

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин Э. Г. Плоское вихревое течение в окрестности точки ортогональности звуковой линии вектору скорости. Изв. АН СССР, МЖТ, 1966, № 6.
2. Von Karman Th. The similarity law of transonic flow. J. Math. and Phys., 1947, vol. 26, No. 3.
3. Рыжов О. С. Некоторые вырожденные околосвуковые течения. ПММ, 1958, т. 22, вып. 2.
4. Фалькович С. В. К теории сопла Лавалья. ПММ, 1946, т. 10, вып. 4.

### О ПРОФИЛИРОВАНИИ СОПЛ, РАБОТАЮЩИХ НА ГАЗЕ С ЧАСТИЦАМИ КОНДЕНСАТА

Г. В. ДРИТОВ, А. П. ТИШИН

(Москва)

Прямой метод решения вариационной задачи применяется при отыскании оптимального профиля сверхзвуковой части сопла для газа с частицами. Приводятся результаты такого решения, а также изложен подход к профилированию предварительного характера, направленный на уменьшение выноса частиц на концевой участок сопла и получение для некоторого семейства профилей импульса, близкого к максимально достижимому. Влияние от варьирования профилей в до- и трансзвуковой области сопла при этом не рассматривается.

Вариационная задача поиска оптимального профиля сопла в случае неравновесного течения газа с конденсированными частицами в одномерном приближении решена в работах [1-3]. Основной результат их состоит в том, что оптимальный профиль примерно на одну треть уменьшает потери, связанные с запаздыванием частиц, по сравнению с соплом, построенным для газа. При этом сопло имеет необычную конфигурацию с коротким входом и сильно вытянутой горловиной. Последнее связано с необходимостью уменьшения максимального градиента скорости и перемещения зоны наибольшего отставания частиц в дозвуковую часть. Неучет принципиальных особенностей двумерного течения (например, непараллельности потока) и неизбежное усиление роста частиц вследствие коагуляции в зоне высокого давления [4] приводит к увеличению потерь удельного импульса. Это снижает прикладное значение результатов работ [1-3].

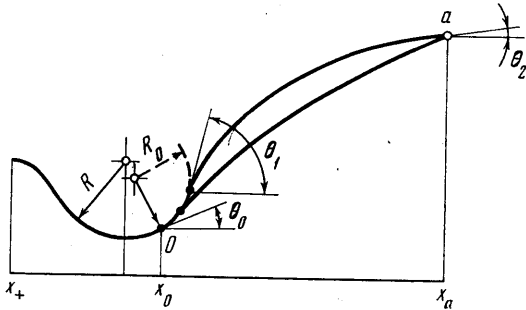
Задача оптимизации сверхзвукового профиля для двумерного неравновесного двухфазного течения решалась Гоффманом и Томпсоном [5, 6] и была уточнена и дополнена А. Н. Крайко и А. А. Осиповым [7]. Последние, в частности, получили, что при удлинении сопла (это в принципе может оказаться целесообразным для неравновесных течений), таком что замыкающая характеристика начинается на оси вне начального пучка волн разрежения, оптимальное сопло должно иметь внутренние угловые точки. Угловые точки могут быть также на разгонном участке, если он является варьируемым элементом короткого сопла.

Расчеты по программе [8] для небольшой концентрации частиц (весовая доля  $z < 40\%$ ) при учете трения и веса сопла указывают на отсутствие заметного выигрыша в эффективном удельном импульсе от увеличения длины в случае неравновесного течения по сравнению с равновесным. Разгонный участок, куда может в соплах сравнительно небольшой длины прийти характеристика первого семейства, пересекающаяся на оси с замыкающей характеристикой, как правило, очерчивается небольшим радиусом, допустимым по условиям теплопередачи. Таким образом, при исследовании практически интересных случаев можно рассматривать профили, не содержащие внутренних угловых точек.

Ввиду больших трудностей в реализации метода [7] в настоящее время отсутствуют публикации с результатами расчетов оптимальных сопел для неравновесных двухфазных течений. Применение для этой цели методов, разработанных для газа (см., например, обзор, сделанный А. Л. Гонором и А. Н. Крайко в «Приложении» к [9], или метод авторов [10], изложенный в [11]), с заменой реального неравновесного двухфазного потока течением газа, по термодинамическим свойствам эквивалентного равновесной смеси с частицами, является лишь первым приближением. Расчеты неравновесных осесимметричных двухфазных течений [8, 12] указывают, в частности, на значительную разницу в величине неравномерности по сечению для неравновесных и равновесных течений.

1. Задача формулируется следующим образом. В сечении  $x_0$  (фиг. 1) заданы параметры газа и частиц, найденные, например, как в работе [8], расчетом равновесного двухфазного течения в до- и трансзвуковой части сопла и вычислением траекторий частиц в полученном поле газовой фазы. В точке  $o$  угол наклона вектора скорости равен  $\theta_0$ . Координаты точки  $a$  могут быть определены по методике, приведенной в [11]. Варьируется участок сопла  $o-a$ , описываемый окружностью радиуса  $R_0$ , имеющей в точке  $o$  наклон  $\theta_0$ , и кривой, касательной к этой окружности и проходящей через точку  $a$ . Величина радиуса  $R_0$  может либо варьироваться, либо быть выбрана настолько малой, насколько это допустимо по условиям теплопередачи и безотрывного течения. Кривая, касающаяся окружности в зачерненных на фиг. 1 точках и проходящая через точку  $a$ , может отыскиваться среди кривых, описываемых полиномами  $m$ -й степени.

Коэффициенты полинома, описывающего профиль сопла, должны удовлетворять условиям касания с окружностью, прохождения через заданную точку и обеспечения наибольшего импульса, достижимый для данного семейства кривых. Вследствие приближенности начальных данных точное абсолютное значение импульса не может быть получено. Однако имеется возможность сравнивать между собой приращения импульсов в соплах с различными профилями сверхзвуковой части и одинаковыми начальными данными. Расчет приращения удельного импульса с высокой точностью при небольших затратах времени [8] позволяет решить поставленную задачу.



Фиг. 1

Целесообразно степень полинома принять минимально возможной. Опыт расчетов так же, как и исследования [12], показывает, что полином третьей степени с высокой точностью обеспечивает приближение к оптимальному профилю, т. е. профилю, обеспечивающему наибольшее значение импульса. (В дальнейшем оптимальный профиль, выбранный на основании методики построения сопел для газообразных продуктов, для краткости называется «исходным»).

Точность аппроксимации исходного профиля полиномом третьей степени обеспечивает отличие в расчетных значениях удельного импульса на один-два порядка меньше значений, которые можно было бы принимать во внимание для практических целей. Ниже показано, что значительные отклонения профилей от исходного, на порядок превышающие возможную погрешность аппроксимации полиномом третьей степени, приводят к несущественным изменениям импульса. Семейство кривых, описываемых полиномом третьей степени при двух условиях (прохождения через заданную точку  $a$  и касания окружности  $R_0$ ), имеет два свободных параметра. Их удобно отождествлять с производными или углами на входе в сверхзвуковую часть сопла (в точке касания с окружностью  $R_0$  —  $\theta_1$ ) и на срезе ( $\theta_2$ ).

Располагая возможностью выполнения численного «эксперимента», т. е. расчетного определения удельного импульса для любых заданных углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , можно поставленную задачу свести к отысканию углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , обеспечивающих максимум удельного импульса  $I$ .

2. В реальном двухфазном потоке конденсат является полидисперсной системой. Частицы мелких фракций движутся ближе к стенке, чем частицы, размер которых используется в расчетах с монодисперсным конденсатом. В соответствии с известными расчетами [14] и простыми физическими представлениями частицы мелких фракций могут приближаться к стенке и соударяться с ней на концевом участке профилированного сопла. Траектории частиц всех размеров в коническом сопле практически параллельны стенке. В этом случае соударения не происходят. Соударения со стенкой частиц, движущихся с высокой скоростью, сопровождаются нежелательными явлениями разрушения стенки и снижения удельного импульса.

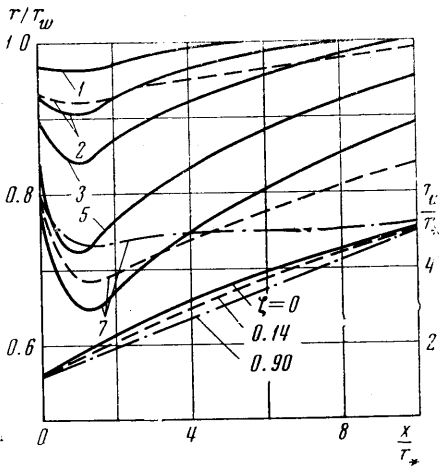
Эксперименты на двигателях с двухфазными продуктами сгорания, содержащими до 38% конденсированной окиси алюминия, показывают, что течение смеси в профилированных соплах сопровождается выносом частиц на стенку и снижением в этих случаях импульса против расчетного значения до 0.7% (см. публикацию Дж. Клингеля и Г. Никерсона [15]). Чтобы при профилировании сопла оценивать величину потерь удельного импульса от удара частиц о стенку, а также предотвратить или уменьшить этот эффект, необходимо иметь программу расчета на ЭВМ потока с полидисперсным конденсатом. Однако и имеющиеся программы расчета потоков с монодисперсным конденсатом позволяют учесть возможность выноса частиц на стенку сопла при выборе сверхзвукового профиля.

Расчеты позволяют получить качественную картину движения реальной (полидисперсной) системы конденсата. Для продуктов сгорания, содержащих около 30% конденсированных частиц окиси алюминия, рассчитано несколько вариантов начальных данных для частиц диаметром  $d$  от 1 до 7 мкм.

Эти начальные данные использовались при расчете неравновесных течений в сопле (радиус критического сечения  $r_* = 100$  мкм), исходный сверхзвуковой профиль которого имел длину  $L_a = 10.5r_*$ , радиус на срезе  $r_a = 5.2r_*$ , углы  $\theta_1 = 32^\circ$  и  $\theta_2 = 14^\circ$ .

Для каждого варианта размеры частиц  $d$  различны, поэтому и параметры потока в одних и тех же сечениях сопла имеют различия. Так, зона чистого газа около стенки существенно сужается при уменьшении размеров частиц. Параметры газа на стенке практически одинаковы во всех случаях. Числа Маха ( $M$ ) на оси в случае крупных частиц меньше на 8–10% вследствие большой концентрации из-за значительного радиального запаздывания конденсата. Преимущество проведенных расчетов неравновесных течений по сравнению с расчетами траекторий частиц в поле газа, найденном для равновесного течения подобно [14], состоит в учете наличия около стенки зоны течения газа, свободного от частиц и имеющего существенно более высокую скорость. Это делает более близкими к реальности результаты расчета инерционного попадания частиц на стенку.

Исходный профиль и граничные траектории различных частиц в потоке ( $d = 1-7$  мкм) для этого профиля изображены на фиг. 2 сплошными линиями. (На фиг. 2 траектории помечены цифрами, численно соответствующими диаметру  $d$  частицы в мкм.) Видно, что частицы с  $d =$



Фиг. 2

$= 1$  мкм выносятся на стенку сопла уже на длине  $\sim 0.6L_a$ . В этом случае лишь частицы с  $d < 3.5-4$  мкм будут попадать на стенку сопла. Проведенные расчеты не дают количественной оценки величины потерь удельного импульса на стенку частиц. Однако факт наличия таких потерь и появление возможности разрушения материала концевых участков сопел очевидны.

Существенным также оказывается следующее. Изменение исходного сверхзвукового профиля рассмотренного сопла в сторону приближения к конусу, так что  $\theta_1 = 27^\circ 30'$ , а  $\theta_2 = 15^\circ$ , удаляет траектории частиц от стенки и уменьшает размер  $d$  частиц, выносимых на стенку. На фиг. 2 этот профиль и траектории частиц в сопле с измененным профилем изображены штриховыми линиями. В этом случае размер частиц, выносимых на стенку сопла, уже снижается от 3.5–4 до 1.5–2 мкм. Расчеты потоков в конических соплах подтверждают результаты экспериментов (например, в [15] публикация Клигеля и Никерсона) об отсутствии выноса частиц на стенку конических профилей. На фиг. 2 коническое сопло с  $\theta_1 = \theta_2 = 21^\circ 7'$  и граничная траектория частиц размером  $d = 7$  мкм изображены штрих-пунктирной линией; она практически параллельна стенке.

3. При варьировании характерных углов в диапазонах  $\theta_1 = 17^\circ-28^\circ$ ,  $\theta_2 = 4^\circ-10^\circ$  рассчитано семейство сверхзвуковых профилей, описываемых полиномом третьей степени, для сопла с  $r_* = 80$  мкм. Радиус  $R_0$  принимался постоянным и равным  $0.4r_*$ . Изменение его в широких пределах (от  $0.1r_*$  до  $2r_*$ ) не оказывает заметного влияния на величину максимального импульса. Участок сопла, описываемый сопрягающей окружностью этого радиуса, невелик и на графике не изображается. Один из профилей, у которого  $\theta_1 = 24^\circ$  и  $\theta_2 = 8^\circ$ , аппроксимирует исходный профиль для сопла  $L_a = 7.9r_*$ ,  $r_a = 3.3r_*$ . По результатам расчетов (без учета потерь на трение о стенки сопла), построены зависимости удельного импульса  $I$  от углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ .

В расчетах рассмотрены продукты, содержащие 31% конденсата (с учетом выноса частиц на стенку сопла в дозвуковой части), имеющие показатель изэнтропии для равновесного расширения двухфазной смеси  $n = 1.13$  и молекулярный вес газовой фазы  $\mu = 18$  кг/моль. Давление в сечении  $x_+$  принято равным 40 бар, размер частиц  $d = 10$  мкм. В этих же соплах рассчитано течение газа, представляющего собой равновесную двухфазную смесь. Молекулярный вес газа равен молекулярному весу двухфазной смеси

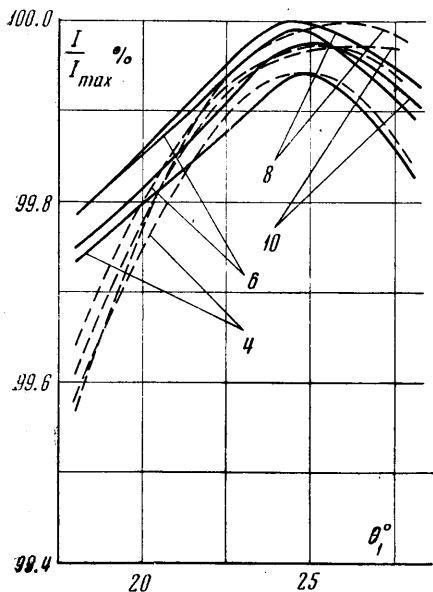
$$\mu_z = \frac{\mu}{1-z}$$

и отношение теплоемкостей

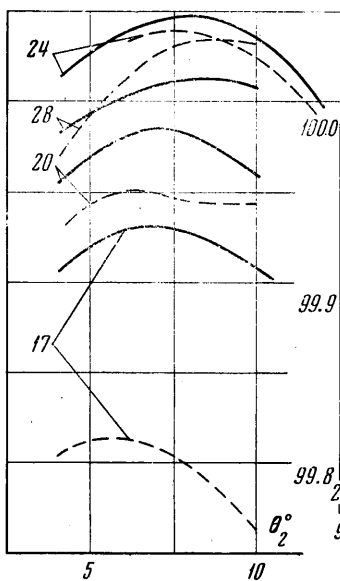
$$\kappa = c_p / c_v = 1.13$$

Точность расчетов по импульсу, расходу и энергии обеспечена программой в пределах 0.1% [9].

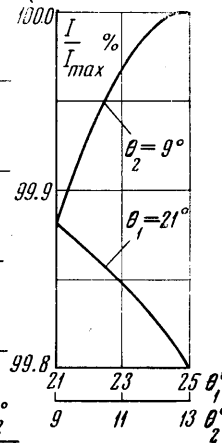
Зависимости  $I$  от  $\theta_1$  для неравновесных и равновесных (штриховые линии) течений изображены на графиках фиг. 3 ( $I$  отнесены к наибольшему значению удельного импульса  $I_{max}$ , достижимого для профилей рассмотренного семейства, причем для неравновесных течений  $I_{max} < I_{max}$  равновесных течений). Наибольшее значение ( $I_{max}$ ) удельного импульса для неравновесных течений достигается при  $\theta_1 \approx$



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

$\approx 25^\circ$  и  $\theta_2 = 8^\circ$  (цифры на графиках фиг. 3 численно соответствуют величинам углов  $\theta_2$  в градусах). Необходимо отметить, что соответствующий профиль практически совпадает с исходным профилем, построенным для газа по существующей методике [11]. Важным результатом является то, что при значительных изменениях профиля  $I$  изменяется практически незначительно.

Варьирование  $\theta_1$  в диапазоне  $\sim (17^\circ - 30^\circ)$  для всех исследуемых  $\theta_2$  изменяет  $I$  всего на 0.2—0.3%. Для равновесных течений  $I_{max}$  расположен при  $\theta_1 \approx 26^\circ$  и  $\theta_2 = 8^\circ$ . Варьирование  $\theta_1$  в том же диапазоне углов изменяет  $I$  равновесных течений на  $\sim 0.4 - 0.6\%$ . Для неравновесных течений уменьшение  $\theta_1$  ниже оптимального значения увеличивает потери от непараллельности потока на срезе, но уменьшает потери, связанные с отставанием частиц, вследствие снижения градиента скорости вблизи горловины сопла. Противоположное действие этих факторов для неравновесного двухфазного сечения является причиной ослабления зависимости импульса от характеристик профиля по сравнению с зависимостью для чистого газа.

На фиг. 4 графики неравновесных течений даны сплошными линиями, равновесных — штриховыми линиями; числа, обозначающие кривые, соответствуют числовым значениям углов  $\theta_1$ . Из графиков фиг. 4 следует, что изменение  $\theta_2$  от  $4^\circ$  до  $12^\circ$  при всех фиксированных в диапазоне  $17^\circ - 28^\circ$  значениях  $\theta_1$  приводит к изменению  $I$  как для равновесных, так и для неравновесных течений на  $\sim 0.1\%$ . (Известно, что при варьировании всего контура сопла, включая до- и трансзвуковую области, эти изменения  $I$  для равновесных течений газа могут составить  $\sim 0.5\%$ .)

Слабое изменение удельного импульса при значительном отклонении сверхзвукового профиля от оптимального в случае двухфазного неравновесного течения позволяет из нескольких профилей выбрать более приемлемый по условиям уменьшения выноса конденсата на стенку сопла или по иным, например технологическим, соображениям.

При оценке влияния характеристик профиля на величину  $I$  необходимо принимать во внимание изменение веса конструкции, связанное с изменением габаритов

сопла, и потери удельного импульса на трение. На изменение веса конструкции влияет изменение длины ( $L_a$ ) и степени расширения сопла ( $r_a$ ). Для учета влияния веса на изменение дальности полета аппарата может использоваться [11] понятие «весового эквивалента удельного импульса» ( $I_e$ ).

Расчеты потерь  $I$  на трение должны проводиться с использованием локальных значений параметров газа вдоль стенки сопла, полученных на основе результатов расчета неравновесного двухфазного потока. Выполненные расчеты показывают, что при варьировании сверхзвуковых профилей с целью отыскания оптимального профиля допустимо потери на трение не принимать во внимание, так как последние изменяются незначительно в широком диапазоне значений углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ .

4. Разработанные для ЭВМ программы расчета (например, [8]), как уже говорилось выше, позволяют решить задачу по отысканию среди некоторого семейства кривых сверхзвукового профиля, обеспечивающего максимальный удельный импульс с учетом потерь на трение или максимальное приращение скорости аппарата при каких-либо ограничениях. В общем случае в результате решения поставленной задачи должны быть найдены длина ( $L_a$ ), степень расширения сопла ( $r_a$ ) и значения коэффициентов полинома, обеспечивающие, например, наибольшую величину удельного импульса в пустоте. Если учитывать приращение скорости аппарата, то следует отыскивать экстремум функции  $I_e$ , учитывающей изменение веса конструкции.

Однако результаты, изложенные выше, дают основания задавать и  $L_a$  и  $r_a$  на основе существующей методики выбора сопла для газообразных продуктов (длина сопла  $L_a$  может быть несколько укорочена после корректировки с учетом доли частиц, выносимых на концевой участок сверхзвукового профиля).

Тогда для неравновесного двухфазного потока должны быть выбраны углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Задачу отыскания  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , обеспечивающих максимальное значение  $I$ , целесообразно решать методом поочередного поиска экстремума по каждой переменной (методом сечений) [16], поскольку главные оси симметрии линий уровней ( $I = \text{const}$ ) параллельны осям координат  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Для рассматриваемого семейства профилей использование этого метода приводит к определению экстремальных значений  $\theta_1$  и  $\theta_2$  с первого же приближения, что является достаточно очевидным (см. фиг. 3, 4).

Одновременно необходимо учитывать еще и возможность выноса частиц на концевой участок стенки сопла. На фиг. 2 сверхзвуковой профиль с  $\theta_1 = 27^\circ 30'$  и  $\theta_2 = 15^\circ$  заметно снижает наибольший размер частиц, выносимых на стенку, по сравнению с исходным профилем. Однако значение удельного импульса для этого профиля отличается от  $I_{\text{max}}$  всего на  $\zeta = (1 - I/I_{\text{max}}) = 0.14\%$  (коническое сопло, изображенное на фиг. 2, заметно уменьшает  $I$  исходного профиля:  $\zeta = 0.9\%$ ).

На основании изложенного может быть принята примерная схема профилирования сверхзвуковых частей сопел, работающих на двухфазных продуктах, которую следует рассматривать как предварительную.

Выбирается в качестве исходного сверхзвуковой профиль, построенный по методу профилирования сопел для газообразных продуктов сгорания. При этом оптимальная степень расширения ( $r_a$ ) и длина ( $L_a$ ) могут быть скорректированы в связи с возможным выносом частиц на стенку.

Ввиду отсутствия количественной информации о потерях импульса вследствие выноса частиц мелких фракций на концевой участок сопла проводится модификация исходного профиля с целью максимального уменьшения выноса частиц на стенку (для этого должен быть уменьшен угол  $\theta_1$  и увеличен  $\theta_2$ ) при практически несущественном (например, 0.1–0.3%) снижении импульса. Полученный профиль с новыми значениями углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  принимается в качестве расчетного.

Изложенную схему иллюстрируют графики  $I/I_{\text{max}} = f(\theta_1, \theta_2)$  на фиг. 5. Начальные значения углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , полученные аппроксимацией оптимального профиля, который построен для газа, равны  $\theta_1 = 25^\circ$  и  $\theta_2 = 9^\circ$ . При этом расчетное значение  $I = I_{\text{max}}$ . При  $\theta_2 = 9^\circ = \text{const}$  выполнены расчеты на значениях  $\theta_1 = 23^\circ$  и  $21^\circ$ . От уменьшения  $\theta_1$  значение  $I$  снизилось на  $\zeta = 0.12\%$ . Затем при  $\theta_1 = 21^\circ = \text{const}$  проделан расчет на увеличенном значении  $\theta_2 = 13^\circ$ . В результате суммарное  $\zeta_{\Sigma} = 0.2\%$ . Выбранный профиль, описанный полиномом третьей степени при  $\theta_1 = 21^\circ$  и  $\theta_2 = 13^\circ$ , должен существенно уменьшить вынос частиц конденсата на стенку сопла. Вследствие этого должно также несколько увеличиться реальное значение  $I$ .

Поступило 13 III 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Marble F. E. Nozzle contour for minimum particle-lag loss. AIAA Journal, 1963, vol. 1, No. 12. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1963, № 12.)
2. Стернин Л. Е. Экстремальные контуры сопел для потоков газа с отставанием частиц. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 5.
3. Крайко А. Н., Старков В. К., Стернин Л. Е. Решение в одномерном приближении вариационной задачи о построении сопла максимальной тяги при течениях газа с инородными частицами. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 4.

4. Гришин С. Д., Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. Неравновесное двухфазное течение в сопле Лавала с коагулирующей частиц полидисперсного конденсата. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 2.
5. Hoffman J. D., Thompson H. D. A general method for determining optimum thrust nozzle contour for gas-particle flows. AIAA Paper No. 66-538, 1966. (Рус. перев.: Вопр. ракет. техн., 1967, № 3).
6. Hoffman J. D., Thompson H. D. Optimum thrust-nozzle contours for gas-particle flows. AIAA Journal, 1967, vol. 5, No. 10. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1967, т. 5, № 10.)
7. Крайко А. Н., Осипов А. А. К решению вариационных задач сверхзвуковых течений газа с инородными частицами. ПММ, 1968, т. 32, вып. 4.
8. Дритов Г. В., Тишин А. П. Расчет неравновесного течения газа с частицами конденсата в сопле Лавала. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
9. Гонор А. А., Крайко А. Н. Некоторые результаты исследования оптимальных форм при сверх- и гиперзвуковых скоростях. В кн.: «Теория оптимальных аэродинамических форм», М., «Мир», 1969.
10. Крайко А. Н., Мельников Д. А., Пирумов У. Г., Сергеенко А. А., Стернин Л. Е., Шмыглевский Ю. Д. Замечания к статье Л. В. Гогиша «Исследование коротких сверхзвуковых сопел» (Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 2). Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 1.
11. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М., «Машиностроение», 1969.
12. Верещака Л. П., Галюн Н. С., Крайко А. Н., Стернин Л. Е. Результаты расчета методом характеристик течения газа с частицами в осесимметричных соплах и сравнение с результатами одномерного приближения. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 3.
13. Rao G. V. R. Approximation of optimum thrust nozzle contour. ARS Journal, 1960, vol. 30, No 6.
14. Baily W. S., Nilson E. N., Serra R. A., Zupnik T. F. Gas-particle flow in an axi-symmetric nozzle. ARS Journal, 1961, vol. 31, No 6.
15. Detonation and two-phase flow. New York — London, Acad. Press, 1962. (Рус. перев.: Детонация и двухфазное течение. М., «Мир», 1966.)
16. Wilde D. J. Optimum seeking methods. Prentice-Hall inc. Englewood Cliffs, N. Y., 1964. (Рус. перев.: Методы поиска экстремума. М., «Наука», 1967.)

## РАСЧЕТ ДВУХФАЗНЫХ ПОТЕРЬ В СОПЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ КОАГУЛЯЦИЙ И ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ КОНДЕНСАТА

Г. Л. БАБУХА, Л. Е. СТЕРНИН, А. А. ШРАЙБЕР

(Киев, Москва)

Приводится метод и результаты расчета неравновесного течения двухфазной смеси газ — капли конденсата с учетом коагуляции и дробления частиц при соударениях.

Течение двухфазных смесей, состоящих из газа и полидисперсных капель жидкости, представляет интерес для многих областей техники. Соударения капель различной дисперсности в зависимости от ряда факторов могут приводить к объединению, либо к дроблению столкнувшихся частиц. Двухфазные потери удельного импульса, связанные с температурным и скоростным отставанием капель от газового потока, в первую очередь определяются преобладанием того или иного из этих явлений.

Известен ряд работ, посвященных анализу неравновесного течения смеси при условии полного объединения соударяющихся частиц (см. обзоры в [1, 2]). В наиболее общей постановке эта задача рассматривается в работе [2], однако здесь не учитывается возможность дробления капель при соударениях. Ниже приводятся результаты исследования этого вопроса с учетом объединения и дробления частиц.

Прежде всего было предпринято экспериментальное исследование взаимодействия неподвижной крупной капли (мишени) с потоком мелких (снарядов), движущихся с различными скоростями. В качестве генератора снарядов использовался вращающийся в горизонтальной плоскости капилляр, из конца которого по касательным к описываемой им окружности двигался поток монодисперсных капель. Получение капель одинакового размера обеспечивалось наложением колебаний звуковой частоты на конец капилляра. Диаметр и скорость снарядов регулировались количеством оборотов, длиной и диаметром капилляра и составляли  $\delta_j = 100 \div 400 \text{ мкм}$ ,  $u_j = 10 \div 30 \text{ м/сек}$ .