хладагента в область зарождения вихрей УВ является достаточно сложной задачей, поэтому достоверные данные о влиянии на этот процесс таких факторов, как масса, температура и испарение, в настоящее время отсутствуют. В связи с этим были проведены дополнительные экспериментальные и расчетные исследования. Для исключения влияния массы хладагента на процесс формирования вихрей УВ при инжекции хладагента в область ее зарождения выполнены аналогичные описанным в [2] экспериментальные исследования влияния распределенной инжекции на параметры ЗУ с использованием в качестве инжектируемой жидкости технического спирта. Применение не испаряющегося в условиях эксперимента спирта, инжектируемого при нормальной температуре, позволяет устранить влияние испарения и пониженной температуры на процесс обтекания. Сравнение результатов этих экспериментов с данными, полученными при том же расходе с использованием жидкого азота [2], позволяет определить суммарный вклад температуры и испарения хладагента в процесс криогенного воздействия.

Условия проведения исследований. Исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-313 Института теоретической и прикладной механики СО РАН при $M_\infty = 2,03$, $Re_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 = 265 \div 280 \text{ К}$ (M_∞ , Re_1 — числа Маха и Рейнольдса; T_0 — температура торможения потока). Для получения полного поля возмущенного телом потока использовался комбинированный экспериментально-расчетный метод [3, 4], основанный на измерении профилей возмущенного статического давления вблизи модели, установленной в рабочей части аэродинамической трубы, и последующем пересчете их на большие расстояния с помощью квазилинейной теории [5]. Схема проведения эксперимента, методика измерений и пересчета измеренных профилей давления на большие расстояния аналогичны описанным в работах [1, 2].

Модель, представляющая собой модифицированное степенное тело вращения (удлинение $\lambda = 6$, показатель степени $n = 0,75$, относительный радиус затупления $\bar{r}_3 = 0,2$) с диаметром миделевого сечения $d_M = 50 \text{ мм}$, изготовлена из стали марки 12Х18Н10Т. На рис. 1 показана схема перфорации, соответствующая модели 2 в [2]. На нижней поверхности модели в секторе с углом, равным 180° , начиная с сечения, расположенного вблизи линии сопряжения сферы со степенной поверхностью, до линии, находящейся на расстоянии от носика модели, равном 40 мм, выполнена перфорация (диаметр отверстий составляет $0,30 \div 0,35 \text{ мм}$). По мере удаления от носика модели степень перфорации, определяемая отношением площади отверстий к общей площади перфорированной поверхности $S_{\text{отв}}/S_{\text{п}}$, уменьшалась с 8,0 до 1,3 % за счет изменения расстояния между поперечными сечениями, по периметру которых равномерно располагалось одинаковое число отверстий. Диаметр отверстия, площадь которого эквивалентна суммарной площади перфорации, составлял 4,65 мм.

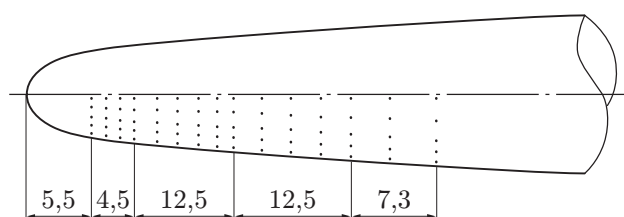


Рис. 1. Схема перфорации модели

Технический спирт подавался под давлением из емкости по трубопроводу во внутреннюю полость модели и сбрасывался в обтекающий поток через перфорацию и пазы в донной части модели. Давление спирта в резервуаре измерялось образцовым стрелочным манометром (класс точности 0,4 %) с диапазоном $0 \div 6$ атм. Расходные характеристики системы подачи спирта в условиях эксперимента соответствовали данным, полученным в [2].

Возмущенное статическое давление за отраженной головной УВ, генерируемой моделью, измерялось с помощью дренированной пластины, установленной на расстоянии от модели, равном 3,7 ее диаметра.

Результаты исследований. Результаты измерений возмущенного давления в потоке вблизи модели ($K = 3,7$, где K — относительное удаление от тела (калибр)), полученные при инъекции спирта под давлением до 0,15 МПа, свидетельствуют о существенном отличии процесса формирования течения по сравнению со случаем инъекции жидкого азота [2]. На рис. 2 представлены распределения возмущенного давления на различных расстояниях от модели при инъекции спирта и азота под давлением $P = 0,15$ МПа, а также результаты измерений, полученные в [2] в отсутствие инъекции ($P = 0$). Профили давления представлены в виде зависимости относительного избыточного статического давления $\Delta\bar{p} = (P - P_\infty)/P_\infty$ от относительного расстояния $\bar{x} = X/d_M$ (P, P_∞ — ста-

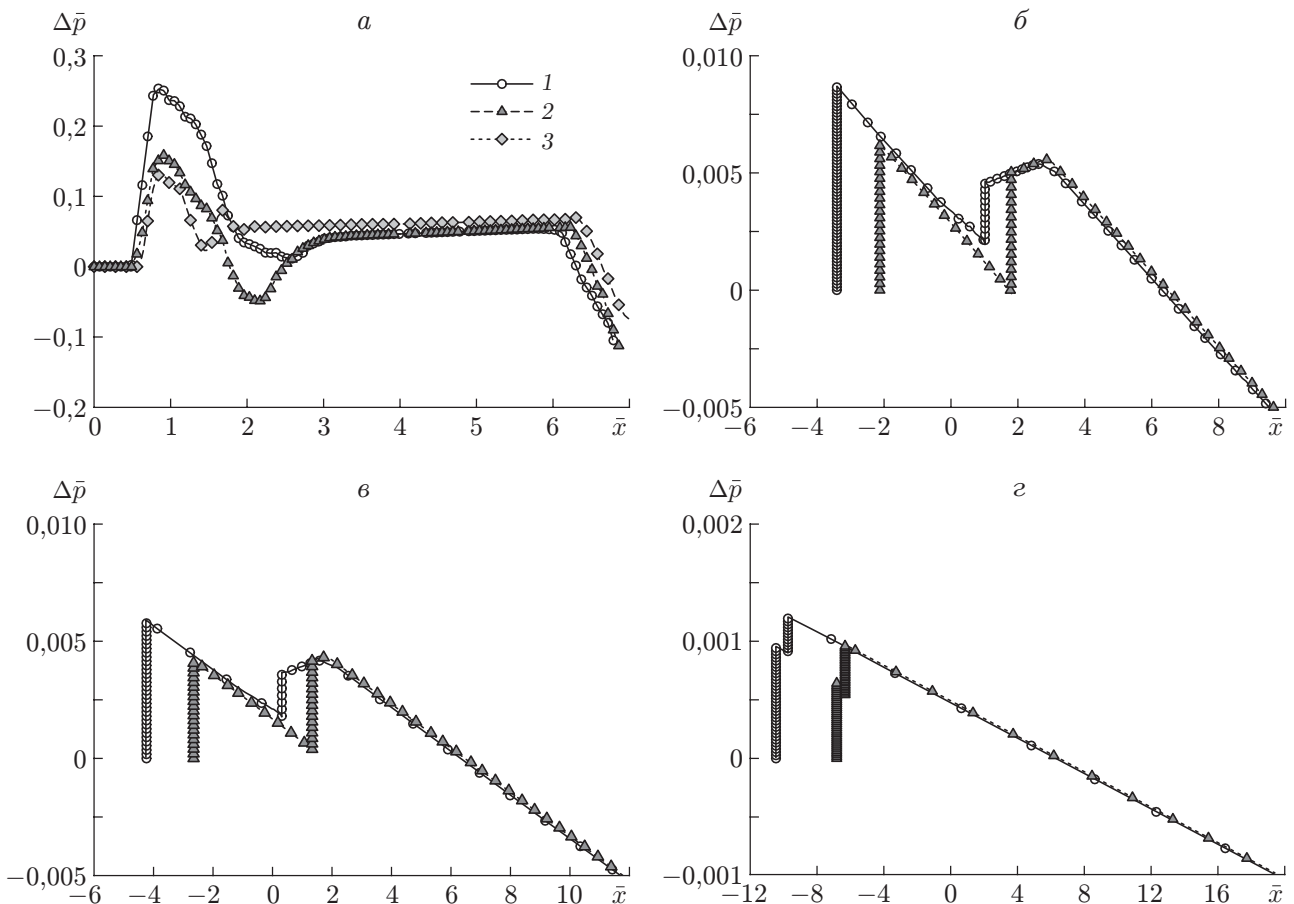


Рис. 2. Профили относительного избыточного статического давления на различных расстояниях от модифицированного степенного тела:

a — $K = 3,7$, *б* — $K = 300$, *в* — $K = 500$, *г* — $K = 6000$; 1 — спирт ($P = 0,15$ МПа), 2 — азот ($P = 0,15$ МПа), 3 — азот ($P = 0$)

тическое давление в возмущенном и невозмущенном потоке соответственно; направление оси X совпадает с направлением набегающего потока).

Равенство плотностей азота и спирта ($\rho \approx 800 \text{ кг/м}^3$) позволяет предположить равенство расходов этих жидкостей через перфорацию модели при одном и том же давлении P . В отличие от инъекции жидкого азота распределенная инъекция спирта в область формирования висячей УВ вблизи модели ($K = 3,7$) (кривая 1 на рис. 2,а) приводит к существенному увеличению интенсивности головной УВ, генерируемой сферическим затуплением. При этом увеличивается импульс положительной фазы волны ЗУ, что свидетельствует о существенном увеличении аэродинамического сопротивления тела, в отличие от случая инъекции жидкого азота (кривая 2 на рис. 2,а). Уменьшение интенсивности волны разрежения вблизи головной УВ с последующим ее увеличением до значения, практически равного интенсивности волны разрежения в случае инъекции жидкого азота, обусловлено взаимодействием головной УВ с возмущениями, генерируемыми слоем спирта. Несмотря на то что интенсивность волны разрежения, следующей за головной УВ, увеличивается, в отличие от случая инъекции жидкого азота перерасширения потока не происходит ($\Delta \bar{p} < 0$). Так же как и при инъекции жидкого азота, область расширения замыкается смещенной вниз по потоку волной сжатия, являющейся предвестником висячей УВ. Повышение давления перед волной сжатия (по сравнению со случаем инъекции азота) и соответственно температуры потока, определяющей скорость распространения возмущений, приводит к увеличению скорости распространения этой волны. По мере удаления от тела (см. рис. 2,б) вследствие влияния нелинейных эффектов, как и при инъекции жидкого азота, волна сжатия достаточно быстро трансформируется в висячую УВ. При меньшей начальной интенсивности висячая УВ опережает висячую УВ, генерируемую в случае инъекции жидкого азота, даже на больших расстояниях от тела (см. рис. 2,в,г). Таким образом, протяженность средней зоны, формирующейся при инъекции спирта (в отличие от инъекции жидкого азота), определяется динамикой распространения головной УВ, скорость которой увеличивается вследствие увеличения ее интенсивности, и висячей УВ, скорость которой также возрастает. При дальнейшем увеличении расстояния от тела головная и промежуточная УВ распространяются со скоростями, превышающими скорости распространения соответствующих УВ в случае инъекции жидкого азота. Это приводит к существенному увеличению протяженности положительной фазы волны ЗУ и ее импульса по сравнению со случаем инъекции жидкого азота. На больших расстояниях (см. рис. 2,г) инъекция спирта обеспечивает увеличение протяженности средней зоны, но при этом интенсивность головной УВ и импульс положительной фазы волны ЗУ значительно превышают соответствующие параметры УВ, генерируемой телом при инъекции жидкого азота.

Указанные особенности формирования возмущенного течения в случае распределенной инъекции спирта при $P = 0,15 \text{ МПа}$ наблюдаются во всем исследованном диапазоне давлений. Согласно полученным результатам основными параметрами, определяющими процесс формирования средней зоны ЗУ и аэродинамическое сопротивление тела при распределенной инъекции жидкости, являются степень перерасширения потока в области образования висячей УВ и интенсивность головной УВ.

На рис. 3 представлены зависимости минимального давления в области зарождения висячей УВ и интенсивности головной УВ от давления инжектируемой жидкости. Видно, что при равных расходах в исследованном диапазоне давлений распределенная инъекция жидкого азота приводит к более существенному, чем в случае инъекции спирта, снижению давления в области формирования висячей УВ, что позволяет сместить точку начала взаимодействия висячей и головной УВ на большие расстояния и тем самым увеличить протяженность области минимизации ЗУ. Незначительное увеличение интенсивности го-

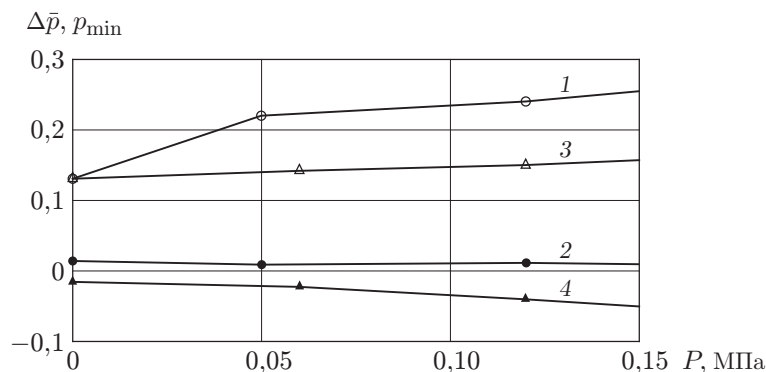


Рис. 3. Зависимости интенсивности головной УВ (1, 3) и минимального давления (2, 4) в области формирования висячей УВ от давления инжестируемой жидкости:

1, 2 — спирт, 3, 4 — жидкий азот

ловной УВ с ростом давления и существенное уменьшение давления в области образования висячей УВ свидетельствуют о снижении сопротивления давления модифицированного тела. В отличие от инъекции азота инъекция спирта приводит к существенному увеличению интенсивности головной УВ и импульса избыточного давления, что обуславливает уменьшение эффективности минимизации в средней зоне ЗУ и увеличение аэродинамического сопротивления тела. Результаты сравнения, проведенного без учета массы инжестируемой жидкости, показывают, что основное влияние на увеличение протяженности средней зоны ЗУ оказывают процесс испарения хладагента и уменьшение температуры потока в зоне формирования висячей УВ. В результате инъекции жидкой фазы хладагента (спирта) при нормальной температуре в области перфорации вблизи поверхности тела формируется слой жидкости. Обтекание образующегося при этом эффективного тела приводит к увеличению интенсивности головной УВ за счет возмущений, генерируемых наветренной поверхностью слоя жидкости, и незначительному уменьшению давления в области формирования висячей УВ, которое практически не зависит от давления спирта. При этом протяженность средней зоны ЗУ увеличивается за счет увеличения скорости распространения головной УВ и уменьшения (по сравнению со случаем инъекции жидкого азота) начальной интенсивности висячей УВ.

Влияние температуры инжестируемой жидкости на формирование средней зоны ЗУ. При оценке влияния температуры на формирование течения в случае распределенной инъекции хладагента в область зарождения висячей УВ использовался метод математического моделирования на основе программного комплекса Fluent. В предположении, что при выходе на обтекаемую поверхность тела инжестируемый хладагент не содержит жидкую фазу (мгновенно испаряется), в рамках уравнений Навье — Стокса численно решена задача трехмерного обтекания модифицированного степенного тела при распределенной инъекции воздуха с его поверхности. Распределенная инъекция хладагента моделировалась в соответствии со схемой перфорации исследованной модели (см. рис. 1). Участки перфорированной поверхности, на которых расстояние между сечениями с фиксированным количеством отверстий было постоянным, представлялись в виде отдельных проницаемых панелей, имеющих форму сегментов с углом раствора, равным 180° . Расход воздуха через каждую панель задавался в зависимости от его суммарного расхода через перфорацию, полученного при тарировке (см. [2]), пропорционально суммарной площади отверстий на каждом участке перфорации: $G_i(P) = G(P)S_i/S$ ($G_i(P)$ — расход воздуха через i -ю панель при заданном давлении P ; $G(P)$ — суммарный расход воздуха через все панели модели;

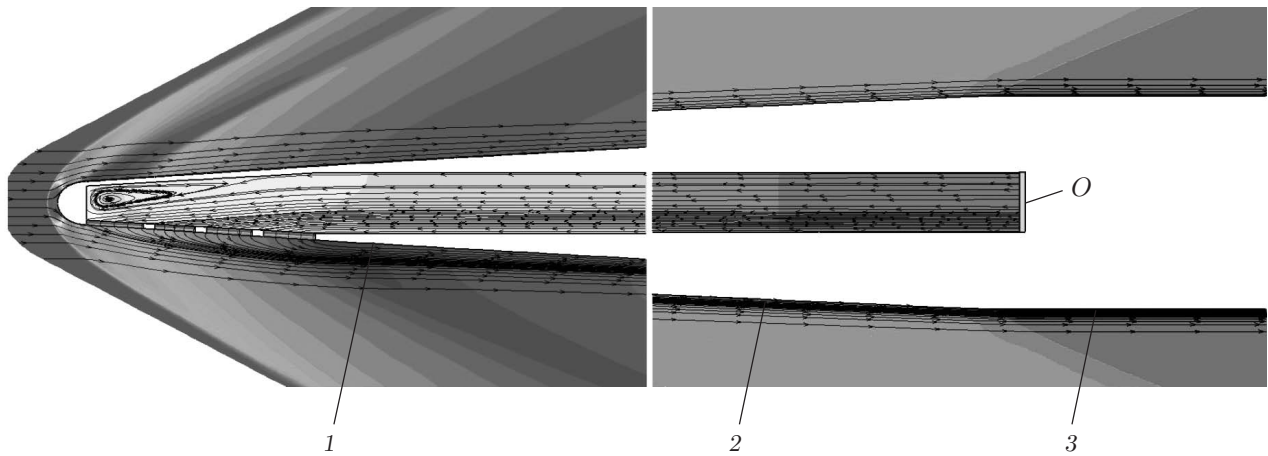


Рис. 4. Результаты численного расчета внешнего обтекания и течения в полости модифицированного степенного тела:

1 — носовая часть, 2 — степенная поверхность, 3 — цилиндрическая поверхность, O — контрольное сечение подводящего канала

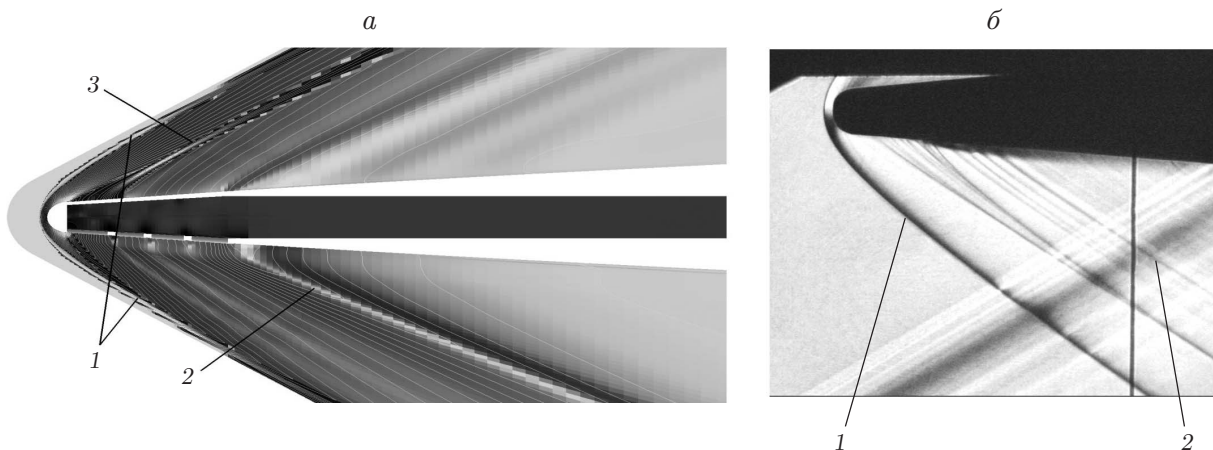


Рис. 5. Результаты визуализации течения вблизи модели:

a — результаты численного расчета (изобары), b — экспериментальные данные (теневая картина обтекания); 1 — головная УВ, 2 — висячая УВ в зоне перфорации, 3 — висячая УВ вне зоны перфорации

S_i — площадь отверстий на участке поверхности модели, соответствующем i -й панели; S — суммарная площадь отверстий на перфорированной поверхности модели).

Расход воздуха через каждую панель зависел от ее длины и степени проницаемости. На рис. 4 показаны расчетная область и структура внутреннего и внешнего течений при обтекании модифицированного степенного тела в случае инъекции воздуха. Внутри тела по каналу диаметром $D_k = 14$ мм с контрольным сечением на входе O подводится газ. На стенках канала заданы условия непротекания, а в контрольном сечении O — расход и температура газа.

Проведенное сравнение результатов расчетов обтекания исходной модели ($P = 0$) и той же модели при инъекции воздуха с экспериментальными данными показало, что они качественно хорошо, а количественно удовлетворительно согласуются. На рис. 5 представлена структура течения в окрестности модифицированного степенного тела, полученная в расчете и эксперименте. Результаты расчета показывают, что в возмущенной области

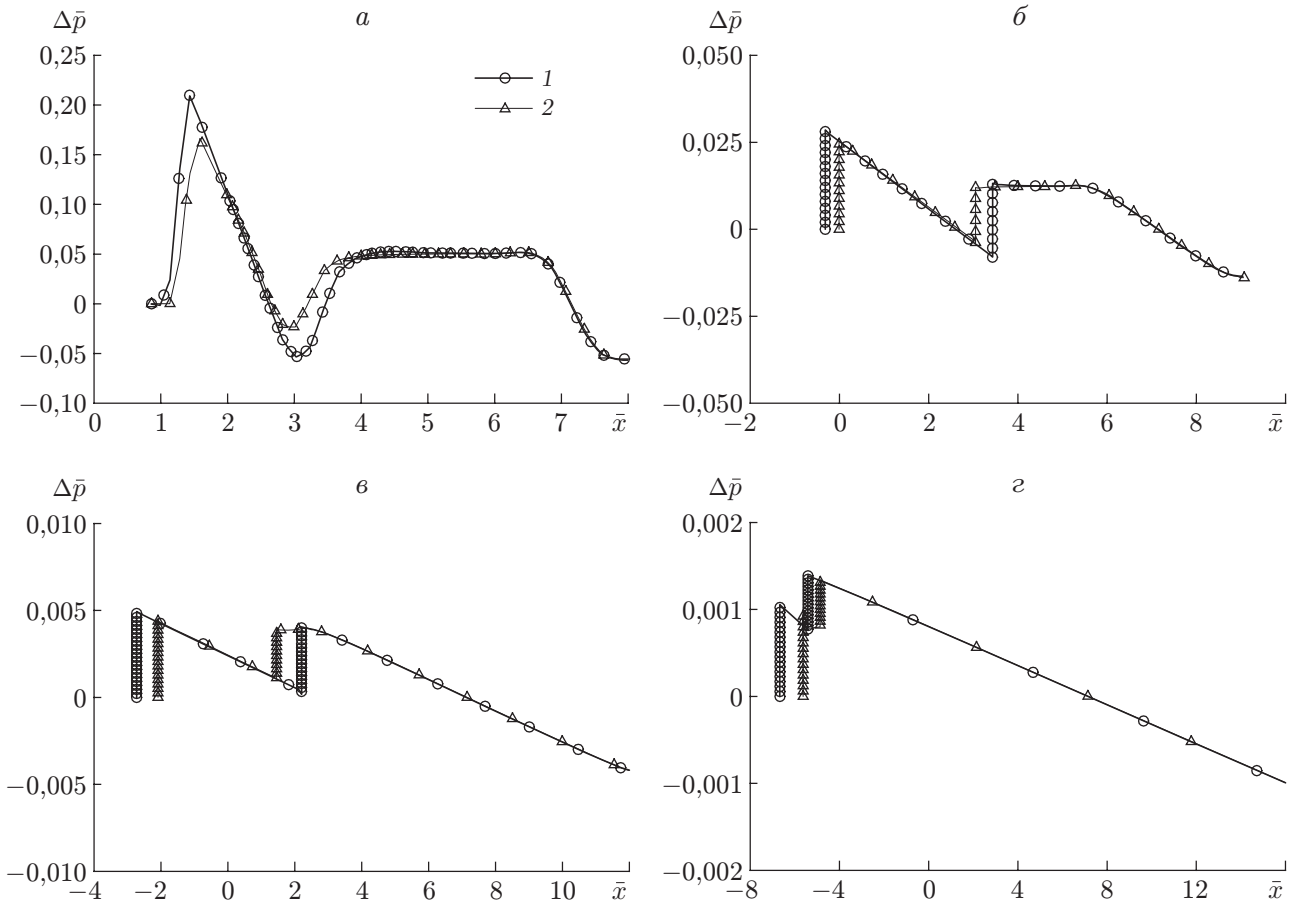


Рис. 6. Профиль избыточного давления на различных расстояниях от модифицированного степенного тела ($M_\infty = 2,03$, $dm/dt = 0,0125$ кг/с, $P = 0,15$ МПа):
 а — $K = 3,7$, б — $K = 50$, в — $K = 500$, г — $K = 4000$; 1 — $T = 300$ К, 2 — $T = 85$ К

помимо головной УВ имеется ряд особенностей течения, таких как интенсивные волны разрежения в областях сопряжения сферического затупления и степенной поверхности тела, степенной и цилиндрической поверхностей, а также в окрестности торца донной части тела (см. рис. 4, 5,а). Перерасширение потока при обтекании сферического затупления с последующим поджатием на степенной поверхности тела приводит к образованию слабого висячего скачка 3 (см. рис. 5,а). Вследствие инжекции воздуха область формирования висячего скачка 2 в нижнем секторе тела существенно смещена вниз по потоку. Эти особенности структуры течения хорошо согласуются с результатами визуализации процесса обтекания (см. рис. 5,б) и результатами измерения давления вблизи модели.

Параметры возмущенного потока, численно определенные вблизи тела, пересчитывались на большие расстояния с помощью метода [6], основанного на квазилинейной теории [5].

С использованием апробированной методики проведены расчеты обтекания модифицированного степенного тела в случае инжекции воздуха при различных значениях его температуры T и параметрах набегающего потока $M_\infty = 2,03$, $Re_1 = 25 \cdot 10^6$ м⁻¹, $T_0 = 300$ К. Результаты расчетов, представленные на рис. 6, показывают, что температура инжектируемого воздуха оказывает существенное влияние на формирование возмущенного течения.

При одном и том же расходе инжекция газа при температуре $T = 300$ К (см. рис. 6,а) приводит к более значительному увеличению интенсивности головной УВ вблизи тела и

степени перерасширения потока в области формирования висячей УВ, чем в случае инъекции газа при $T = 85$ К. Иными словами, увеличение температуры газа вызывает смещение вниз по потоку области формирования висячей УВ и уменьшение скорости ее распространения, что позволяет увеличить протяженность области минимизации ЗУ. Однако при этом увеличивается интенсивность головной УВ. Такое влияние температуры наблюдается также на больших удалениях от тела (см. рис. 6, б–г). В результате увеличение температуры инжектируемого воздуха приводит к уменьшению эффективности минимизации в средней зоне ЗУ и увеличению аэродинамического сопротивления тела.

Полученные данные, а также прямая зависимость соотношения температур на косой УВ от ее интенсивности [1], свидетельствующая об увеличении (уменьшении) интенсивности УВ при повышении (понижении) температуры за ней, позволяют объяснить влияние температуры. Увеличение интенсивности головной УВ и степени перерасширения потока при повышении температуры воздуха обусловлено увеличением поперечного размера эффективного тела вследствие увеличения объемного расхода инжектируемого воздуха. Повышение температуры на наветренной стороне инжектируемого слоя по сравнению с температурой набегающего потока приводит к дополнительному увеличению интенсивности возмущения, генерируемого инжектируемым слоем. Этим объясняется незначительное изменение интенсивности головной УВ при инъекции жидкого азота и существенное ее увеличение при инъекции спирта (см. рис. 3).

В то же время качественное несоответствие между параметрами течения в области разрежения, полученными в эксперименте в случае инъекции спирта (повышенная температура) и жидкого азота (пониженная температура) (см. рис. 3), и результатами расчета, представленными на рис. 6, невозможно объяснить влиянием температуры. Инъекция практически не испаряющегося спирта, имеющего большую температуру (по сравнению с жидким азотом), не обеспечивает перерасширение потока, которое реализуется при инъекции жидкого азота. На основании этого противоречия можно предположить, что при инъекции жидкого азота фактором, обуславливающим формирование области разрежения, обеспечивающей смещение области образования висячей УВ вниз по потоку, является процесс его испарения. Обтекание набегающим потоком жидкого контура эффективного тела, образованного жидкой и газообразной фракциями инжектируемого хладагента, обеспечивает дополнительное расширение потока по сравнению со случаем инъекции спирта.

Заметим, что влияние температуры инжектируемого газа на формирование средней зоны ЗУ (см. рис. 6) рассмотрено при малом расходе газа (0,0125 кг/с). Увеличение расхода газа до значений, реализованных в эксперименте при инъекции жидкого азота, приводит к существенному увеличению интенсивности головной УВ и импульса положительной фазы волны ЗУ (рис. 7), что указывает на нецелесообразность использования газа для управления параметрами висячей УВ.

Анализ результатов расчета аэродинамических характеристик модифицированного степенного тела, приведенных в таблице, показывает, что в результате инъекции охлажденного воздуха ($T = 85$ К) аэродинамическое сопротивление модифицированного тела уменьшается (на $2 \div 3$ %), при этом возникает незначительная подъемная сила. Этот результат указывает на дополнительный энергетический ресурс метода распределенной инъекции.

Заключение. На основе экспериментальных и расчетных исследований изучены основные факторы, определяющие процесс криогенного воздействия, а также их влияние на параметры ЗУ и аэродинамические характеристики летательного аппарата.

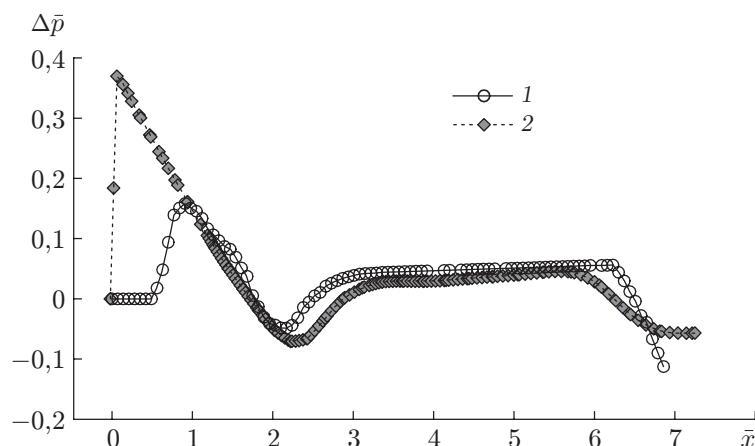


Рис. 7. Профили избыточного давления вблизи модифицированного тела ($K = 3,7$):
 1 — экспериментальные данные (инжекция жидкого азота с расходом $dm/dt = 0,045$ кг/с);
 2 — результаты расчета (инжекция воздуха при $T = 85$ К, $dm/dt = 0,035$ кг/с)

Аэродинамические характеристики модифицированного степенного тела
 при различных расходах инжектируемого газа

dm/dt , кг/с	C_x	C_y
0	0,2700	0
0,015	0,2662	0,0028
0,026	0,2621	0,0052

Показано, что при заданном расходе массы жидкой фракции инжектируемого хладагента увеличение протяженности области минимизации ЗУ (средняя зона) достигается в основном за счет низкой температуры хладагента, предотвращающей увеличение интенсивности головной УВ, и процесса испарения хладагента, обеспечивающего смещение вниз по потоку висячей УВ вследствие формирования эффективного тела слоем переохлажденного газа.

Для увеличения эффективности метода распределенной инжекции хладагента (уменьшения расхода) помимо использования перспективных схем инжекции необходима интенсификация процесса испарения хладагента при его выходе на обтекаемую поверхность.

Следует отметить, что в условиях натурального полета на высоте $18 \div 20$ км статическая температура воздуха на 50 К больше, чем в условиях эксперимента, что приводит к увеличению интенсивности процесса испарения хладагента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин В. М., Чиркашенко В. Ф., Волков В. Ф., Харитонов А. М. Управление уровнем звукового удара, создаваемого летательным аппаратом, путем криогенного воздействия на процесс обтекания. 1. Охлаждение поверхности летательного аппарата // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 6. С. 88–98.
2. Фомин В. М., Чиркашенко В. Ф., Волков В. Ф., Харитонов А. М. Управление уровнем звукового удара, создаваемого летательным аппаратом, путем криогенного воздействия на процесс обтекания. 2. Распределенный выдув переохлажденного газа с поверхности модели // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 136–144.

3. **Чиркашенко В. Ф., Юдинцев Ю. Н.** Развитие методики измерений параметров звукового удара в сверхзвуковых аэродинамических трубах. Новосибирск, 1983. (Препр. / СО АН СССР. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 6-83).
4. **Чиркашенко В. Ф., Юдинцев Ю. Н.** Система измерений параметров звукового удара в аэродинамических трубах с использованием ЭВМ. Новосибирск, 1983. (Препр. / СО АН СССР. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 21-83).
5. **Whitham G. V.** The flow pattern of a supersonic projectile // Comm. Pure Appl. Math. 1952. V. 5, N 3. P. 301–338.
6. **Рыжов О. С.** Затухание ударных волн в стационарных течениях // ПМТФ. 1961. № 6. С. 36–43.

Поступила в редакцию 23/IV 2010 г.
