

УДК 532.526

СНИЖЕНИЕ ТРЕНИЯ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ НА ЕЁ ПОВЕРХНОСТИ

© 2012 Н. И. Ключев¹, В. А. Фролов², Ю. А. Крюков³¹Самарский государственный университет²Самарский государственный аэрокосмический университет

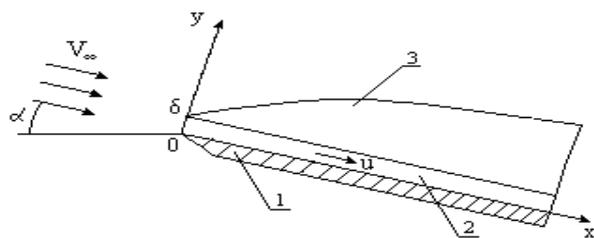
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

³ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассматривается задача о продольном обтекании плоской пластины набегающим потоком воздуха. На поверхности пластины располагается плёнка жидкости, течение которой происходит за счёт силы тяжести и встречного потока. Вычисляется напряжение трения на межфазной поверхности. По результатам решения задачи получено снижение напряжения трения.

Плёнка, пограничный слой, задача Блазиуса, трение, пластина, подвижная граница.

Атмосферные осадки формируют на поверхности летательного аппарата плёнку жидкости, которая изменяет его аэродинамические характеристики. Будем рассматривать установившееся течение плёнки жидкости на плоской пластине под воздействием набегающего потока воздуха, вектор скорости которого совпадает с плоскостью пластины (рис. 1). Пусть пластина расположена под углом α к горизонту. Тогда течение жидкости происходит за счёт сил тяжести и трения на внешней поверхности плёнки. Будем считать, что жидкость равномерно поступает в плёнку из окружающей среды.



1 - пластина, 2 - плёнка,
3 - пограничный слой, V_∞ - скорость набегающего потока, δ - толщина плёнки, u - скорость жидкости
Рис. 1. Схема течения

Течение вне плёнки соответствует задаче Блазиуса с тем отличием, что вместо неподвижной стенки имеем подвижную плёнку жидкости. Наличие плёнки изменяет касательное напряжение на межфазной поверхности. Определим влияние плёнки на величину касательного напряжения в

пограничном слое. В общей постановке задача является сопряжённой, включающей задачу о течении плёнки (внутренняя задача) и задачу о пограничном слое набегающего воздуха (внешняя задача). Для реального процесса задача о течении плёнки является двумерной с переменной толщиной и переменной скоростью. Известно, что толщина плёнки имеет порядок $\delta \approx 10^{-3}$ м, и наложение плёнки незначительно изменяет геометрию пластины. Поэтому можно пренебречь переменной толщиной плёнки и рассмотреть приближённую модель, когда плёнка имеет постоянную толщину и постоянную скорость (рис. 1).

Уравнение движения и граничные условия для плёнки, совершающей перемещение под воздействием трения на внешней поверхности и силы тяжести, можно записать в виде

$$0 = g \sin \alpha (\rho_2 - \rho_3) + \mu_2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (1)$$

$$y = 0, u = 0, y = \delta, \mu_2 \frac{\partial u}{\partial y} = \tau,$$

где ρ - плотность, μ - коэффициент динамической вязкости, g - ускорение свободного падения, τ - касательное напряжение, индексы «2», «3» - соответствуют жидкости и газу.

Решением уравнения (1) является

$$u(\delta) = \frac{\delta}{\mu_2} \left\{ -\frac{g \sin \alpha}{2} (\rho_2 - \rho_3) \delta + [\tau + g \sin \alpha (\rho_2 - \rho_3) \delta] \right\}, \quad (2)$$

где $\delta = \text{const}$ – толщина плёнки.

Для того, чтобы задача была однозначной, необходимо определить расход жидкости в плёнке. Зададим массовый расход жидкости на единицу ширины плёнки

$$G = \rho_2 \delta \langle u \rangle. \quad (3)$$

Напряжение трение на поверхности плёнки найдём из задачи Блазиуса. Для неподвижной стенки локальное трение на стенке определяется формулой

$$\tau = 0,332 \sqrt{\frac{\rho_3 \mu_3 V_\infty^3}{x}}. \quad (4)$$

Формула (4) справедлива для ламинарного обтекания пластины при числах Рейнольдса $Re = \frac{V_\infty l}{\nu_3} < 10^6$. Тогда начальное значение касательного напряжения для внутренней задачи определим, как интегральную величину от локального трения на длине $x = 1 \text{ м}$

$$\tau = 0,664 \sqrt{\rho_2 \mu_2 V_\infty^3}. \quad (5)$$

Запишем задачу о пограничном слое [1]. Начало координат перенесём на поверхность плёнки, и задача Блазиуса с подвижной границей будет иметь вид:

$$\varphi''' + \varphi \varphi'' = 0, \quad (6)$$

$$\eta = 0, \varphi = 0, \varphi' = \frac{2u(\delta)}{V_\infty}, \eta \rightarrow \infty, \varphi' = 2,$$

где новая координата введена как

$$\eta = \frac{y}{2} \sqrt{\frac{V_\infty}{\nu_2 x}}.$$

Для сращивания внешней и внутренней задачи на межфазной поверхности $\eta = 0$ ($y = 0$) задаётся скорость $u(\delta)$, полученная из внутренней задачи. Таким образом, общая постановка задачи включает в себя уравнения (2)-(6), которые решаются численно с использованием метода последовательных приближений.

Выпишем входные данные задачи: температура окружающей среды $t = 20^\circ \text{C}$, скорость набегающего потока воздуха $V_\infty = 10 \text{ м/с}$, расход воды в плёнке

$G = 1,87 \text{ кг/с}$ и угол наклона пластины к горизонту $\alpha = \pi/6$. Численное решение задачи даёт следующие результаты: средняя скорость жидкости в плёнке $\langle u \rangle = 1,8 \text{ м/с}$, толщина плёнки $\delta = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, скорость жидкости на поверхности плёнки $u(\delta) = 2,73 \text{ м/с}$, касательное напряжение на поверхности плёнки $\tau = 0,09 \text{ Н/м}^2$. На рис. 2 показано изменение скорости в поперечном сечении плёнки.

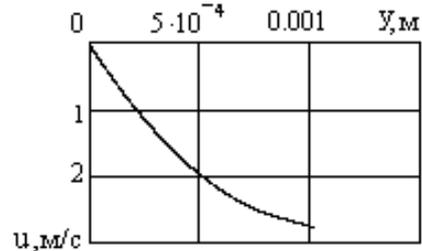


Рис. 2. Распределение скорости в поперечном сечении плёнки

Видно, что граничное условие на поверхности плёнки соответствует ненулевому трению. Выполняя пересчёт численных результатов на характеристики пограничного слоя, получаем среднее

$$\tau = 0,5975 \sqrt{\rho_2 \mu_2 V_\infty^3} \quad (7)$$

и локальное значение напряжения трения

$$\tau = 0,2988 \sqrt{\frac{\rho_2 \mu_2 V_\infty^3}{x}}. \quad (8)$$

Сравнение (5) и (7) показывает, что наличие подвижной границы снижает величину касательного напряжения на 10%. На рис. 3 показано касательное напряжение на поверхности плёнки, как функция от угла наклона пластины. При отклонении пластины от горизонтального положения к силе трения на поверхности плёнки добавляется сила тяжести, скорость в плёнке возрастает, а трение уменьшается.

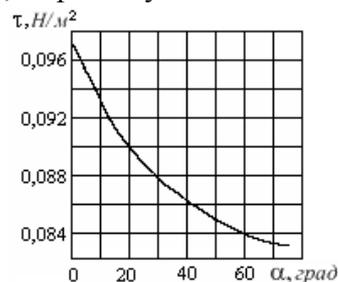


Рис. 3. Изменение средней величины межфазного напряжения трения в зависимости от положения пластины

Из рис. 3 видно, что касательное напряжение на поверхности плёнки при $\alpha = 0^\circ$ (горизонтальное положение пластины) отличается от напряжения трения при $\alpha = 90^\circ$ (вертикальное положение) примерно на 15 %.

На рис.4 показано изменение касательного напряжения для условий $G = 1,87 \text{ кг/с}$, $\alpha = \pi/6$ при различных числах Рейнольдса набегающего потока.

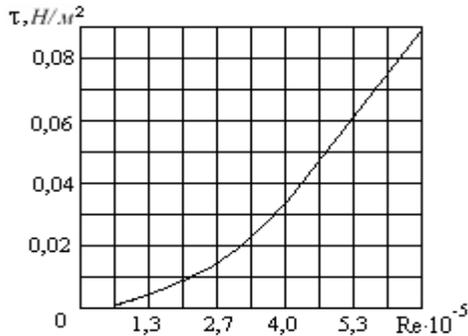
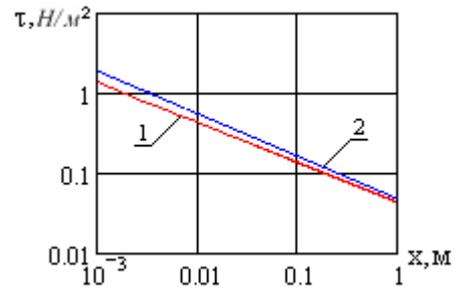


Рис. 4. Зависимость средней величины межфазного напряжения трения на пластине от чисел Рейнольдса

$$\left(\text{Re} = \frac{V_\infty l}{\nu_2}, l = 1 \text{ м} \right)$$

Числа Рейнольдса соответствуют скорости набегающего потока $V_\infty = 1; 2; 4; 6; 8 \text{ м/с}$.

Данные (рис. 4) показывают существенное возрастание величины касательного напряжения. На рис. 5 показано распределение межфазного касательного напряжения по длине пластины с плёнкой и без плёнки в логарифмической системе координат.



1 – скорость жидкости на поверхности плёнки $u(\delta) = 3 \text{ м/с}$, 2 – решение Блазиуса без плёнки
Рис. 5. Распределение межфазного напряжения трения по длине пластины

Минимальное различие для $x = 1 \text{ м}$ составляет 11,6 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что плёнка жидкости на поверхности тела уменьшает сопротивление трения тела. Для неудобнообтекаемых тел вклад трения в общее сопротивление тела невелик. Напротив, для удобнообтекаемых тел трение играет определяющую роль. Следовательно, наличие атмосферной влаги на поверхности тела необходимо учитывать при расчёте аэродинамических характеристик удобнообтекаемых тел.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.U01.21.8242 «Влияние атмосферной влаги на сопротивление трения элементов корпуса ракет-носителей».

Библиографический список

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] /Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 847 с.

REDUCTION OF FRICTION ON A FLAT PLATE IN THE PRESENCE OF A FLUID FILM ON ITS SURFACE

© 2012 Nikolay I. Klyuev¹, Vladimir A. Frolov², Urey A. Kryukov³

¹Samara State University

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

³State Research and Production Space-Rocket Center “TsSKB-Progress”

The problem of a longitudinal flow of a flat plate by the airflow is proposed. On the plate surface is located liquid film, course of which occurs due to gravity and the oncoming flow. Shear stress at the interface is calculated. According The results of solving the problem, reduction the friction stress is obtained.

Film, boundary layer, the Blasius problem, friction, plate, movable boundary.

Информация об авторах

Клюев Николай Ильич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования в механике, Самарский государственный университет. E-mail: nikolay_klyuev@mail.ru Область научных интересов: тепло- и массоперенос, гидродинамика двухфазных сред

Фролов Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрогидродинамики. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: frolov_va_ssau@mail.ru. Область научных интересов: аэрогидродинамика, аэродинамика летательных аппаратов.

Крюков Юрий Александрович, инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: yurakryukov1985@mail.ru. Область научных интересов: аэрогидродинамика, аэродинамика летательных аппаратов.

Klyuev Nikolai Ilich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Mathematical Modeling in Mechanics, Samara State University. E-mail: nikolay_klyuev@mail.ru. Area of research: heat and mass transfer, hydrodynamics of two-phase media.

Frolov Vladimir Alekseevich, Ph.D., associate professor of aerohydrodynamics department. Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). E-mail: frolov_va_ssau@mail.ru. Area of research: aerodynamics, aerodynamics of aircrafts.

Kryukov Yuri Aleksandrovich, design engineer, State Research and Production Space-Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: yurakryukov1985@mail.ru. Area of research: aerodynamics, aerodynamics of aircrafts.