

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОДИНАМИКИ УПРАВЛЯЮЩИХ СОПЛ

В. М. ДВОРЕЦКИЙ, В. В. ЗЕЛЕНЦОВ

(Москва)

Численными методами, основанными на разностных схемах первого порядка точности, исследуются особенности пространственных до- и сверхзвуковых течений невязкого и нетеплопроводного газа в управляющих соплах. Элементы рассмотренных сопловых трактов являются осесимметричными, несимметрия течения возникает вследствие несоосности предсоплового объема и дозвуковой части сопла либо вследствие несоосности элементов сверхзвуковой части. В первом случае сопло включает в себя несимметричную дозвуковую область, в которой наблюдается возвратно-циркуляционное течение, во втором — область внезапного расширения сверхзвукового потока с несимметричной застойной зоной.

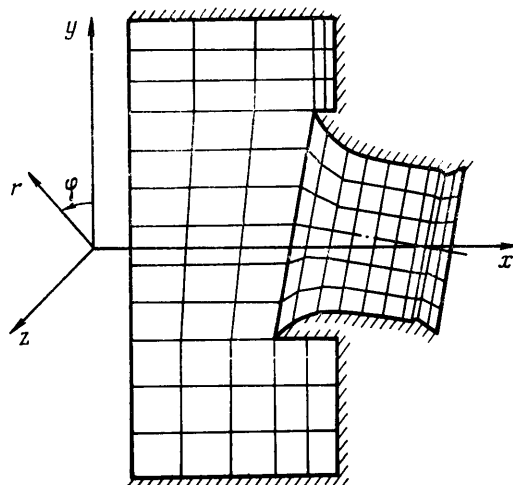
Ряд особенностей сверхзвуковых пространственных течений газа в соплах различных форм выявлен с помощью теории малых возмущений и метода характеристик, а на основе численного интегрирования системы уравнений газовой динамики проведен также анализ смешанных течений по всему тракту несимметричного сопла (библиография по перечисленным исследованиям содержится, например, в [1, 2]). Экспериментальное определение главным образом интегральных характеристик несимметричных сопел, например бокового усилия, подтвердило закономерности, предсказанные теоретическими исследованиями (работа [3] и там же библиография). Однако большинство опубликованных работ содержит анализ пространственных течений в сопловых трактах, имеющих достаточно простые формы. В классе управляющих сопел форма тракта существенно усложняется. Обоснованный выбор компоновочной схемы и формулирование закономерностей формирования управляющих усилий возможны на основе исследования локальной структуры течения в указанных соплах. В настоящей работе сделана попытка в приближении идеального газа проанализировать особенности распределения локальных и интегральных характеристик несимметрии течения в поворотном сопле, ось вращения подвижной части которого расположена в области горла, а дозвуковая часть утоплена в примыкающий цилиндр таким образом, что участок сопряжения между ними представляет собой несимметричную область («пазуху»), форма которой в произвольном меридиональном сечении описывается двузначной функцией. Другим объектом исследования является разрезное сопло. Между начальным участком сверхзвукового раструба и подвижной концевой частью имеет место разрыв контура, что обуславливает внезапное расширение потока с образованием особенностей в последующей части течения.

Для расчета течения в до- и трансзвуковой областях поворотного сопла методом установления используется пространственный вариант схемы С. К. Годунова [4]. Расчеты сверхзвуковых потоков проведены с использованием стационарного аналога названной схемы [5]. Показано, что в утопленном поворотном сопле реализуется сложное спиралеобразное течение с зонами возвратных токов. Выполненное исследование указывает на возможность увеличения бокового усилия, возникающего при повороте подвижной части тракта, за счет несимметрии течения в соплах рассмотренных типов.

1. Исследуется до- и сверхзвуковое течение невязкого и нетеплопроводного газа в сопле Лаваля, изображенном на фиг. 1. За характерный размер принят радиус минимального сечения в горле сопла. Рассматриваемый сопловый тракт на отдельных участках описывается многозначной функцией и состоит из подводящего цилиндра радиусом $r=3$ и собственно сопла Лаваля, которое погружено в примыкающий цилиндр. При этом

область перехода между цилиндром и входным раструбом сопла представляет собой некий незамкнутый объем, который в дальнейшем будем условно называть пазухой. Сопло может поворачиваться относительно оси качания, перпендикулярной плоскости симметрии тракта. Последняя совмещена с плоскостью xu прямоугольной системы координат x, y, z . Плоскость yz совмещена с входным сечением подводящего цилиндра, а ось x — с осью симметрии цилиндра. При повороте качающейся части сопла симметрия переходной области нарушается.

Расчеты проведены с использованием цилиндрической системы координат x, r, φ , причем ось x цилиндрической системы совпадает с осью x декартовой системы, а координата φ определяет угол между меридиональной плоскостью xr и координатной плоскостью xu . Исследуемая область течения внутри сопла разбивается на ячейки разностной сетки. Для этого сопловой тракт делится на две области. Первая область включает в себя поворотную часть рассматриваемого тракта и ту часть предсоплового объема, которую можно выделить, продолжив образующие сопла в направлении плоскости yz параллельными оси x линиями. Вторую область составляет остальная часть подводящего цилиндра, включая пазуху.



Фиг. 1

Часть предсоплового объема, которая включена в первую из перечисленных областей, делится на слои в направлении оси x плоскостями, которые последовательно разворачиваются от плоскости входного сечения yz таким образом, чтобы последняя плоскость совпала с плоскостью входа в подвижную часть. Указанные плоскости разбиения затем переходят на поверхности, делящие на слои вторую область. Поверхности деления второй области формируются так, что продолжением всякого радиуса, лежащего в плоскости разбиения первой области, является прямая линия, перпендикулярная образующим подводящего цилиндра. Область внутри поворотной части соплового тракта разбивается на слои поверхностями, перпендикулярными ее оси симметрии. Слои продольного разбиения делятся на секторы меридиональными плоскостями. Линии пересечения поверхностей, обеспечивающих два рассмотренных вида разбиения, делятся на равные в пределах каждой области отрезки и точки разбиения на соседних по x границах соединяются. Описанная разностная сетка изображена на фиг. 1.

Пусть t — время, обозначим через u, v, w проекции вектора скорости газа на оси x, r, φ цилиндрической системы координат, а через q, p, ρ, e, i — модуль вектора скорости, давление, удельные внутреннюю энергию и энтальпию газа с показателем адиабаты $\kappa=1.14$, для которого $i=\kappa p/(\kappa-1)\rho$.

Для определения поля течения используются интегральные законы сохранения массы, количества движения и энергии, эквивалентные дифференциальным уравнениям течения и соотношениям на разрывах, в безразмерном виде

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{dt} \iiint_Q \bar{a} dx dr d\varphi + \iint_S \bar{b} r dr d\varphi + \bar{c} dx d\varphi + \bar{f} dx dr = \\
 & = \iiint_Q \bar{g} dx dr d\varphi \\
 (1.1) \quad \bar{a} &= \begin{vmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho(2e + q^2) \end{vmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{vmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho u(2i + q^2) \end{vmatrix}; \quad \bar{c} = \begin{vmatrix} \rho v \\ \rho vw \\ p + \rho v^2 \\ \rho vw \\ \rho v(2i + q^2) \end{vmatrix}, \\
 \bar{f} &= \begin{vmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho + \rho w^2 \\ \rho w(2i + q^2) \end{vmatrix}, \quad \bar{g} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ p + \rho w^2 \\ -\rho vw \\ 0 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

Здесь Q — произвольный объем в пространстве $xr\varphi$, S — граница объема. Компоненты скорости и плотность отнесены к своим критическим значениям a_* и ρ_* , пространственные координаты — к выбранной характерной длине r_* , время — к r_*/a_* , давление — к $\rho_* a_*^2$, внутренняя энергия и энтальпия — к a_*^2 .

Полагаем полную энтальпию во всем потоке постоянной, тогда для стационарного режима уравнение энергии заменяется интегралом Бернулли

$$(1.2) \quad \frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p}{\rho} + q^2 = \frac{\kappa+1}{\kappa-1}$$

Считая также постоянной и известной энтропию во входном сечении подводящего цилиндра, а поток при $x=-\infty$ равномерным, будем параметры течения на входе определять исходя из следующих допущений:

$$(1.3) \quad \partial u / \partial x = 0, \quad v = w = 0$$

На стенках сопла и на плоскости симметрии выполняется условие непротекания. В выходном сечении реализуется сверхзвуковое течение.

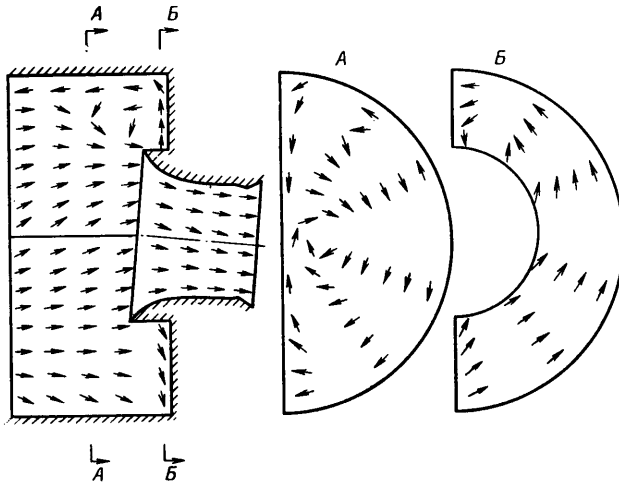
Вопрос о граничных условиях, получение конечно-разностных соотношений, процесс вычислений, а также анализ аппроксимации и устойчивости используемой разностной схемы подробно изложены в [6].

Степень установления течения анализировалась по изменению с течением времени разности давлений в нескольких ячейках, примыкающих к противоположным образующим в плоскости симметрии. Контроль точности расчета стационарного течения осуществлялся путем определения относительных ошибок вычисления интегрального расхода в сечениях по длине сопла, а также относительных ошибок определения энтропийной функции p/p^* .

При разностной сетке, содержащей ~ 5000 ячеек, максимальные погрешности в вычислении указанных величин составили $\sim 4\%$ в районе пазухи и 1% в остальной части течения.

В рассматриваемом примере расчета глубина пазухи при нулевом угле поворота подвижной части составила $h=0.6$. Угол поворота подвижной части был принят равным $\alpha=5^\circ$.

Предварительный анализ результатов расчета показал, что в исследуемом сопловом тракте реализуется сложный тип пространственного течения. При этом некоторые особенности занимают достаточно ограничен-



Фиг. 2

ные области. Наиболее характерные свойства локальной структуры потока видны из фиг. 2, которая иллюстрирует поле направлений проекции вектора скорости q на меридиональные плоскости rx при $\varphi=45^\circ$ и 135° (указанные меридиональные плоскости условно развернуты на плоскости $\varphi=0^\circ$ и 180° , совпадающие с плоскостью симметрии).

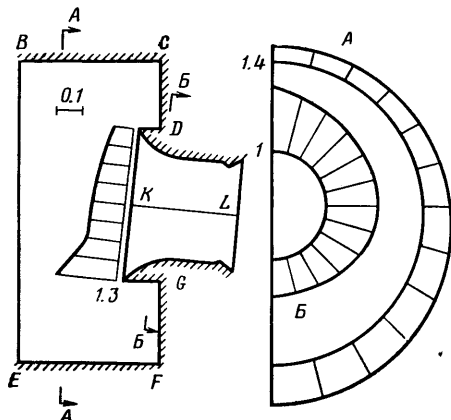
В выполненных расчетах горло сопла располагалось при $x=6$, т. е. на фиг. 2 представлена лишь часть расчетной области подводящего цилиндра. Изображенные векторы не отражают истинной величины вектора скорости. Представленные результаты расчета свидетельствуют о том, что в области, ориентировочно ограниченной меридиональными плоскостями $90^\circ > \varphi > 0$, образуется вихрь, заполняющий пазуху и формирующий профиль ядра течения в предсопловом объеме. Подобная особенность течения в осесимметричном утолщенном сопле наблюдалась и в эксперименте [7]. Для области, заключенной ориентировочно между меридиональными плоскостями $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ характерно затекание в пазуху большей доли потока непосредственно из ядра течения.

Сопоставление картины течения в меридиональных плоскостях $\varphi=45^\circ$ и 135° с полями направлений проекций вектора скорости q на плоскости rx при различных значениях x (фиг. 2) позволяет проследить еще две существенные особенности течения. Так, поток, поступающий в область пазухи при $\varphi > 90^\circ$ течет далее по двум направлениям: одна часть потока образует достаточно тонкий слой возвратного течения вблизи плоскости $\varphi=180^\circ$, втекающий затем в сопло; вторая часть потока в пазухе также в виде тонкого слоя перетекает по торцевой стенке цилиндра в область $\varphi < 90^\circ$ и вблизи плоскости $\varphi=0^\circ$ втекает в сопло, образуя зону возвратных токов. Вторая часть потока охватывает, постепенно расширяясь в направлении $\varphi=0^\circ$, частично также тонкую пристеночную область боковой поверхности цилиндра и, по-видимому, питает поперечный вихрь. Два описанных потока в области их слияния создают спиралеобразное продольное течение в ядре потока. Вследствие вихревой структуры течения в предсопловом объеме поток на входе в поворотную часть имеет значительную осевую скорость ($u \approx 0.4$).

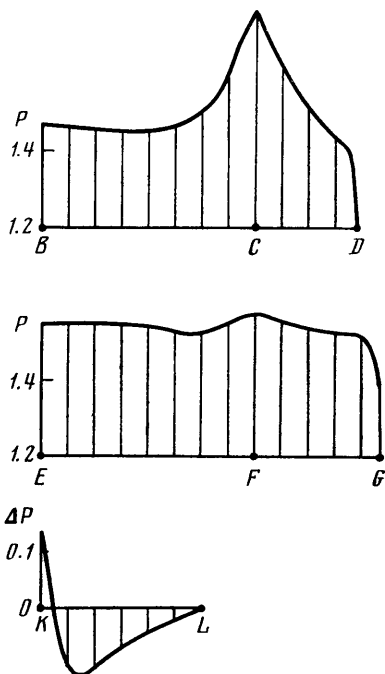
Результаты численного исследования пространственного течения в поворотном сопле указывают на несимметрию в распределении поля давления. На фиг. 3 и 4 приведены эпюры распределения давления по стенкам соплового тракта, а также эпюра распределения давления по радиаль-

ной координате вблизи входа в поворотную часть сопла (все для плоскостей $\varphi=45^\circ$ и 135° , которые, как и на фиг. 2, условно развернуты на плоскость симметрии). Для рассматриваемых плоскостей неравномерность потока по давлению вблизи входа в поворотную часть составляет $\sim 11\%$ минимального уровня в плоскости $\varphi=45^\circ$. Натекание потока на стенку и в область пазухи при $\varphi=135^\circ$ обуславливает здесь примерно одинаковый и более высокий уровень давления, чем на стенке цилиндра в плоскости $\varphi=45^\circ$ (фиг. 4).

В зоне поперечного вихря плоскости $\varphi=45^\circ$ градиент давления на стенке цилиндра, напротив, значительный, и особенно в области пазухи. Неравномерность поля давления здесь достигает 17% давления на входе в цилиндр по этой же стенке. Подобная особенность в распределении поля давления сохраняется и на торцовых стенках подводящего цилиндра в области пазухи. Так, в плоскости $\varphi=135^\circ$ уровень давления по торцовой стенке незначительно понижается по радиальной координате



Фиг. 3



Фиг. 4

нате в направлении к оси цилиндра. На торцовой стенке в плоскости $\varphi=45^\circ$ наблюдается существенное уменьшение давления в том же направлении, достигающее 30% давления на стенке подводящего цилиндра. При этом на наружной поверхности поворотной части, входящей в цилиндр, имеет место значительная неравномерность поля давления. Эта несимметрия поля давления имеет противоположный знак по отношению к перепаду давления на подводящем цилиндре.

На фиг. 4 для области входного раструба поворотной части показан также характер изменения в плоскости симметрии yx разности давлений на нижней и верхней образующих $\Delta p = p_- - p_+$ (индексы приписаны соответственно). Представленная зависимость является знакопеременной и подобна результатам, полученным ранее для сопел с несимметричным входом [2]. Таким образом, результирующее управляющее усилие формируется из нескольких поперечных составляющих, обусловленных неравномерностью поля давления на подводящем цилиндре, на наружной и внутренней поверхностях поворотной части. Изображенные эпюры давлений на стенках соплового тракта для поперечных сечений при различных зна-

чениях x свидетельствуют о том, что основной вклад в интеграл сил давления F_y по поверхности цилиндра вносится областью $180^\circ > \varphi > 90^\circ$, т. е. поперечная сила на цилиндре отрицательна. Интеграл сил давления на наружной поверхности поворотной части, как уже отмечалось, должен иметь противоположный знак ($F_y > 0$). Наконец, по внутренней поверхности входного раструба сопла основной вклад в интеграл сил давления согласно представленной эпюре вносится областью $90^\circ > \varphi > 0$, и здесь $F_y > 0$. Для принятой степени погружения поворотной части в подводящий цилиндр результирующее значение интеграла сил давления для всей рассматриваемой области положительное.

Расчеты, выполненные с различной степенью погружения поворотной части, указывают на то, что при этом происходит перераспределение неравномерности поля давления в элементах соплового тракта, и интеграл сил давления F_y может иметь как нулевое, так и отрицательное значение. Следует еще раз отметить, что данное исследование проведено в приближении идеального газа и влияние эффектов вязкости на локальные и интегральные характеристики несимметрии течения подлежит оценке.

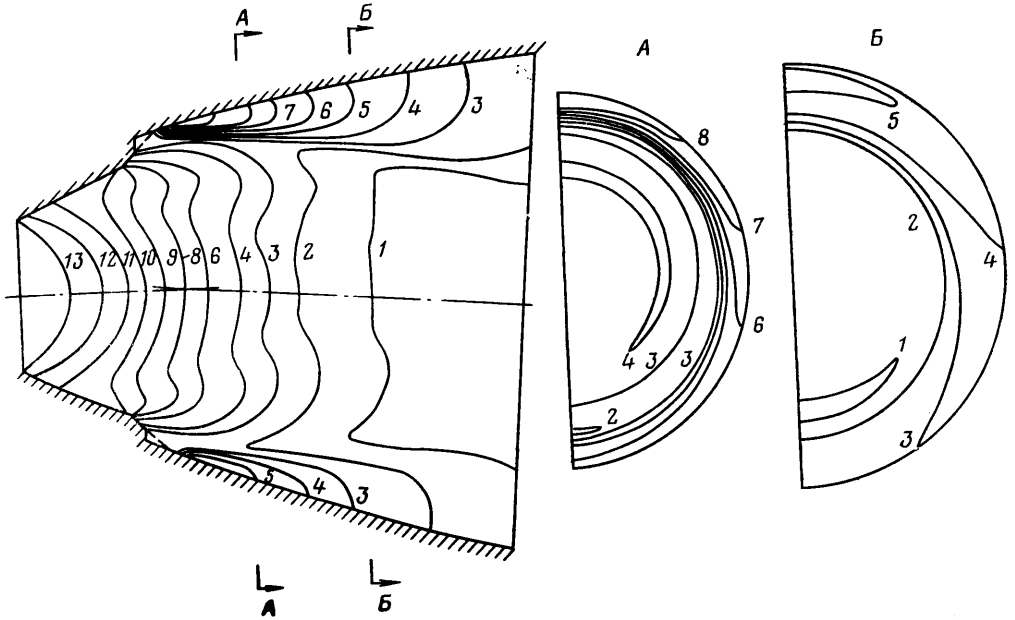
Для анализа особенностей распространения несимметрии дозвукового потока в сверхзвуковую область течения проведен расчет с использованием стационарных уравнений для сверхзвукового сопла, которое при длине $L=12$ имело примерно 17-кратное расширение по площади, а профиль задавался многочленом четвертого порядка. При этом в сверхзвуковой области наблюдается знакопеременный характер распределения разности давлений Δp по стенке. Однако величина интеграла сил давления F_y изменилась незначительно, сохранив положительный знак. Следовательно, несимметрия течения в рассмотренном поворотном сопле создает поперечную составляющую, действующую в том же направлении, что и усилие, возникающее при повороте подвижной части тракта.

Проведено исследование влияния положения оси вращения качающейся части на изменение локальных и интегральных характеристик течения. Для этого ось вращения смещалась вправо и влево относительно горла на расстояние $L=1$. Расчеты указывают на незначительную несимметрию поля давления по стенкам сопла, вследствие чего величина боковой силы слабо зависит от положения оси вращения в указанном диапазоне смещений. Вместе с тем слабая зависимость локальных характеристик несимметрии течения от положения оси вращения приводит к значительному изменению величины вращательного момента, действующего на подвижную часть.

2. Известное авторам исследование разрезных сопел [8] выполнено на основе теории малых возмущений и содержит анализ их интегральных характеристик.

В настоящей работе пространственное течение в разрезном сопле, изображенном на фиг. 5, исследуется путем численного интегрирования системы уравнений для стационарного течения с помощью метода сквозного счета [5]. Сопло состоит из неподвижной и поворотной частей, профиль каждой из которых задавался многочленом четвертого порядка. При длине сверхзвуковой части $L=6.7$ сопло имеет примерно 11-кратное уширение по площади. Вблизи разъема неподвижная часть заканчивается конической поверхностью и угол наклона образующей конуса к оси x равен 45° . При абсциссе $x=1.65$ контур соплового тракта претерпевает резкий излом. Расстояние от горла до оси вращения концевой части сопла принято равным $L=2.15$. Подвижная часть повернута на угол $\alpha=5^\circ$.

В области разъема имеет место внезапное расширение потока, и течение характеризуется наличием отрывной зоны. Для проведения расчета необходимо определить донное давление в застойной области. При прове-



Фиг. 5

дении настоящего исследования донное давление задавалось из условия сохранения импульса потока до и после застойной зоны, как это сделано для цилиндрического канала с внезапным расширением, например, в работе [9]. Так как в данном случае канал является расширяющимся, то первоначально точка соприкосновения струи со стенкой задавалась ориентировочно, а затем уточнялась путем итераций (двух).

На входе в сопло поток полагается равномерным, параллельным оси x с $u=1.1$ и $\kappa=1.14$.

Особенности пространственного течения в исследуемом разрезном сопле иллюстрируются на фиг. 5 на примере распределения линий $p=\text{const}$ (изображенным линиям соответствуют уровни: 1 — 0.02, 2 — 0.03, 3 — 0.04, 4 — 0.05, 5 — 0.06, 6 — 0.07, 8 — 0.09, 9 — 0.12, 10 — 0.15, 11 — 0.2, 12 — 0.3, 13 — 0.5). После разгона на коническом участке неподвижной части поток натекает на стенки поворотного раструба под разными углами, и пространственный скачок уплотнения, зарождающийся в области разъема, имеет разную интенсивность по угловой координате. У образующей вблизи плоскости $\varphi=0$ перепад давления за скачком и в невозмущенном потоке примерно составляет 2.8, а вблизи плоскости $\varphi=180^\circ$ — около 1.8. Изображенные здесь же линии постоянства уровней давления в поперечных сечениях показывают, что интенсивность скачка в промежуточных меридиональных плоскостях меняется линейно и уменьшается в направлении к срезу сопла.

Возникающая в рассматриваемом сопловом тракте вследствие несимметрии течения боковая сила равна 6.4% импульса сопла и действует в том же направлении, что и усилие, возникающее при повороте подвижной части. Расчетом получен коэффициент усиления управляющего усилия 1.7.

Авторы признательны А. Н. Крайко за полезные замечания и М. Я. Иванову за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирумов У. Г. К теории маловозмущенных пространственных течений в соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 1.
2. Дворецкий В. М. Исследование влияния формы сопла на характеристики пространственных до- и сверхзвуковых течений. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 6.
3. Бобович А. Б., Корнилович В. Б., Маслов Б. Н., Шишков А. А. Экспериментальное исследование асимметричных сопел Лавалья. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 2.
4. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики. Матем. сб., 1959, т. 47, № 3.
5. Иванов М. Я., Крайко А. Н., Михайлов Н. В. Метод сквозного счета для двумерных и пространственных сверхзвуковых течений. I. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1972, т. 12, № 2.
6. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., «Наука», 1976.
7. Дуплищев М. И., Кравец В. В., Махин В. А., Чухало Н. А. Влияние структуры течения в докритической области утолщенных сопел на расходные характеристики. Изв. вузов, Авиац. техн., 1973, № 3.
8. Strahle W. C. A theory of the aerodynamics of the supersonic splitline gimbaled nozzle. J. Spacecraft and Rockets, 1967, vol. 4, No. 2. (Рус. перев.: Аэродинамические характеристики сверхзвукового поворотного сопла с разрывом образующей. Ракетная техника и космонавтика, 1967, т. 5, № 7).
9. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М., «Машиностроение», 1968.