

но только одно симметричное решение задачи. Если увеличивать интенсивность стока, то при значении  $q=q_* \approx 0,43$  происходит бифуркация решения и при  $|q| > |q_*|$  существует три изолированных решения задачи — одно симметричное и два несимметричных.

О несимметрии решения удобно судить, например, по моменту крена, действующему на пластинку относительно ее центра, который легко вычисляется при известном расположении вихрей по формуле Блазиуса — Чаплыгина. Рассчитанные значения безразмерного момента крена  $M_0$  в зависимости от параметра  $|q|$  показаны на фиг. 2. Видно, что при  $|q| < |q_*|$  существует только одно симметричное решение задачи обтекания пластинки в присутствии пары присоединенных свободных вихресточков, для которого  $M_0=0$ . При значениях  $|q|$ , больших бифуркационного, от симметричного решения отщепляются несимметричные решения с положительным и отрицательным значениями момента крена. Там же показаны построенные картины поля течения для симметричного (а) и одного из несимметричных решений (б) для  $q=-0,5$ .

Таким образом, возникновение в данной модельной задаче несимметричных решений связано с бифуркацией симметричного решения при некотором критическом значении параметра задачи. Возможно, что и в трехмерных моделях возникновение несимметричного обтекания связано с бифуркацией и потерей устойчивости симметричного обтекания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ericsson L. E., Reding J. P. Steady and unsteady vortex-induced asymmetric loads on slender vehicles.— J. Spacecraft and Rockets, 1981, v. 18, № 2, p. 97—109.
2. Гогош Л. В., Степанов Г. Ю. Расчетная модель периодического отрывного обтекания пластины.— В сб.: Проблемы современной механики. Ч. 1. М.: 1983, с. 83—89.
3. Smith J. H. B., Clark R. W. Nonexistence of stationary vortices behind a two-dimensional normal plate.— AIAA Journal, 1975, v. 13, № 8, p. 1114—1115.
4. Гогош Л. В., Степанов Г. Ю. Турбулентные отрывные течения. М.: Наука, 1979. 367 с.
5. Hoijmakers H. W., Bennekens B. Computational model for the calculation of the flow about wings with leading-edge vortices.— AGARD Conf. Proc., 1978, № 247, p. 25.1—25.11.
6. Давиденко Д. Ф. Об одном новом методе численного решения систем нелинейных уравнений.— Докл. АН СССР, 1953, т. 88, № 4, с. 601—602.

Москва

Поступила в редакцию  
25.IV.1984

УДК 532.529

### О МЕХАНИЗМЕ НЕМОНОТОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗЫ ВДОЛЬ ОСИ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ

ЗУЕВ Ю. В., ЛААТС М. К., ЛЕПЕШИНСКИЙ И. А.

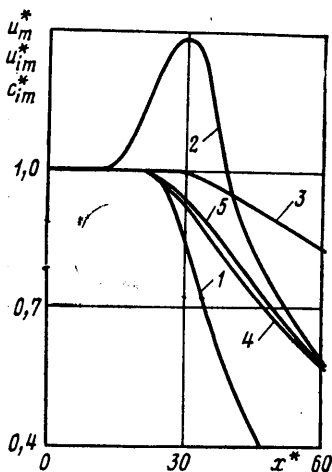
При экспериментальном исследовании турбулентной газовой струи с примесью твердых частиц [1] был выявлен эффект немонотонного изменения объемной концентрации дискретной фазы вдоль оси струи: на некотором расстоянии от среза трубы, из которой истекала струя, вблизи оси струи зафиксированы области с объемной концентрацией, превышающей ее начальное значение. Анализ такого изменения объемной концентрации частиц в двухфазной струе проводился рядом исследователей, но в их работах рассматривается, как правило, одна из возможных причин местного увеличения концентрации. Ниже делается попытка обобщить с учетом проведенных авторами данной статьи теоретических исследований имеющиеся в литературе данные по рассматриваемому вопросу, с тем чтобы дать по возможности более полное объяснение эффекту немонотонного изменения объемной концентрации частиц вдоль оси струи.

Одной из причин немонотонного изменения объемной концентрации частиц вдоль оси двухфазной струи является торможение частиц по длине струи [2]. Действительно, при удалении от сошла скорость газа в струе уменьшается, что влечет за собой уменьшение осевой скорости частиц. При этом по мере движения частиц вдоль оси струи происходит уменьшение расстояния между ними (предыдущие частицы движутся с меньшей скоростью, чем последующие вследствие их торможения), что приводит к местному увеличению объемной концентрации дискретной фазы.

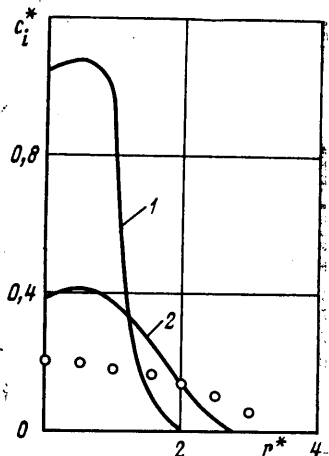
Наряду с торможением частиц на изменение их объемной концентрации сильное влияние оказывает и турбулентная диффузия [2], следствием которой является

рассеивание частиц в радиальном направлении и, следовательно, уменьшение концентрации дискретной фазы в струе. Поэтому зависимость объемной концентрации частиц от продольной координаты может быть монотонной, если преобладает диффузия, и немонотонной, если в некоторой области преобладает торможение частиц.

В настоящее время ввиду ограниченности данных экспериментального исследования детальный анализ влияния различных факторов на изменение объемной концентрации частиц в двухфазной струе возможен только на основании результатов теоретических расчетов, например расчетов, описанных в [3, 4] и основанных на решении системы уравнений двухфазной струи [5]. Величина максимальной объемной концентрации частиц в струе и характер ее изменения вдоль оси струи в значительной степени зависят от начальных значений плотности материала, объемной кон-



Фиг. 1



Фиг. 2

центрации и диаметра частиц, скольжения фаз, диаметра сопла и формы начальных полей параметров фаз струи [3, 4]. Особенно сильное влияние на монотонность изменения концентрации дискретной фазы в струе оказывает изменение диаметра частиц. На фиг. 1 кривыми 1–3 показано изменение вдоль оси струи объемной концентрации дискретной фазы для трех относительных значений диаметра частиц:  $D_i^* = 0,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$  соответственно. Под относительным диаметром частиц  $D_i^*$  здесь понимается отношение диаметра частиц к радиусу сопла. Безразмерная координата  $x^*$  является отношением координаты  $x$  к радиусу сопла  $r_c$ . Кривой 4 на фиг. 1 изображено изменение скорости газа, а кривой 5 – изменение скорости частиц вдоль оси струи с частицами  $D_i^* = 10^{-3}$ . Безразмерные начальные значения параметров струи при проведении этого расчета были выбраны следующими: поля всех параметров фаз в начальном сечении струи равномерные,  $v_i = u_i/u = 1$ ,  $c_i = 1,23 \cdot 10^{-3}$ ,  $\rho^* = \rho/\rho_i = 1,23 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re = \rho u D_i/\mu = 175$  ( $\rho$ ,  $u$  и  $\mu$  – плотность и коэффициент динамической вязкости газа,  $\rho_i$  и  $u_i$  – плотность и скорость частиц, в данном случае – капель воды). Из графиков этой фигуры видно, что при выбранных значениях диаметра частиц увеличение объемной концентрации частиц на оси струи происходит только в случае  $D_i^* = 10^{-3}$ , в струе с  $D_i^* = 0,2 \cdot 10^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{-3}$  объемная концентрация частиц вдоль оси струи уменьшается монотонно. Результаты этого расчета качественно согласуются с результатами эксперимента [1].

Из фиг. 1 следует, что увеличение концентрации частиц на оси струи с  $D_i^* = 10^{-3}$  начинается при неизменном значении их осевой скорости, что на первый взгляд противоречит изложенному выше. Но при более подробном анализе результатов расчета оказывается, что сначала зоны с повышенной объемной концентрацией частиц возникают в слое смещения на некотором расстоянии от оси струи, где частицы интенсивно тормозятся, а затем под действием турбулентной диффузии (согласно градиентной модели переноса) перемещаются как к границе, так и к оси струи, приводя к возрастанию объемной концентрации на оси струи, даже если осевая скорость частиц при этом остается постоянной. Далее, вследствие увеличения масштаба турбулентности по длине струи турбулентная диффузия, начиная с некоторого сечения струи, оказывает определяющее влияние на изменение объемной концентрации дискретной фазы, что приводит к уменьшению этой концентрации вдоль оси струи.

Все изложенное выше относится к газоканальным струям, в которых обычно отсутствует начальная угловая скорость вращения частиц (капель) и поперечными силами (подъемной и Магнуса) можно пренебречь [3].

На течение газовой струи с твердыми частицами сильное влияние может оказывать предыстория течения в канале, из которого истекает струя. Как правило, при

течении частиц в канале (трубе, сопле) они соударяются со стенками этого канала и приобретают поперечную и угловую скорости, которые сохраняются значительное время и в струе, влияя на изменение ее параметров (особенно концентрации частиц) [6].

В зависимости от знака разности продольных скоростей газа и частиц в начальном сечении двухфазной струи на частицы, имеющие после столкновения со стенками канала большую угловую скорость вращения, будет действовать сила Магнуса, направленная либо к оси, либо к границе струи. В первом случае на оси струи будет наблюдаться рост объемной концентрации частиц, а во втором — ее интенсивное уменьшение.

Влияние начальной поперечной скорости частиц на изменение их концентрации в струе можно проиллюстрировать графиками на фиг. 2, где по оси абсцисс отложен безразмерный радиус струи  $r^* = r/r_c$  ( $r$  и  $r_c$  — текущий радиус струи и радиус сопла), а по оси ординат — безразмерная объемная концентрация частиц  $c_i^* = c_i/c_{i0}$  ( $c_{i0}$  — объемная концентрация частиц в начальном сечении струи). На этой фигуре проведено сопоставление полей объемной концентрации частиц в поперечном сечении струи на расстоянии 20 калибров от сопла, полученных экспериментально [7] (точки) и рассчитанных авторами статьи при условии, что поперечная скорость частиц в начальном сечении струи равна нулю (кривая 1) или изменяется по закону  $v_i^* = 0,02r^*$  (кривая 2), где  $v_i^* = v_i/u_{i0}$ ,  $v_i$  — местная поперечная скорость частиц,  $u_{i0}$  — продольная скорость частиц в начальном сечении струи. В эксперименте и расчете в начальном сечении струи поля параметров фаз были равномерными,  $v_i = 1$ ,  $c_i = 1,4 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_i^* = 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $\rho^* = 1,4 \cdot 10^{-4}$ ,  $Re = 102$ . Из фиг. 2 следует, что учет начальной поперечной скорости частиц значительно приближает результаты расчета к результатам эксперимента. Но чтобы добиться лучшего согласования теории с экспериментом в случае струи с твердыми частицами, необходимо учесть еще и поперечное перемещение частиц под действием силы Магнуса, обусловленной угловой скоростью вращения частиц, которую частицы получают при взаимодействии со стенками канала, из которого истекает струя. Последний эффект учтен в [6].

Таким образом, немонотонный характер изменения объемной концентрации частиц вдоль оси газок капельной струи обусловлен особенностями торможения частиц в струе, а в струе с твердыми частицами местное увеличение объемной концентрации дискретной фазы наряду с торможением частиц может быть следствием взаимодействия частиц со стенками канала, из которого истекает струя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лаатс М. К., Фришман Ф. А. О допущениях, применяемых при расчете двухфазной струи. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1970, № 2, с. 186–191.
2. Навознов О. И., Павельев А. А., Мульги А. С., Лаатс М. К. Влияние начального скольжения на рассеивание примеси в двухфазной струе. — В кн.: Турбулентные двухфазные течения. Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1979. Ч. 2, с. 149–157.
3. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А. Некоторые результаты расчета двухфазной турбулентной струи. — В кн.: Турбулентные двухфазные течения. Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1982. Ч. 1, с. 27–40.
4. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А. Влияние начального скольжения фаз в осредненном течении на распространение двухфазной турбулентной струи. — В кн.: Турбулентные двухфазные течения. Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1982. Ч. 1, с. 41–48.
5. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А. Математическая модель двухфазной турбулентной струи. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 6, с. 69–77.
6. Каргушинский А. И., Фришман Ф. А. Исследование влияния начальных условий на развитие двухфазной турбулентной струи. — В кн.: Турбулентные двухфазные течения. Таллин. Изд-во АН ЭССР, 1982. Ч. 1, с. 71–77.
7. Гиршович Т. А., Каргушинский А. И., Лаатс М. К., Леонов В. А., Мульги А. С. Экспериментальное исследование турбулентной струи, несущей тяжелые примеси. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 5, с. 26–31.

Москва,  
Таллин

Поступила в редакцию  
6.VI.1984