

Аэродинамические характеристики сетчатых поверхностей в свободномолекулярном режиме обтекания

А.Б. Надирадзе, Р.Р. Рахматуллин

Аннотация

Приведены результаты численных расчетов аэродинамических характеристик сетчатых поверхностей двух различных типов в свободномолекулярном режиме обтекания. Исследованы зависимости коэффициентов обмена и коэффициента пропускания от плотности сеток, азимутального и полярного углов падения частиц, а также от локальных коэффициентов аккомодации. Дана оценка области применимости допущения о азимутальной симметрии сеток.

Ключевые слова

сетчатые поверхности; аэродинамические характеристики; коэффициенты обмена импульсом; коэффициенты пропускания; свободномолекулярных режим обтекания.

Введение

На многих летательных аппаратах (ЛА) присутствуют сетчатые поверхности, это могут быть фильтры, рефлекторы приемо-передающих антенн и т.п. Причем в последние годы наметилась тенденция использования крупногабаритных антенн (диаметром от 2-3 м и выше), зеркало которых образуется сетчатыми поверхностями малой плотности. При функционировании ЛА в верхних слоях атмосферы на эти поверхности могут воздействовать частицы набегающего потока или струи двигателей коррекции и стабилизации. В результате этого возникают возмущающие усилия и моменты, способные привести к потере устойчивости ЛА или дополнительному расходу рабочего тела, затрачиваемого на его стабилизацию. Учитывая это обстоятельство, одной из важнейших задач проектирования современных ЛА является определение аэродинамических характеристик (АДХ) сетчатых поверхностей и оценка действующих на них усилий.

Экспериментальное измерение аэродинамических характеристик (АДХ) сетчатых поверхностей в свободномолекулярном режиме обтекания является весьма сложной задачей

в силу малости измеряемых величин [1]. Поэтому наиболее эффективным способом определения АДХ сетчатых поверхностей (особенно малой плотности) является компьютерное моделирование.

В настоящее время существуют и достаточно хорошо развиты различные методы расчета АДХ, начиная от простых лучевых моделей, заканчивая весьма сложными компьютерными моделями, использующими методы прямого статистического моделирования Монте-Карло и позволяющими учесть многие тонкие эффекты взаимодействия [2-4]. Применение этих методов позволяет с высокой точностью вычислить все необходимые характеристики без проведения сложных и дорогостоящих экспериментов.

В тоже время сложность и многообразие структур сетчатых поверхностей не позволяют выработать для них какую-либо универсальную модель, поэтому для каждой поверхности приходится проводить отдельную серию расчетов. В связи с этим целью данной работы является исследование сетчатых поверхностей двух типов и выяснение зависимостей между параметрами этих поверхностей и их АДХ.

Модели сетчатых поверхностей

В рамках данной работы исследовалось два типа сетчатых поверхностей, условно названных "трикотаж" и "кружево", фрагменты которых приведены на рис.1 а) и б), соответственно.

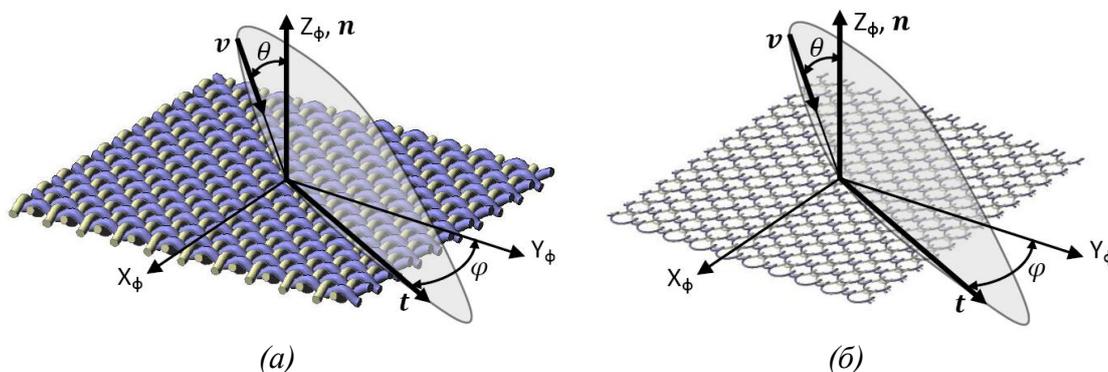


Рис.1 – Фрагменты сетчатых поверхностей типа "трикотаж" (а) и "кружево" (б).

Сетчатая поверхность типа "трикотаж" (рис. 1а), образована нитями диаметра d , пересекающимися под прямым углом. Траектории продольных и поперечных нитей задаются уравнениями вида:

$$z(t) = H \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{2L}\right), \quad (1)$$

где t – продольная координата вдоль центральной линии нити; H – амплитуда волны; L – расстояние между нитями.

В случае плотного прилегания пересекающихся нитей $H = d/2$ данную сетку можно характеризовать всего двумя параметрами: d и L . При этом коэффициент заполнения сетки определяется параметром $K = L/d$. Плотной упаковке нитей соответствует значение $K = 1$, а разреженной $K \gg 1$.

Система координат фрагментов обоих типов поверхностей задается по направлению нитей как это показано на рис.1. При этом полярный угол падения частиц θ отсчитывается от нормали к поверхности (ось Z), а азимутальный угол падения частиц φ – от оси $+Y$ в направлении оси $+X$.

Сетчатая поверхность типа "кружево" (рис.1б) образована нитями, обхватывающими двумя малыми петлями нити следующего ряда. Радиус малых петель R_1 и расстояние между ними ℓ определяются диаметром нитей d и не зависят от плотности сетки. Размеры больших петель, имеющих форму полукруга с радиусом R_2 , меняются в зависимости от плотности сетки. При этом коэффициент заполнения сетки $K = R_2/\ell$, а расстояние между нитками $L = R_2$.

Расчетная модель

Как известно [5], наиболее общими характеристиками взаимодействия потоков разреженного газа с поверхностями являются коэффициенты обмена импульсом, показывающими какая доля импульса первичных частиц (потока) будет передана поверхности. При этом величина импульса P , переданного поверхности, определяется соотношением:

$$P = \rho v^2 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{p} + \mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\tau}), \quad (2)$$

где \mathbf{n} и \mathbf{t} – орты нормали и касательной к поверхности, ρ – массовая плотность набегающего потока частиц, v – скорость частиц в набегающем потоке, p , τ – коэффициенты обмена нормального и касательного импульса, соответственно.

Из (2) следует, что коэффициенты обмена сетчатой поверхности могут быть оценены по величине сил, действующих на достаточно крупный (исключающий влияние краевых эффектов) фрагмент поверхности, по следующим формулам:

$$p = -\frac{F_n(\theta, \varphi, v)}{P_0 S}, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{F_t(\theta, \varphi, v)}{P_0 S}, \quad (4)$$

где $P_0 = \rho v^2$ – полный поток импульса частиц, бомбардирующих поверхность; F_n , F_t – силы, действующие на фрагмент сетки со стороны потока частиц вдоль нормали и по касательной к поверхности, соответственно; θ – полярный угол падения частиц; φ – азимутальный угол

падения; S – площадь, покрываемая фрагментом ($S = A \times B$, где A, B – размеры сторон фрагмента).

Вектор всех поверхностных сил, действующих на фрагмент со стороны потока частиц, рассчитывается путем интегрирования по поверхности всех нитей:

$$\mathbf{F} = \oint_S (\mathbf{N} + \mathbf{T}) ds, \quad (5)$$

где \mathbf{N} , \mathbf{T} – нормальная (полное давление) и касательная (напряжение) компоненты поверхностной силы, действующей на элементарную площадку на поверхности нити, соответственно:

$$\mathbf{N} = \mathbf{n} \cdot \rho v^2 p_s(\vartheta, v), \quad (6)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{t} \cdot \rho v^2 \tau_s(\vartheta, v), \quad (7)$$

где $p_s(\vartheta, v)$, $\tau_s(\vartheta, v)$ – коэффициенты обмена для поверхности нити; \mathbf{n} , \mathbf{t} – орты нормали и касательной к поверхности нити; ϑ – угол падения частиц на поверхность нити.

В простейшем случае коэффициенты обмена $p_s(\vartheta, v)$, $\tau_s(\vartheta, v)$ могут быть выражены через соответствующие коэффициенты аккомодации [5]:

$$\tau_s = \sigma_\tau \sin(\vartheta) \cos(\vartheta), \quad (8)$$

$$p_s = (2 - \sigma_n) \cos^2(\vartheta) + \frac{\sigma_n}{2} \sqrt{\frac{\pi}{h_s}} \cos(\vartheta), \quad (9)$$

где σ_n , σ_τ – коэффициенты аккомодации нормального и тангенциального импульса, соответственно; $h_s = mv^2/2kT_w$; T_w – температура поверхности; m – масса частицы, k – постоянная Больцмана.

Легко убедиться, что при $\sigma_n = 1$, $\sigma_\tau = 1$ реализуется режим взаимодействия с полным поглощением импульса (ППИ), когда импульс падающих частиц полностью передается поверхности. Такой режим характерен для тяжелых частиц и больших скоростей взаимодействия.

При $\sigma_n = 0$, $\sigma_\tau = 0$ реализуется режим зеркального отражения (З/О), когда поверхности передается удвоенная нормальная компонента импульса, а касательная компонента не передается. Такой режим наблюдается довольно редко и характерен для легких частиц и средних скоростей взаимодействия.

В остальных случаях реализуются диффузный или зеркально-диффузный режимы взаимодействия (Д/О), когда все или некоторая часть частиц отражается от поверхности диффузно.

Результаты расчетов и их обсуждение

В рамках данной работы исследовалась зависимость АДХ и коэффициента прозрачности от структуры и плотности сетки, азимутального и полярного углов падения, а также от коэффициентов аккомодации σ_n , σ_τ нитей сетки.

Рассматривались сетки типа "трикотаж" с коэффициентом заполнения 2, 5, 10 и сетки типа "кружево" с коэффициентом заполнения 1.5, 3, 5.

Зависимости коэффициентов обмена нормального и тангенциального импульса от плотности сетки приведены на рисунках 2 ("трикотаж") и 3 ("кружево"). Расчеты проводились для коэффициентов аккомодации, соответствующих взаимодействию атомов ксенона с поверхностью анодированного алюминия: $\sigma_n = 0.69$, $\sigma_\tau = 0.95$ [6].

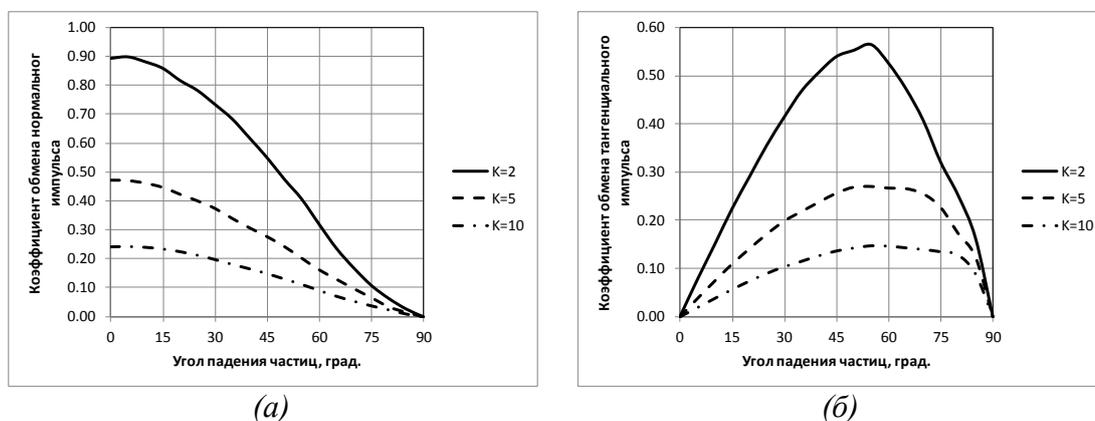


Рис.2 – Зависимости коэффициентов обмена нормальным (а) и тангенциальным (б) импульсом для сеток типа "трикотаж" от полярного угла падения частиц.

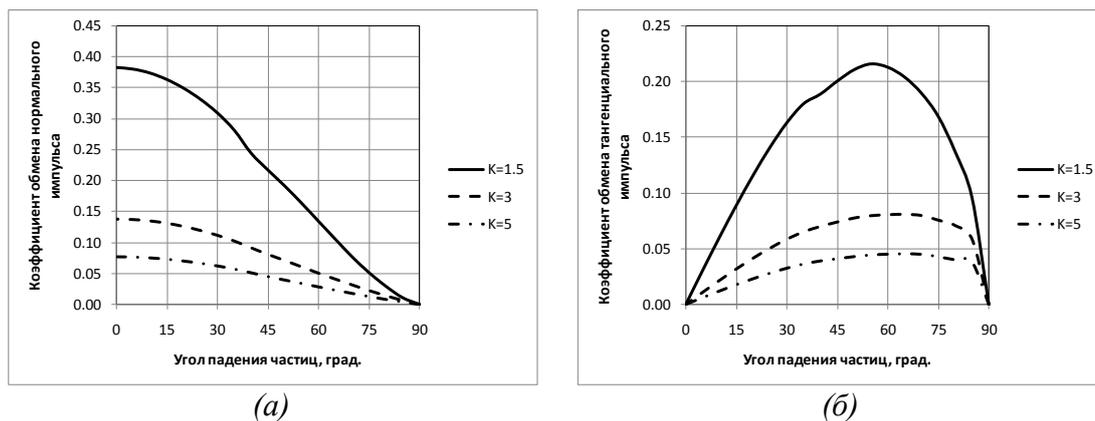


Рис.3 – Зависимости коэффициентов обмена нормальным (а) и тангенциальным (б) импульсом для сеток типа "кружево" от полярного угла падения частиц.

Из приведенных рисунков видно, что зависимости $p(\theta)$ достаточно консервативны. При изменении плотности сетки меняется в основном амплитуда кривых $p(\theta)$, в то время как их форма остается практически неизменной.

Зависимости $\tau(\theta)$ более чувствительны к плотности сетки. Так, по мере уменьшения плотности происходит смещение максимума зависимости $\tau(\theta)$ в сторону больших углов падения и некоторое увеличение крутизны правой части кривой (в относительных единицах). Этот эффект связан с увеличением миделя (уменьшением коэффициента пропускания) сетки при увеличении угла падения.

Из рис.2,3 следует, что структура сетки оказывает незначительное влияние на форму кривых $p(\theta)$ и $\tau(\theta)$, что позволяет использовать упрощенные модели для моделирования сеток со сложным рисунком.

Зависимости коэффициента пропускания сеток различной структуры и плотности плетения от полярного угла падения частиц приведены на рис.4.

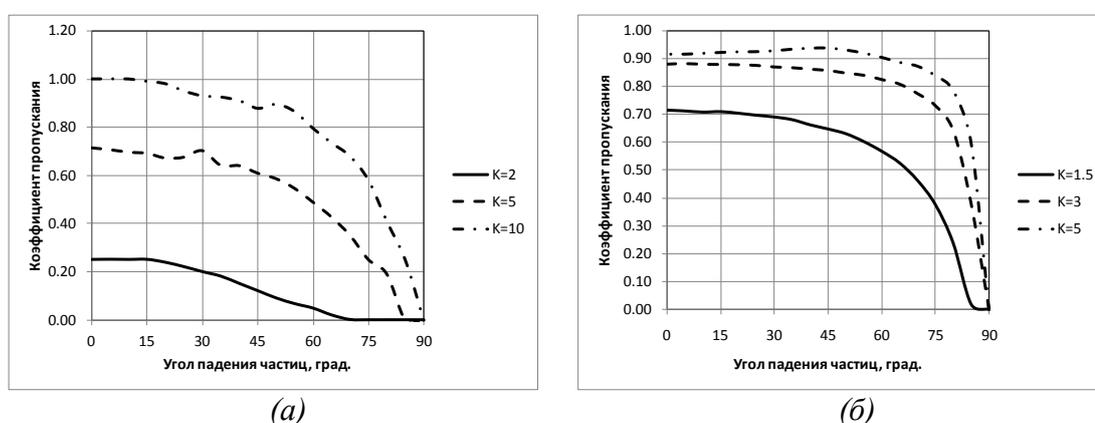


Рис.4 – Зависимости коэффициента пропускания сеток типа "трикотаж" (а) и "кружево" (б) от полярного угла падения частиц.

Из этих рисунков видно, что плотность сетки сильно влияет на вид зависимости коэффициента пропускания от угла падения частиц. Особенно сильно эта зависимость проявляется при скользких углах падения, когда значительная часть потока экранируется нитями сетки. Так, из рис.4а видно, что для сетки типа "трикотаж" максимальной плотности ($K=2$) уже при угле падения 70° коэффициент пропускания становится равным нулю. Зависимость коэффициент пропускания сетки типа "кружево" более резкая, что объясняется существенно меньшей плотностью плетения.

Влияние коэффициентов аккомодации на коэффициенты обмена импульсом проиллюстрируем на примере сетки типа "трикотаж" с плотностью плетения $K=2$. Результаты расчетов для предельных режимов взаимодействия приведены на рис. 5.

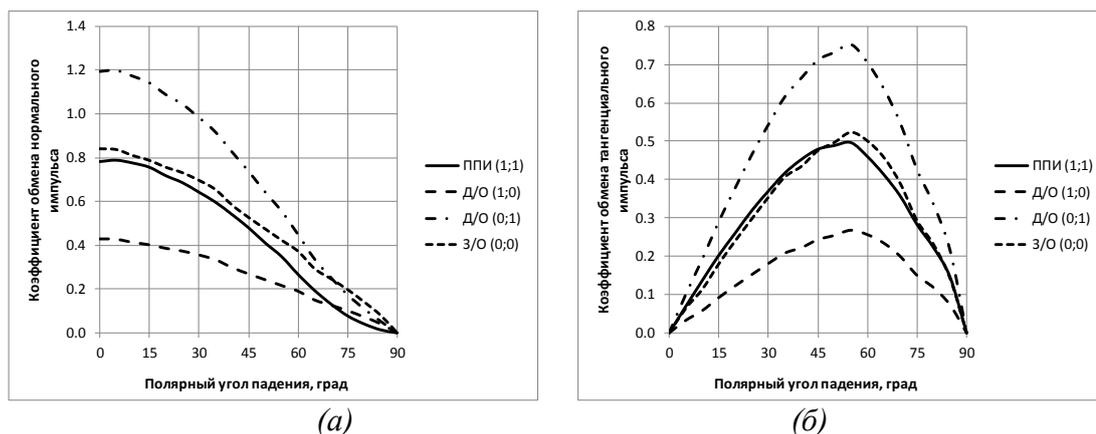


Рис.5 – Зависимость коэффициентов обмена нормального (а) и тангенциального (б) импульса сетки типа "трикотаж" ($K=2$) от угла падения частиц при различных значениях коэффициентов аккомодации.

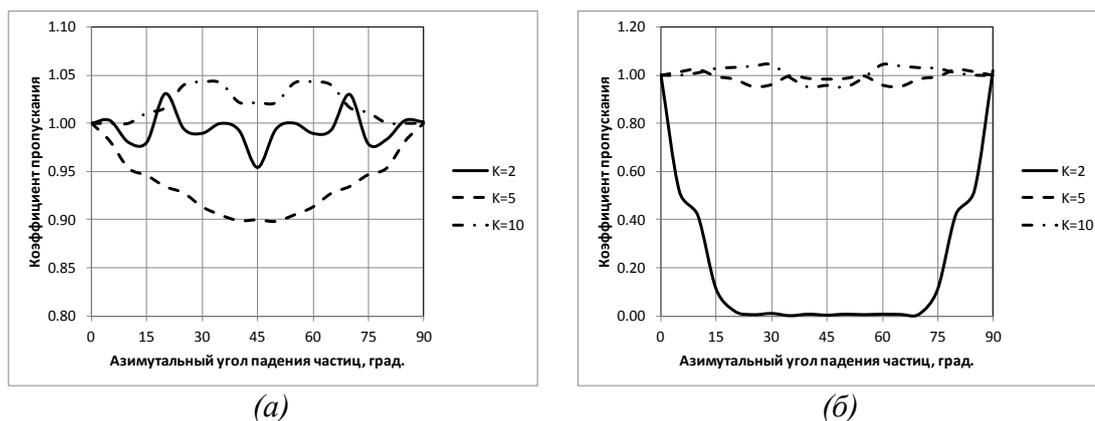
Графики на рис.5 показывают, что коэффициенты аккомодации σ_n , σ_τ влияют, в основном, на амплитуду кривых $p(\theta)$ и $\tau(\theta)$, при этом форма кривых меняется незначительно.

Рассмотрим теперь как влияет азимутальный угол падения частиц на коэффициент пропускания и коэффициенты обмена импульсом.

В большинстве случаев влиянием азимутального угла пренебрегают, принимая допущение азимутальной симметрии. Однако для обоснования этого допущения необходимо иметь информацию о влиянии азимутального угла на коэффициенты обмена и коэффициенты пропускания сеток разной плотности и структуры.

Проведенные расчеты показали, что влияние азимутального угла на коэффициент пропускания сетки типа "кружево" при любой плотности (в диапазоне значений $K=1.5 \div 5$) не превышает 5% и, действительно, может считаться несущественным.

Однако для сетки типа "трикотаж" влияние азимутального угла падения при высокой плотности плетения оказалось весьма существенным. Это видно из рис.6 где представлены расчетные зависимости коэффициента прозрачности от азимутального угла падения при различных значениях плотности сетки.

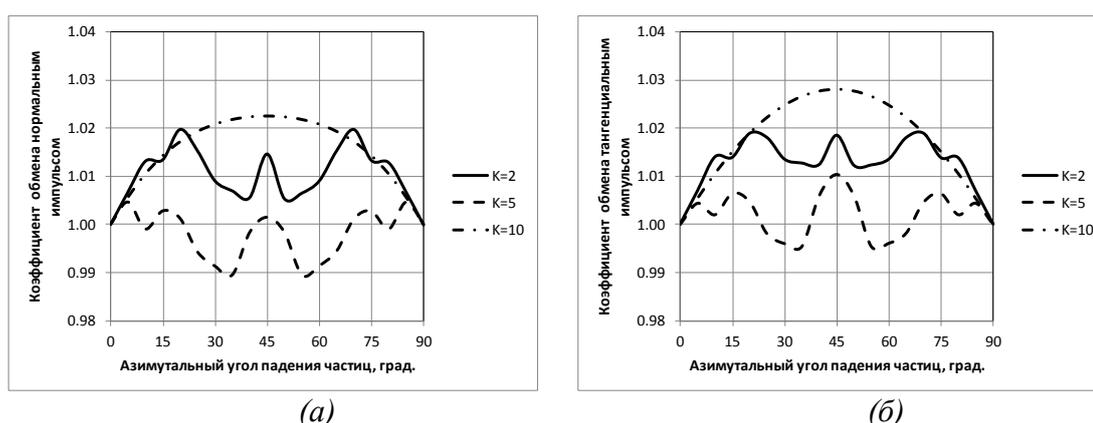


(а) (б)
 Рис.6 – Зависимость прозрачности сеток типа "трикотаж" от азимутального угла падения при полярном угле падения 30° (а) и 60° (б).

Как можно видеть на рис.6б, при плотности плетения $K=2$ и полярном угле падения $\theta = 60^\circ$ коэффициент пропускания сетки в диапазоне азимутальных углов $20-70^\circ$ падает практически до нуля. Исходя из этого можно сделать вывод, что в зависимости от плотности и структуры сеток существует некоторый предельный угол падения $\theta_{max}(\varphi)$ при котором коэффициент пропускания сетки падает до нуля. Этот эффект можно наблюдать и на рис. 4, приведенном ранее.

Зависимости коэффициентов обмена $p(\varphi)/p(0)$ и $\tau(\varphi)/\tau(0)$ для сетки типа "трикотаж" приведены на рис.7,8. Расчеты проводились при значениях коэффициентов аккомодации $\sigma_n = 0.69$, $\sigma_\tau = 0.95$, использованных ранее.

Как видно из этих рисунков, максимальное отклонение коэффициентов обмена от начального значения (при $\varphi = 0$) не превышает 12%.



(а) (б)
 Рис.7 – Зависимость коэффициентов обмена нормального (а) и тангенциального (б) импульса сетки типа "трикотаж" от азимутального угла падения частиц при полярном угле падения $\theta = 30^\circ$.

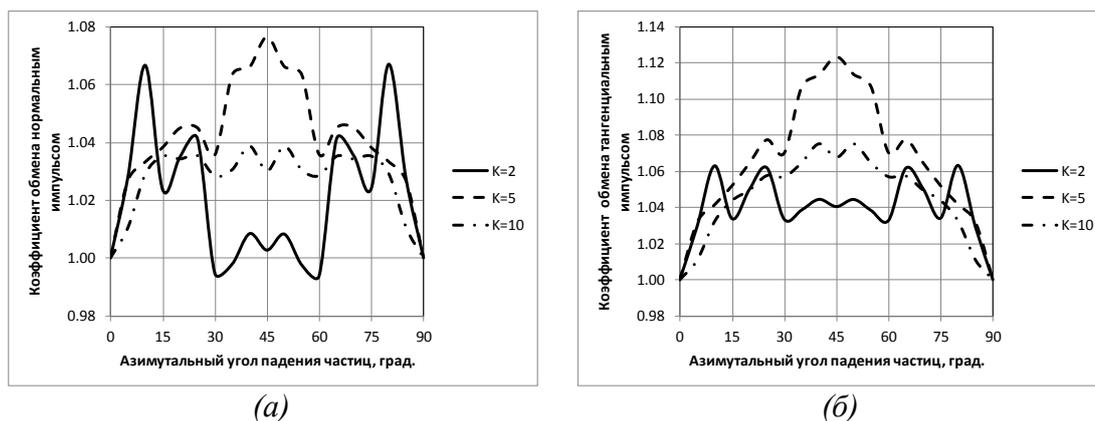


Рис.8 – Зависимость коэффициентов обмена нормального (а) и тангенциального (б) импульса сетки типа "трикотаж" от азимутального угла падения частиц при полярном угле падения $\theta = 60^\circ$.

Отклонения коэффициентов обмена увеличиваются по мере уменьшения плотности сетки. Расчеты при граничных режимах взаимодействия (ППИ, З/О, Д/О) показали, что и в этом случае отклонения не превышают 10-12%, что, в первом приближении, можно считать незначительным.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что коэффициенты обмена нормальным и тангенциальным импульсом сетчатых поверхностей, зависят, в основном от плотности плетения (густоты) сетки. Структура сетки (рисунок плетения) оказывает незначительное влияние на зависимости коэффициентов обмена от полярного и азимутального углов падения. Максимальные отклонения коэффициентов обмена от начального значения (при азимутальном угле $\varphi = 0$) не превышают 12%, что можно считать незначительным и не учитывать при оценке механического воздействия газового потока на сетку. Коэффициент пропускания сеток малой плотности зависит, в основном, от полярного угла падения и слабо зависит от азимутального угла падения частиц. Однако для плотных сеток существует некоторый предельный угол падения $\theta_{max}(\varphi)$ при котором коэффициент пропускания сетки падает до нуля. Таким образом, для разреженных сеток допущение о азимутальной симметрии является вполне приемлемым и может применяться в инженерных расчетах. Для плотных сеток такое допущение не всегда является корректным и его следует подтверждать в каждом конкретном случае.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Минобрнауки России в рамках ГК 16.518.11.7033*

Библиографический список

1. Шувалов В.А. Моделирование взаимодействия тела с ионосферой. Киев, Наукова думка, 1995.– 179С.
2. Гунько Ю.Ф., Христинич В.Б. Расчет сопротивления плоской решетки в потоке разреженного газа. // Молекулярная газовая динамика и динамика разреженного газа: Материалы VII Всесоюзной конференции по МГД и ДРГ, М., Изд-во АН СССР, 1985, том 1, с. 250-258
3. Шведов А.В. О расчете аэродинамических характеристик тел с сетчатыми поверхностями в гиперзвуковом потоке разреженного газа. // Труды ЦАГИ: Динамика разреженных газов и молекулярная газовая динамика. Вып. 2436. М., 1990г. с. 44-60.
4. Кашковский А.В. Разработка и применение программных систем для решения задач высотной аэродинамики. // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Новосибирск, 2008 г, 225 с.
5. Баранцев Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями.- М.: Наука, 1975.
6. Каменко В.Ф., Никифоров А.П., Омелик А.И. Экспериментальное исследование передачи импульса к поверхности различных материалов в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке // Ученые записи ЦАГИ.-1979.- т. X, № 5.

Сведения об авторах

Надирадзе Андрей Борисович, профессор Московского авиационного института (научно-исследовательского университета), ведущий научный сотрудник, д. т. н.

Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4,125993;

тел.: +7 (499) 158-46-74, +7 (916) 128-05-16, e-mail: nadiradze@mai.ru.

Рахматуллин Рустам Ранисович инженер Московского авиационного института (научно-исследовательского университета).

г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4. 125993;

тел.: +7 (499) 158-46-74, e-mail: ruuustam@rambler.ru.