

сопла. С увеличением разности углов наклона образующих $\Delta\alpha$ к оси x увеличивается Δp , но полностью сохраняется подобие в особенностях развития неравномерности потока: в положении максимумов, в изменении знака параметра, характеризующего неравномерность поля течения.

Изменение Δp вдоль образующих сопла в плоскости симметрии в рассматриваемом диапазоне значения $\Delta\alpha$ указывает на линейную зависимость между величиной геометрической несимметрии у однопараметрического семейства сопел и неравномерностью газодинамических параметров потока. Зависимость изменения боковой силы F_y , действующей на дозвуковую часть сопла, от разности углов $\Delta\alpha$ также близка к линейной. При разности углов наклона образующих сужающейся части сопла к оси x 5, 10 и 14° значение боковой силы составило соответственно 1, 1.92 и 2.72% импульса сопла.

Расчеты выполнены на ЭВМ БЭСМ-6 по программам, составленным на алгоритмическом языке АЛГОЛ-60. Время счета варианта составило 3–4 час.

Автор благодарит М. Я. Иванова, А. Н. Крайко и Г. Г. Черного за помощь и обсуждение результатов работы.

Поступила 20 II 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики. Матем. сб., 1959, т. 47, № 3.
2. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6.
3. Иванов М. Я., Рылько О. А. Расчет трансзвукового течения в пространственных соплах. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1972, т. 12, № 5.
4. Иванов М. Я., Рылько О. А. К анализу трансзвукового течения в эллиптических соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 3.
5. Рычков А. Д., Ткаченко А. С. Исследование пространственного дозвукового течения идеального газа в каналах и соплах сложной формы с проницаемыми стенками. В сб. «Материалы 3-й Научной конференции Томского университета по математике и механике», вып. 2. Томск, Томск. ун-т, 1973.
6. Дворецкий В. М., Иванов М. Я. К расчету смешанного течения в соплах с несимметричной дозвуковой частью. Уч. зап. ЦАГИ, 1974, т. 5, № 5.
7. Нох В. Ф. СЭЛ – совместный эйлерово-лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач. В сб. «Вычислительные методы в гидродинамике». М., «Мир», 1967.
8. Пирумов У. Г. Пространственные до- и сверхзвуковые течения в соплах и каналах переменного сечения. Докл. АН СССР, 1972, т. 203, № 1.
9. Пирумов У. Г. Пространственные до- и сверхзвуковые течения в соплах и каналах переменного сечения. ПММ, 1972, т. 36, вып. 2.

УДК 533.6.011.6:532.517.6

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ НА ТЕПЛОБМЕН

А. Н. РУМЫНСКИЙ, М. В. СЕНКЕВИЧ

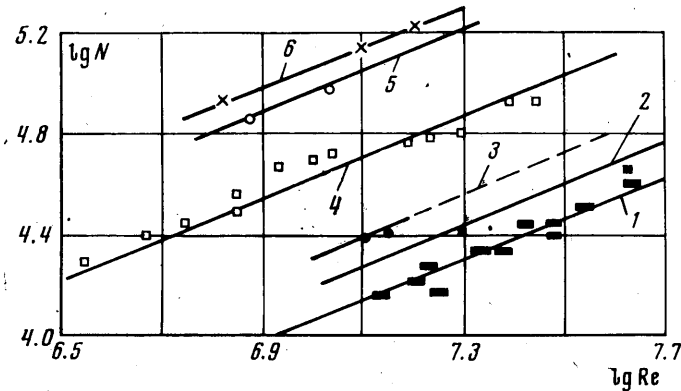
(Москва)

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния пульсаций потока на турбулентный теплообмен при поперечном направлении распространения звуковых волн. Зарегистрировано существенное увеличение интенсивности теплообмена при среднеквадратичной амплитуде пульсаций давления $p = 168 \div 180$ ∂b и частоте $f = 100 \div 150$ $гц$. Получены зависимости интенсивности теплообмена от характеристик акустического поля.

1. В последнее время опубликован ряд работ, посвященных исследованию влияния пульсаций на теплообмен [1–4]. Однако большинство исследований выполнено

для относительно малых амплитуд пульсаций. В этих условиях интенсификация теплообмена наблюдалась лишь при ламинарном течении в пограничном слое. В данной работе излагаются результаты экспериментального исследования влияния гармонических поперечных пульсаций потока повышенной амплитуды на турбулентный теплообмен.

Природа влияния мощных пульсаций внешнего потока на теплообмен в пограничном слое, очевидно, обусловлена интенсификацией процесса массообмена и переноса энергии между внешним потоком и внутренней частью пограничного слоя за счет изменения масштаба турбулентности и более глубокого проникновения частиц



Фиг. 1

жидкости из внешней части пограничного слоя, обладающей большей энергией, во внутреннюю.

Для получения мощных пульсаций потока использовался способ, аналогичный описанному в [5, 6] и позволяющий возбуждать симметричные поперечные колебания газа в канале эжектора.

Эксперименты проводились в цилиндрическом канале, течение в котором создавалось эжектирующим действием четырех сверхзвуковых струй, расположенных внутри канала по кольцу. Изменение амплитуды пульсаций потока достигалось перемещением источника струй вдоль оси канала в процессе эксперимента. Кроме того, в некоторых случаях амплитуда пульсаций регулировалась с помощью звукопоглотителей, установленных на внутренней поверхности эжектора. Степень нерасчетности истечения эжектирующих струй $\sim 0,7$.

По нескольким образующим канала измерялось продольное и поперечное распределение полного и статического давлений и температуры газа. На стенках эжектора измерялись среднее и пульсационное давления, а также тепловые потоки.

Среднеквадратичная погрешность определения коэффициента конвективной теплоотдачи $\pm 12\%$, числа Нуссельта $\pm 20\%$, числа Рейнольдса $\pm 15\%$. Погрешность измерения амплитуды пульсаций давления ± 3 дБ.

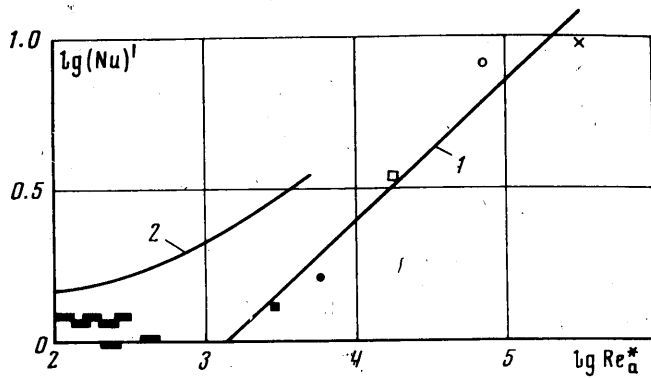
Влияние пульсаций на теплообмен исследовалось на участке смешения струй с эжектируемым потоком, где продольное и радиальное изменения скорости u и температуры потока T_0 вблизи внешней границы пристеночного пограничного слоя, а также неравномерность течения по периметру были незначительными и не превышали погрешности измерения.

Осредненное течение характеризовалось следующими параметрами: числами Рейнольдса $Re = 3.15 \cdot 10^6 \div 4.3 \cdot 10^7$, числами Маха $M = 0.2 \div 0.3$, температурными факторами $T_w/T_0 = 0.12 \div 0.2$.

Резонансная частота изменялась от 100 до 150 гц, причем амплитуда пульсаций на резонансной частоте превышала средний уровень на $10 \div 18$ дБ и достигала $168 \div 180$ дБ.

Следует отметить, что в экспериментах не удалось полностью устранить вибрацию стенок эжектора. Амплитуда ускорения вибраций в период резонансных колебаний достигала 100 м/сек², а частота соответствовала частоте колебаний газа в эжекторе.

Опыты показали, что интенсивность теплообмена изменялась в соответствии с изменением амплитуды пульсаций: возникновение резонансных колебаний газа в эжекторе сопровождалось значительным увеличением коэффициента конвективной теплоотдачи α к стенке.



Фиг. 2

На фиг. 1 приведены полученные при воздействии пульсаций давления различных частот и амплитуд опытные данные, обработанные в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса ($N=Nu/Pr^{0.4}=F(Re)$). В качестве характерного размера l при определении чисел $Nu=\alpha l/\lambda$ и $Re=\rho u l/\mu$ принималось расстояние от точки присоединения струи к поверхности эжектора до рассматриваемого сечения; плотность ρ , коэффициенты вязкости μ и теплопроводности λ , а также число Прандтля $Pr=\mu c_p/\lambda$ брались при определяющей температуре [7] $T=0.5(T_0+T_w)$, где T_0 — температура торможения потока, T_w — температура поверхности эжектора.

Условия экспериментов представлены в таблице.

Из фиг. 1 следует, что при среднеспектральном уровне пульсаций давления, не превышающем 140 δb , и отсутствии резонансных колебаний (кривая 1) интенсивность теплообмена с погрешностью, не превышающей погрешностей измерений ($\pm 20\%$), согласуется с известной зависимостью [7]: $Nu_0=0.0296 Re^{0.8} Pr^{0.4}$. Дальнейшее увеличение амплитуды пульсаций давления приводит к значительному увеличению интенсивности теплообмена тем большему, чем ниже частота пульсации (кривые 2–6). Наибольшая интенсификация теплообмена наблюдалась при амплитуде пульсаций 180 δb и частоте 100 $гц$ (кривая 6). Кроме того, из фиг. 1 видно, что в исследованном диапазоне чисел Re пульсации потока (при фиксированных Δp_a и f) практически не влияют на характер зависимости турбулентного теплообмена от числа Рейнольдса ($Nu \sim Re^{0.8}$).

№ кривой	$\Delta p_a, \delta b$	$f, гц$	$T_0, ^\circ K$
1	135 ÷ 140	—	2300
2	168	140	2300
3	172	150	2300
4	176	150	2300
5	178	100	2300
6	180	100	2400

2. На фиг. 2 приведена зависимость числа Нуссельта $(Nu)'=Nu/Nu_0$ от параметра

$$(2.1) \quad Re_a^* = (\Delta p_a)^2 / (\rho \omega \mu (T) \kappa)$$

Здесь Re_a^* — аналог «акустического числа Рейнольдса», введенного [1] в виде $Re_a = (a/\delta_a)^2$, где $a = u_a/\omega$ — амплитуда смещения частиц в акустическом поле, $\delta_a = (\mu/\rho\omega)^{0.5}$ — толщина акустического пограничного слоя, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота. При амплитудах пульсаций $\sim 170 \delta b$ параметр Re_a использовался в [3] для исследования влияния пульсаций потока на теплообмен в ламинарном пограничном слое при свободной конвекции. Очевидно, что в области линейной акустики $Re_a^* = Re_a = \rho u_a a / \mu$, так как в этом случае $u_a = \Delta p_a / \rho c$, где c — скорость звука.

Параметр Re_a^* удобен тем, что определяется величинами, непосредственно изменяемыми в эксперименте (амплитудой и частотой пульсации давления на стенке канала). Из (2.1) следует, что Re_a^* увеличивается с ростом амплитуды и уменьшением частоты пульсаций газа. Аналогично ведут себя и опытные данные по теплообмену, что свидетельствует о возможности использования Re_a^* в качестве параметра подобия для исследования взаимодействия нелинейного акустического поля с турбулентным пограничным слоем при вынужденной конвекции. Представленные на фиг. 2 результаты обработки экспериментальных данных в виде критериальной зависимости $Nu = f(Re_a^*)$ наглядно подтверждают такую возможность.

Из (2.1) также следует, что Re_a^* обратно пропорционален среднему статическому давлению в потоке p и температуре газа. К сожалению, влияние этих параметров на

интенсификацию теплообмена при наличии пульсаций выявить в данных экспериментах не удалось вследствие малого диапазона изменения указанных параметров.

Из фиг. 2 видно, что при $Re_a^* < 2 \cdot 10^3$ пульсации потока практически не влияют на турбулентный теплообмен при вынужденной конвекции. При $Re_a^* > 2 \cdot 10^3$ полученные для различных амплитуд и частот пульсаций опытные данные хорошо описываются единой зависимостью (кривая 1)

$$(2.2) \quad Nu/Nu_0 = 0.025 \sqrt{Re_a^*}, \quad 2 \cdot 10^3 \leq Re_a^* \leq 3 \cdot 10^5.$$

На той же фигуре приведены данные работы [3] по воздействию поперечных колебаний на свободную конвекцию у вертикальной пластины при $Re_a^* < 4.5 \cdot 10^3$ (кривая 2). Видно, что влияние пульсаций на теплообмен при вынужденной конвекции в турбулентном режиме существенно отличается от их влияния на теплообмен при свободной конвекции в ламинарном режиме. Интенсификация теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое начинается при значительно больших Re_a^* , чем при ламинарном, и увеличение интенсивности теплообмена при одинаковых Re_a^* существенно слабее. Показатель степени числа Re_a^* в пределах точности эксперимента оказался одинаковым для ламинарного и турбулентного теплообменов, что, возможно, связано с тем, что существенная интенсификация турбулентного теплообмена существует лишь при воздействии пульсаций на ламинарный подслой.

Поступила 30 II 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. *Westervelt P. J.* Effect of sound waves on heat transfer. *J. Acoust. Soc. America*, 1960, vol. 32, No. 3.
2. *Fand R. M., Kaye J.* The influence of sound on free convection from a horizontal cylinder. *Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer*, 1961, vol. 83, No. 2.
3. *June R. R., Baker M. J.* The effect of sound on free convection heat transfer from a vertical flat plate. *Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer*, 1963, vol. 85 C, No. 3.
4. *Junkhan G. H., Serovy G. K.* Effects of free-steam turbulence and pressure gradient on flat-plate boundary-layer velocity profiles and on heat transfer. *Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer*, 1967, vol. 89, No. 2.
5. *Седельников Т. X.* Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй. М., «Наука», 1971.
6. *Пылов Л. С.* О форме колебаний сверхзвуковой струи в эжекторе. IV Всес. акуст. конф. Москва, 1968. Доклад Ж II 1.
7. *Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М.* Теория тепло- и массообмена. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

УДК 533.6.011.72:534.26

ОБЩИЙ АНАЛИЗ КАРТИНЫ ДИФРАКЦИИ ПЛОСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НА КЛИНЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

А. В. ПАНАСЕНКО

(Москва)

Различные случаи дифракции плоской слабой ударной волны на движущемся со сверхзвуковой скоростью клине изучались в работах [1-4].

В данной работе в рамках единого подхода, основанного на последовательном применении метода характеристик в плоскости автомодельных переменных, проводится изучение и систематизация картин течения, возникающих при дифракции плоской слабой ударной волны на движущемся со сверхзвуковой скоростью клине. Исследованы все случаи как встречного, так и догонного взаимодействия ударных волн. Найдены некоторые новые типы течения.