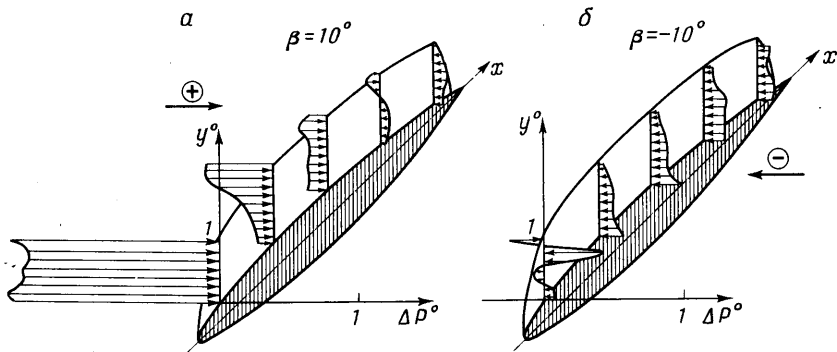


родки перепад давления имеет разный знак. В этом случае, как указывалось выше, не было обнаружено четкого вихря.

Сопоставление результатов визуальных наблюдений с данными измерений давления на перегородке подтверждает предположение о том, что вихрь вблизи перегородки образуется из-за разницы величины давлений, действующих на внутреннюю и



Фиг. 5

внешнюю стороны перегородки. При определенном сочетании углов атаки и скольжения перепад давлений, действующий на отдельные участки перегородки, может достигать большой величины, т. е. при определенных режимах обтекания на перегородку действуют значительные нагрузка и момент.

О ВЛИЯНИИ ВИДА ШЕРОХОВАТОСТИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОТОКА ГАЗА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА

А. И. ЕРОФЕЕВ (Москва)

Проводится сравнение результатов взаимодействия потока газа с различными моделями шероховатых поверхностей для диффузного и зеркального законов отражения от элемента поверхности. Показано, что качественная картина взаимодействия и количественные результаты для коэффициентов аккомодации энергии и нормального импульса практически не зависят от модели шероховатой поверхности и определяются только углом наклона элементарных площадок, в то время как значения коэффициента аккомодации тангенциального импульса при некоторых углах падения могут различаться существенно (в 1.5—2 раза).

1. О модели шероховатой поверхности. В работе [1] влияние шероховатости на взаимодействие потока газа с поверхностью твердого тела рассматривалось на основе метода статистических испытаний, примененного для моделирования поверхности и процесса столкновения частиц газа с элементом поверхности. В качестве модели поверхности рассматривалась поверхность, выполненная из плоских площадок, тангенс угла наклона k_i и проекция на горизонтальную плоскость Δ_i которых являются независимыми случайными величинами, подчиняющимися нормальному распределению. Тогда, если z_i — левая координата высоты площадки, то правая координата высоты z_{i+1} определялась следующим соотношением:

$$z_{i+1} = z_i + k_i \Delta_i \quad (1.1)$$

Координата высоты n -ой площадки, как это следует из (1.1), равна

$$z_n = z_0 + \sum_{i=0}^{n-1} k_i \Delta_i \quad (1.2)$$

Здесь z_0 — начало отсчета высоты реализуемого участка поверхности. Имея в виду нормальное распределение для случайных величин k и Δ , для математического

ожидания b_n и дисперсии d_n случайной величины z_n , получаем

$$b_n = z_0 + na_1a_2, \quad d_n = n[\sigma_1^2\sigma_2^2 + a_1^2\sigma_2^2 + a_2^2\sigma_1^2] \quad (1.3)$$

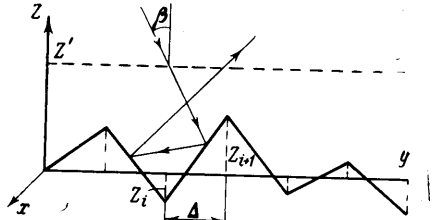
Здесь a_1, a_2 — средние значения k и Δ , σ_1 и σ_2 — среднеквадратичные отклонения. Из формул (1.3) следует, что при увеличении числа шагов b_n и d_n возрастают. Для рассмотренного в работе [1] случая изменение угла наклона площадок проводилось в интервале $[-1/2\pi, 1/2\pi]$, так что $a_1 = 0$. Поэтому

$$b_n = z_0, \quad d_n = n[\sigma_1^2\sigma_2^2 + a_2^2\sigma_1^2] \quad (1.4)$$

т. е. среднее значение не меняется, а дисперсия по-прежнему возрастает с ростом n . В этом заключался недостаток предложенного моделирования, так как невозможно сравнивать какую-либо реализацию поверхности с реальной поверхностью, поскольку последняя характеризуется определенным среднеквадратичным отклонением.

В данной работе рассмотрим поверхность набираемую из плоских площадок, но в отличие от работы [1] в качестве случайной величины выберем только координату высоты площадки z_i , а проекции площадок (фиг. 1) на горизонтальную плоскость $\Delta_i = \text{const} = \Delta$. В качестве распределения случайных величин z_i возьмем нормальное гауссовское распределение

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \frac{-(z-a)^2}{2\sigma^2} \quad (1.5)$$



Фиг. 1

В этом случае среднее значение тангенса угла наклона площадок равно нулю, а среднеквадратичное значение тангенса угла наклона площадок $\langle \text{tg}^2 \varphi \rangle$ равно

$$\langle \text{tg}^2 \varphi \rangle^{1/2} = \sigma\sqrt{2}/\Delta. \quad (1.6)$$

Параметры σ и Δ выберем так, чтобы можно было сравнить результаты взаимодействия потока газа с поверхностью для двух моделей шероховатости. Для этого необходимо выполнение условия

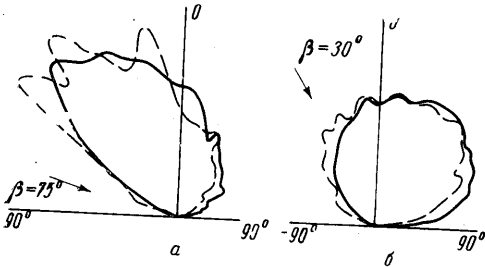
$$\sigma\sqrt{2}/\Delta = \sigma_1 \quad (1.7)$$

В соотношении (1.7) величины σ, σ_1, Δ безразмерные.

2. Сравнение результатов расчетов для модели поверхности, принятой в работе [1] (модель 1), и для модели поверхности данной работы (модель 2) проведем для двух схем взаимодействия потока газа с элементом поверхности: а) схема диффузного отражения, б) схема зеркального отражения. Как и в работе [1], предполагается, что в обоих случаях локальный коэффициент аккомодации энергии α не зависит от угла падения. Моделирование процесса движения частиц газа, столкновения с элементами поверхности проводится так же, как и в [1]. Коэффициенты аккомодации энергии и импульса определяются для каждой частицы и осредняются по числу траекторий в две ступени: 1) осреднение по числу траекторий при заданной реализации поверхности; 2) осреднение по числу реализаций. Полное число траекторий для данного угла падения β (фиг. 1) равнялось 100 000. Осредненные коэффициенты аккомодации энергии, нормального и тангенциального импульса определим соответственно

$$\langle \alpha \rangle = 1 - \frac{\langle E_r \rangle}{E_i}, \quad \langle \sigma \rangle = \frac{\langle v_z \rangle}{v_i}, \quad \langle \sigma' \rangle = \frac{\langle v_y \rangle}{v_i} \quad (2.1)$$

Здесь $\langle E_r \rangle, \langle v_z \rangle, \langle v_y \rangle$ — средние значения энергии, нормальной и тангенциальной компонент скорости отраженной частицы; E_i, v_i — энергия и скорость частиц в потоке газа. Поток газа, падающий на поверхность, предполагается монохроматическим.



Фиг. 2

Результаты расчетов коэффициентов аккомодации, полученные для модели 2, для модели 1 [1] и при обтекании клиновидной полости свободномолекулярным потоком газа для локального диффузного отражения [2] представлены в таблице. Сравнение проводится при одинаковых значениях среднеквадратичного значения тангенса угла наклона площадок (параметр σ_1) для моделей 1 и 2 и соответствующего угла полураствора гофра θ работы [2]. Так, при $\sigma_1 = 1$ брались гофры с $\theta = 45^\circ$, а при $\sigma_1 = 0.5$ — коэффициент аккомодации $\alpha = 0.5$.

β	0	30°	60°	75°	
---------	---	-----	-----	-----	--

Диффузное отражение, $\sigma_1 = 1$

$\langle \alpha \rangle$	0.57	0.57	0.57	0.56	модель 1
	0.57	0.57	0.56	0.56	модель 2
	0.59	0.59	0.57	0.56	работа [2]
$\langle \sigma \rangle$	0.43	0.43	0.42	0.41	модель 1
	0.43	0.43	0.43	0.41	модель 2
	0.42	0.42	0.42	0.41	работа [2]
$\langle \sigma' \rangle$	-0.002	-0.06	-0.15	-0.20	модель 1
	0	-0.06	-0.14	-0.18	модель 2
	0	-0.08	-0.17	-0.20	работа [2]

Диффузное отражение, $\sigma_1 = 0.5$

$\langle \alpha \rangle$	0.52	0.53	0.53	0.52	модель 1
	0.53	0.53	0.52	0.52	модель 2
	0.54	0.54	0.54	0.53	работа [2]
$\langle \sigma \rangle$	0.46	0.46	0.46	0.45	модель 1
	0.46	0.46	0.43	0.45	модель 2
	0.45	0.45	0.45	0.44	работа [2]
$\langle \sigma' \rangle$	0.002	-0.032	-0.09	-0.14	модель 1
	0	+0.003	-0.03	-0.13	модель 2
	0	-0.05	-0.11	-0.17	работа [2]

Зеркальное отражение, $\sigma_1 = 1$

$\langle \alpha \rangle$	0.63	0.60	0.53	0.51	модель 1
	0.63	0.60	0.52	0.51	модель 2
$\langle \sigma \rangle$	0.43	0.48	0.52	0.56	модель 1
	0.47	0.48	0.53	0.57	модель 2
$\langle \sigma' \rangle$	0.022	-0.08	-0.20	-0.20	модель 1
	0.031	-0.03	-0.15	-0.12	модель 2

Зеркальное отражение, $\sigma_1 = 0.5$

$\langle \alpha \rangle$	0.52	0.53	0.52	0.52	модель 1
	0.53	0.51	0.52	0.51	модель 2
$\langle \sigma \rangle$	0.52	0.53	0.56	0.57	модель 1
	0.53	0.51	0.55	0.55	модель 2
$\langle \sigma' \rangle$	0.302	0.08	0.13	0.22	модель 1
	-0.301	0.15	0.20	0.27	модель 2

$\sigma_1 = 0.5$ и в противоположном направлении при $\sigma_1 = 1$. На фиг. 2 изображены индикатрисы рассеяния для наиболее сильно различающихся случаев схемы зеркального отражения $\sigma_1 = 1$, $\beta = 75^\circ$; $\sigma_1 = 0.5$, $\beta = 30^\circ$; сплошная кривая — модель 2, пунктирная кривая — модель 1. Во всех остальных случаях для схем зеркального и диффузного отражений индикатрисы рассеяния для моделей 1 и 2 близки друг к другу. Незначительны также и различия в количестве частиц, испытавших одно, два и т. д. столкновений с поверхностью, для указанных моделей шероховатости. Ниже приведены вероятности отражения частиц от поверхности после первого (p_1), второго (p_2) столкновений для случая — схема зеркального отражения; $\sigma_1 = 0.5$; $\beta = 30^\circ$.

$$\begin{array}{ll} \text{модель 1} & p_1 = 0.888, \quad p_2 = 0.107 \\ \text{модель 2} & p_1 = 0.841, \quad p_2 = 0.155 \end{array}$$

Знак минус в значениях $\langle \sigma' \rangle$ указывает на то, что доминирующее направление движения отраженных от поверхности частиц противоположно направлению движения падающего потока.

Сравнение результатов расчетов коэффициентов аккомодации для различных моделей шероховатости показывает, что влияние вида шероховатости на $\langle \alpha \rangle$ и $\langle \sigma \rangle$ практически не существенно. Наиболее чувствительным к изменению вида шероховатости является коэффициент аккомодации тангенциального импульса. Однако, учитывая то обстоятельство, что абсолютная величина $\langle \sigma' \rangle$ мала, можно сделать вывод о незначительном влиянии вида шероховатости на обмен импульсом между потоком газа и поверхностью твердого тела.

Качественные особенности взаимодействия потока газа с поверхностью, полученные для модели 1 [1] и для модели 2, хорошо согласуются между собой. Так для схемы диффузного отражения, за исключением случая $\sigma_1 = 0.5$, $\beta = 30^\circ$, доминирующее направление движения отраженных частиц противоположно направлению движения падающего потока газа. Для схемы зеркального отражения отраженный поток движется в направлении первоначального движения при

Таким образом, сравнение результатов взаимодействия потока газа с шероховатой поверхностью различного вида показывает, что влияние вида шероховатости незначительно как на качественную картину взаимодействия, так и на обмен энергией и импульсом между потоком газа и поверхностью твердого тела. Для разобранных случаев единственным параметром, определяющим картину взаимодействия, является угол наклона элементарной площадки (точнее, среднеквадратичное значение тангенса угла наклона площадки).

3. Погрешность расчетов при определении коэффициентов аккомодации оценивалась по сходимости результатов по мере увеличения числа запускаемых траекторий. В работе [4] отмечалось, что сходимость результатов достаточно хорошая: лишь в нескольких примерах для получения надежного результата требовалось более 100 000 траекторий, а в большинстве случаев необходимое количество траекторий N могло быть значительно меньше 100 000. Анализ результатов, проведенный для модели 2 данной работы, показал, что для получения стабильных результатов для коэффициентов аккомодации необходимое количество траекторий может быть уменьшено примерно до 25 000 для схемы зеркального отражения и до 10 000 для схемы диффузного отражения. Однако для построения распределения отраженных частиц по направлениям (индикатрис рассеяния) может потребоваться и большее число траекторий (особенно для схемы зеркального отражения).

Из фиг. 2 видно, что индикатрисы рассеяния, построенные по 100 000 траекториям, при локально зеркальном отражении от элемента поверхности несут лепестковый характер, что, возможно, указывает на недостаточное количество запускаемых траекторий (или на недостаточное число построенных реализаций поверхности). Заметим, что в работе [4] построение индикатрис рассеяния проводилось не по точкам, а для иллюстрации качественной картины взаимодействия потока газа с поверхностью проводились сглаженные кривые. Эффект «сглаживания» можно проследить, строя индикатрисы для разного числа запускаемых траекторий N . На фиг. 3 представлены нормированные индикатрисы рассеяния для случая: модель 2, схема зеркального отражения, $\sigma_1 = 1$, $\beta = 60^\circ$ при количестве траекторий N , равном 20 000 (кривая 1), 50 000 (кривая 2), 100 000 (кривая 3). Видно, что с увеличением числа N выбросы в индикатрисах рассеяния сглаживаются. Для схемы локального диффузного отражения индикатрисы рассеяния имеют более гладкий вид, причем уже при $N = 20 000$ вид индикатрис рассеяния практически не отличается от вида индикатрис, построенных при большем числе расчетных траекторий.

Автор благодарит М. Н. Когана и Р. Г. Баранцева за обсуждение данной работы.

Поступило 4 IV 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеев А. И. О влиянии шероховатости на взаимодействие потока газа с поверхностью твердого тела. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 6.
2. Ерофеев А. И. Обтекание клиновидной полости свободномолекулярным потоком газа. Инж. ж., 1965, т. 5, № 5.

СВЕРХЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ ГРЕМУЧЕЙ СМЕСЬЮ

В. П. СТУЛОВ, Л. И. ТУРЧАК

(Москва)

Развитый в [1] метод численного решения задачи о неравновесном обтекании затупленных тел применен здесь к расчету обтекания сферы воздушно-водородной смесью. Большинство расчетов проведено для гремучей смеси $0.67\text{H}_2 + 0.33\text{O}_2$. Особенностью течения в ударном слое является наличие сравнительно узкой внутренней области быстрого протекания реакций. Аналогичная ситуация имеет место при неравновесной ионизации воздуха за сильными ударными волнами, когда по мере увеличения температуры электронов и их концентрации на смену реакциям ассоциативной ионизации приходят гораздо более быстрые реакции ионизации электронным ударом.