

УДК 532.525.2

© 1998 г. Ю.Г. ЖУЛЕВ, Н.Т. МАЛЛАБАЕВ, А.Г. НАЛИВАЙКО

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАЗМЫВАЕМОСТИ СПУТНЫХ СТРУЙ

Исследуется взаимодействие свободной струи с продольными вихрями, генерируемыми во внешнем потоке с помощью расположенных вблизи сопла вихреобразователей. Показано, что это взаимодействие может быть использовано для ускорения размываемости спутных струй, и рассматриваются преимущества такого метода воздействия на струи.

Известны различные методы ускорения размываемости затопленных и спутных струй. Например, увеличение начальной неравномерности или начальной турбулентности струи; использование сопел с различного рода перфорированными насадками, деформирующими поперечное сечение струи; установка на соплах и погружаемых в струю вихреобразователей, генерирующих в струе вихревые структуры [1–3].

Однако все известные методы ускорения размываемости приводят к уменьшению импульса струи. Поэтому был предложен и рассмотрен метод ускорения размываемости спутных струй, который позволяет избежать потерь импульса струи. Была исследована возможность ускорения размываемости спутных струй с помощью продольных вихрей от вихреобразователей, которые располагаются не в струе, как в одном из упомянутых выше методов (что вызывает уменьшение импульса струи), а вблизи сопла во внешнем спутном потоке. В качестве вихреобразователей рассматривались расположенные под углом к набегающему потоку пластины. При этом струя начнет деформироваться продольными вихрями после истечения из сопла и эта деформация не будет изменять импульс струи.

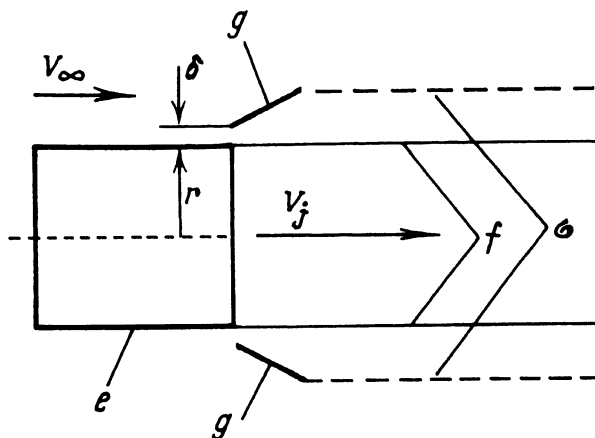
Для доказательства принципиальной возможности такого метода была решена задача о трехмерной струе невязкой несжимаемой жидкости, истекающей из имитатора двигателя в спутный поток. Решение задачи было получено методом дискретных вихрей [4]. Принципиальная расчетная схема, согласно этому методу, для случая двух пластин-вихреобразователей показана на фиг. 1, где  $e$  – имитатор двигателя;  $g$  – пластины-вихреобразователи;  $V_\infty$  и  $V_j$  – скорость внешнего потока и струи на выходе из сопла;  $f$  – поверхность струи;  $\sigma$  – поверхность вихревой пелены, сбегаящей с вихреобразователя. Поле течения состоит из областей с различными полными давлениями (области внешнего потока и струи). В этих областях расположены твердые поверхности  $e$  и  $g$  и жидкие поверхности  $f$  и  $\sigma$ . Течение вне твердых и жидких поверхностей считается безвихревым и поэтому потенциалы течений  $\Phi$  для области внешнего потока и  $\Phi_j$  для области струи должны удовлетворять уравнению Лапласа со следующими граничными условиями:

$$\Delta\Phi = 0, \quad \Delta\Phi_j = 0 \quad (1)$$

$$(\nabla\Phi, \mathbf{n}) = 0, \quad (\nabla\Phi_j, \mathbf{n}) = 0 \quad (2)$$

$$(p^+ - p^-) = 0 \quad (3)$$

Соотношение (2) – непротекание на твердых поверхностях (вихреобразователи  $g$  и имитатор двигателя  $e$ ) и на жидких (граница струи  $f$  и поверхность вихревой пелены  $\sigma$ ).



Фиг. 1. Принципиальная расчетная схема

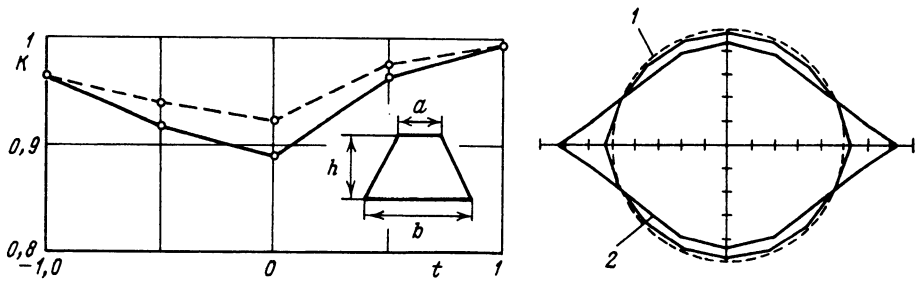
Соотношение (3) – непрерывность статического давления на границе струи  $f$  и на поверхности вихревой пелены  $\sigma$ .

В соответствии с примененным методом непрерывные вихревые слои  $e$ ,  $g$ ,  $f$  и  $\sigma$  заменяются дискретными вихревыми отрезками. При этом имитатор двигателя заменяется многогранным полым цилиндром, а его поверхность и поверхности пластин-вихреобразователей и струи делятся продольными и поперечными линиями на четырехугольные панели, на стороны которых сажаются продольные и поперечные вихревые отрезки, образующие подковообразные вихри. Поверхность вихревой пелены от вихреобразователей заменяется продольными вихрями, являющимися продолжением подковообразных вихрей, расположенных на вихреобразователях. На каждой панели располагаются контрольные точки, в которых должны выполняться граничные условия, а продольные вихри от вихреобразователей направляются по линиям тока. Поле скоростей складывается из скорости набегающего потока и скоростей, индуцируемых вихрями на границах струи, твердых поверхностей и вихревой пелены. Количество граничных условий оказывается достаточным для определения циркуляции всех вихрей и построения границ струи и вихревой пелены.

Правомерность такого расчетного метода неоднократно доказывалась при исследовании различных случаев взаимодействия струй с поверхностями (в частности, с крыльями [4]).

При проведении расчетных исследований за показатель интенсивности размываемости принималась степень деформации поперечного сечения струи, так как она характеризует не только увеличение поверхности для турбулентного перемешивания в реальных струях, но и интенсивность циркуляционных течений от продольных вихрей. В качестве критерия степени деформации поперечного сечения струи для определения эффективности исследуемого метода использовалось отношение периметра сопла, из которого струя истекает, к периметру деформированного поперечного сечения. Степень деформации равна единице на выходе из сопла и уменьшается при увеличении деформации поперечного сечения струи.

На фиг. 2 показана конфигурация исследованных вихреобразователей, где сторона пластины-вихреобразователя с размером  $a$  расположена вблизи кромки сопла на расстоянии  $\delta$  (см. фиг. 1). На фиг. 2 приведены также оценки степени деформации поперечного сечения  $K$  по принятому критерию и даны очертания поперечных сечений струи на расстоянии от сопла 4 калибра для двух конфигураций вихреобразователей, при которых имеет место максимальная (линия 2) и минимальная (линия 1) деформация поперечного сечения струи. Для других конфигураций вихреобразователей очертания поперечных сечений располагаются между приведенными контурами. Штриховой



Фиг. 2. Оценка эффективности вихреобразователей различной конфигурации. Зависимость коэффициента размываемости  $K$  от  $t = (b - a)/2h$  и поперечные сечения струи (линии 1, 2 –  $t = 1; 0$ , штриховая линия – контур сопла)

линией показан контур сопла. Расчеты проводились для следующих условий: отношение зазора между основанием вихреобразователя и кромкой сопла к радиусу сопла  $\delta/r = 0,2$ ; угол наклона вихреобразователя к направлению потока  $\varphi = 30^\circ$ ; размеры пластины-вихреобразователя  $h = 0,5r$  и, либо  $b = r$  и  $a < r$ , либо  $b < r$  и  $a = r$ ; коэффициент спутности  $m = V_\infty/V_j = 0,5$ . Наибольшую деформацию обеспечивают вихреобразователи прямоугольной формы ( $a = b$ ), а наименьшую – вихреобразователи треугольной формы, когда вблизи кромки сопла располагается вершина треугольной пластины ( $a = 0$ ). На фиг. 3 для примера представлен общий вид деформированной струи на участке в 6 калибров от сопла для варианта вихреобразователя  $a = b$ .

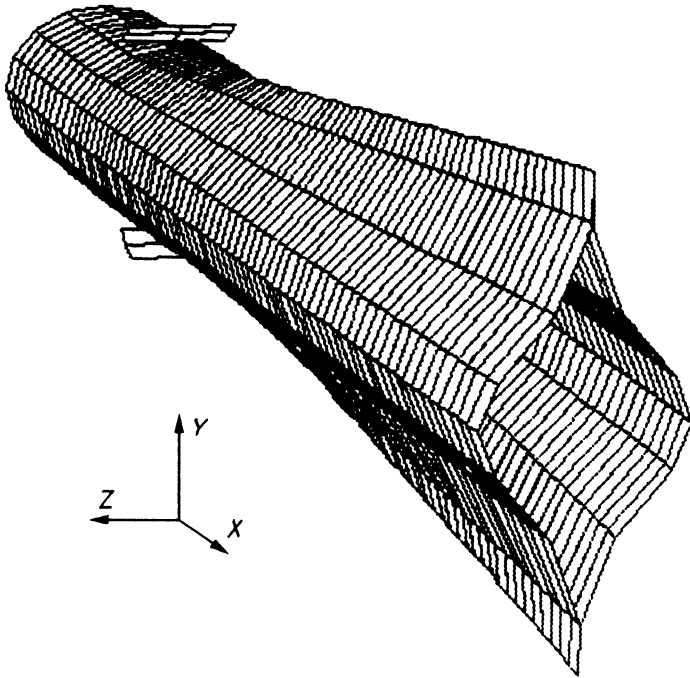
Представленные на фиг. 2 результаты соответствуют вихреобразователям не только различной формы, но и различной площади (площадь вихреобразователя прямоугольной формы вдвое превышает площадь вихреобразователя треугольной формы). Результаты расчета для одинаковой площади вихреобразователей (равной площади треугольных вихреобразователей) представлены штриховой линией на фиг. 2. В этом случае остается, хотя и в меньшей степени, преимущество вихреобразователей прямоугольной формы.

Более подробные расчеты были проделаны для варианта  $(a-a)/2h = -0,5$ , который мало отличается по эффективности от вихреобразователя прямоугольной формы, но имеет меньшую площадь. Было исследовано влияние на эффективность вихреобразователей следующих факторов: величины зазора  $\delta$  между основанием вихреобразователя и кромкой сопла, площади вихреобразователей  $S$ , величины коэффициента спутности  $m$ .

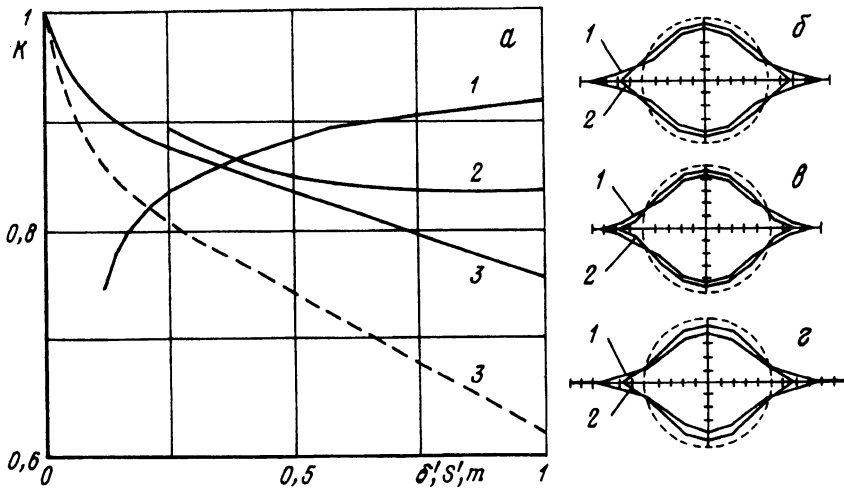
Результаты расчетов представлены на фиг. 4, а, где приведены зависимости степени деформации поперечного сечения струи от перечисленных параметров, и на фиг. 4, б–г, где даны контуры поперечного сечения струи на расстоянии четырех калибров от сопла при крайних значениях перечисленных параметров.

При уменьшении зазора от значения  $\delta = 0,2r$ , принятого на фиг. 2, эффективность вихреобразователей заметно увеличивается. Уменьшение площади вихреобразователей от принятой на фиг. 2 (на фиг. 4 она обозначена  $S_0$ ) приводит к уменьшению их эффективности. Тем не менее заметная деформация струи сохраняется даже при значительном (в 4 раза) уменьшении площади вихреобразователей. Увеличение коэффициента спутности увеличивает эффективность вихреобразователей, что объясняется усилением продольных вихрей от вихреобразователей при увеличении скорости спутного потока. Такая зависимость эффективности вихреобразователей от коэффициента спутности является достоинством рассматриваемого метода, так как скорость размывания обычных спутных струй уменьшается с увеличением коэффициента спутности.

Расчеты при различном значении коэффициента спутности повторялись для случая использования четырех вихреобразователей вместо двух, но при сохранении общей

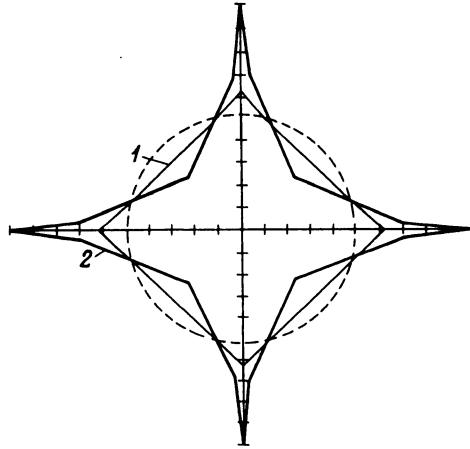


Фиг. 3. Общий вид деформированной струи при двух вихреобразователях



Фиг. 4. Оценка влияния на размываемость геометрических параметров вихреобразователей и коэффициента спутности: *a* – зависимость коэффициента размываемости  $K$  от  $\delta' = 5\delta/r$ ,  $S' = S/S_0$ ,  $m$  (линии 1–3); *б* – поперечные сечения струи для  $S' = 1$ ,  $m = 0,5$ . Линии 1, 2 –  $\delta/r = 0,025$ ; 0,2, штриховая линия – контур сопла; *в* – поперечные сечения струи для  $m = 0,5$ ,  $\delta/r = 0,05$ . Линии 1, 2 –  $S' = 1$ ; 0,25; штриховая линия – контур сопла; *г* – поперечные сечения струи для  $S' = 1$ ,  $\delta/r = 0,05$ . Линии 1, 2 –  $m = 0,8$ ; 0,2, штриховая линия – контур сопла

площади вихреобразователей. Было установлено, что имеет место некоторое увеличение эффективности (штриховая линия на фиг. 4, *a*). На фиг. 5 даны очертания поперечных сечений струи на расстоянии от сопла 4 калибра для четырех вихреобразователей и двух значений коэффициента спутности. Штриховой линией показан контур сопла.



Фиг. 5. Поперечные сечения струи для четырех вихреобразователей. Линии 1, 2 – для коэффициента спутности  $m = 0,2; 0,8$ , штриховая линия – контур сопла

**Заключение.** Проведенное исследование доказывает возможность увеличения ускорения размываемости спутных струй с помощью вихреобразователей, расположенных не в струе, а во внешнем потоке, что открывает возможность устранения падения импульса струи, присущего всем известным методам повышения размываемости струй.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Г.Н., Гиришович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др.* Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
2. *Ганич Г.А., Гущина Н.А., Жулев Ю.Г., Наливайко А.Г.* Воздействие на струи продольными вихрями // Уч. зап. ЦАГИ. 1993. Т. 24. № 4. С. 96–106.
3. *Zaman K.B.M.Q.* Streamwise vorticity generation and mixing enhancement in free jets by "delta-tabs" // AIAA Paper. 1993. № 3253. 13 p.
4. *Бабкин В.И., Белоцерковский С.М., Гуляев В.В., Дворак А.В.* Струи и несущие поверхности: Моделирование на ЭВМ. М.: Наука, 1989. 208 с.

Москва

Поступила в редакцию  
27.XII.1996