

УДК: 532.5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА С ПЛЕНКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ВОСХОДЯЩЕМ ПРЯМОТОКЕ В ПЛОСКОМ НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Фарахов М.И.*, Разинов А.И., Казанцев С.А., Величко М.Ю.,
Кузнецов В.А., Фарахов М.М., Бурмистров Д.А.

*ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим»

Казанский государственный технологический университет

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

Получено сопряженное решение для газового турбулентного потока и жидкой ламинарной волновой пленки при восходящем прямотоке в плоском наклонном канале. Использована модель представления волн как шероховатости. Проведены экспериментальные исследования и сопоставление с ними результатов расчетов.

В [1] предложена модель взаимодействия газового потока с пленкой жидкости, движущейся в ламинарном волновом режиме в вертикальной трубе, основанная на представлении волн как шероховатости. Используем данную модель для описания восходящего прямотока в плоском наклонном канале. В этом случае задача усложняется, так как профили потока импульса и скорости газа становятся не симметричными относительно плоскости, расположенной посередине между верхней стенкой щели и пленкой жидкости, текущей по нижней стенке. Для модели гладкой пленки это обуславливается отличием

граничных условий для скорости газа – на верхней стенке она равна нулю, а на границе с пленкой w^{ep} . Для модели шероховатой пленки добавляется отличие в коэффициентах трения. Уравнения движения для гладкой пленки при этом не изменяются.

Запишем уравнение движения для газовой фазы, используя в данном случае прямоугольную систему координат, совместив плоскость x - z с поверхностью пленки, а ось x направим противоположно ее восходящему движению:

$$\frac{d\tau_{yx}}{dy} = \rho_2 g_x - \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

где τ_{yx} – элемент тензора вязких напряжений (поток проекции импульса на ось x , направленный вдоль оси y), ρ_2 – плотность газа, g_x – проекция ускорения свободного падения на ось x , $\frac{dp}{dx}$ – градиент давления вдоль оси x .

Проинтегрируем уравнение (1) с условием $\tau_{yx} = 0$ при $y = \frac{h - \delta}{2} + b$. Здесь y

– расстояние от границы пленки жидкости, h – высота щели, δ – толщина пленки, b – расстояние от плоскости, расположенной посередине между верхней стенкой щели и пленкой жидкости, до плоскости с максимальной скоростью газа, соответствующей нулевому значению потока импульса. Причем величина b может быть как положительной, так и отрицательной. Получим:

$$\tau_{yx} = \left(\rho_2 g_x - \frac{dp}{dx} \right) \left(y - \frac{h-\delta}{2} - b \right). \quad (2)$$

На границе газа с пленкой жидкости, то есть при $y = 0$, $\tau_{yx} = \tau^{zp}$:

$$\tau^{zp} = \left(\frac{dp}{dx} - \rho_2 g_x \right) \left(\frac{h-\delta}{2} + b \right). \quad (3)$$

Решим уравнение (3) относительно градиента давления:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\tau^{zp}}{\frac{h-\delta}{2} + b} + \rho_2 g_x. \quad (4)$$

Для нахождения потоков импульса на границе с пленкой τ^{zp} и на верхней стенке τ^{cm} , а также величины b воспользуемся динамическими скоростями w_*^{zp} и w_*^{cm} , а также их связью с коэффициентами трения Фаннинга c_f^{zp} и c_f^{cm} :

$$w_*^{cm} = \bar{w}_{2,x} \sqrt{c_f^{cm} / 2}, \quad (5) \quad w_*^{zp} = (\bar{w}_{2,x} - w^{zp}) \sqrt{c_f^{zp} / 2}, \quad (6)$$

$$\tau^{cm} = \rho_2 (w_*^{cm})^2, \quad (7) \quad \tau^{zp} = \rho_2 (w_*^{zp})^2, \quad (8)$$

$$\bar{w}_{2,x} = \frac{w_2^0 h}{h - \delta}, \quad (9) \quad d_3 = 2(h - \delta), \quad (10)$$

$$c_f^{cm} = \frac{0,316}{4} \text{Re}_2^{-0,25}, \quad (11) \quad \text{Re}_2 = \frac{\bar{w}_{2,x} d_3 \rho_2}{\mu_2}, \quad (12)$$

$$\text{Re}'_2 = \frac{(\bar{w}_{2,x} - w^{zp}) d_3 \rho_2}{\mu_2}. \quad (13)$$

Для модели гладкой пленки

$$c_f^{zp} = \frac{0,316}{4} (\text{Re}'_2)^{-0,25}. \quad (14)$$

Для модели шероховатой пленки

$$\frac{1}{\sqrt{c_f^{zp}}} = -4 \lg \left(\frac{\varepsilon}{3,7} + \left(\frac{6,81}{\text{Re}'_2} \right)^{0,9} \right), \quad (15)$$

Величину относительной шероховатости ε запишем по аналогии с [1] в виде:

$$\varepsilon = \frac{\alpha \delta}{d_3}. \quad (16)$$

В представленных уравнениях w^{zp} – скорость газа на границе с пленкой жидкости, w_2^0 – фиктивная скорость газа:

$$w_2^0 = \frac{V}{S}, \quad (17)$$

где S – площадь поперечного сечения канала.

Коэффициент α , характеризующий амплитуду волн, предлагается рассчитывать так же, как и в вертикальной трубе по уравнению [1]:

$$\alpha = \delta^2 / (10^{-8} + \delta^2), \quad (18)$$

Градиент давления можно выразить не через τ^{zp} , а через τ^{cm} , проведя вывод уравнения, аналогичного (4)

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\tau^{cm}}{\frac{h-\delta}{2} - b} + \rho_2 g_x. \quad (19)$$

Приравняв (4) и (19), а также выразив τ^{2p} и τ^{cm} с использованием динамических скоростей, можно получить явное выражение для величины b :

$$b = \frac{h-\delta}{2} \cdot \frac{(w_*^{2p})^2 - (w_*^{cm})^2}{(w_*^{2p})^2 + (w_*^{cm})^2}. \quad (20)$$

Дополним полученную систему уравнениями движения пленки жидкости [1]: скорость на границе пленки жидкости, взаимодействующей с газовым потоком:

$$w_*^{2p} = -\frac{\tau^{2p}}{\mu_{жс}} \delta + \frac{1}{\mu_{жс}} \left(\rho_{жс} g_x - \frac{dp}{dx} \right) \frac{\delta^2}{2}; \quad (21)$$

средняя по сечению пленки скорость:

$$\bar{w}_{жс,x} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta w_{жс,x} dy = \frac{\delta}{\mu_{жс}} \left(-\frac{d\Phi^{2p}}{2} + \left(c_{жс} g_x - \frac{dp}{dx} \right) \frac{\delta}{3} \right); \quad (22)$$

связь между толщиной пленки δ и линейной плотностью орошения Γ :

$$\frac{\Gamma}{\rho_{жс}} = \frac{\left(\rho_{жс} g_x - \frac{dp}{dx} \right)}{3\mu_{жс}} \delta^3 - \frac{\tau^{2p}}{3\mu_{жс}} \delta^2. \quad (23)$$

Таким образом, система уравнений становится замкнутой и позволяет найти w_*^{2p} , $\bar{w}_{жс,x}$, δ , $\frac{dp}{dx}$, w_*^{2p} , w_*^{cm} , τ^{2p} , τ^{cm} , $\bar{w}_{2,x}$, d_3 , Re_2 , Re'_2 , c_f^{2p} , c_f^{cm} , b , решая численным методом систему 15 алгебраических уравнений (4)-(14), (17)-(20) для модели гладкой пленки или заменяя (14) на (15) – для шероховатой.

Для проверки адекватности предположенной модели была изготовлена экспериментальная установка с плоским каналом прямоугольного сечения высотой $h = 0,005$ м, шириной $l = 0,045$ м и длиной $L = 1,4$ м, выполненным из стекла, позволяющая менять угол его наклона к горизонту β , в которой измерялось потерянное давление Δp_n^3 при восходящем протокте с помощью цифрового дифманометра. Схема установки приведена на рис. 1.

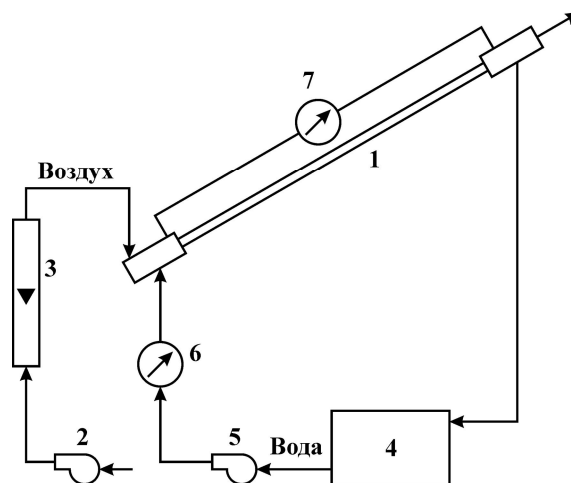


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
1 – плоский канал; 2 – вентилятор; 3 – ротаметр; 4 – бак с водой; 5 – насос; 6 – расходомер; 7 – цифровой дифманометр.

Эксперименты проводились на системе воздух-вода при температуре 21°C. Вода для опытов была предварительно дистиллирована.

Расчетные значения потерянного давления определялись по формуле

$$\Delta p_n^p = \left(\frac{dp}{dx} - \rho_z g_x \right) L \tag{24}$$

Результаты некоторых расчетов приведены на рис. 2 и рис. 3

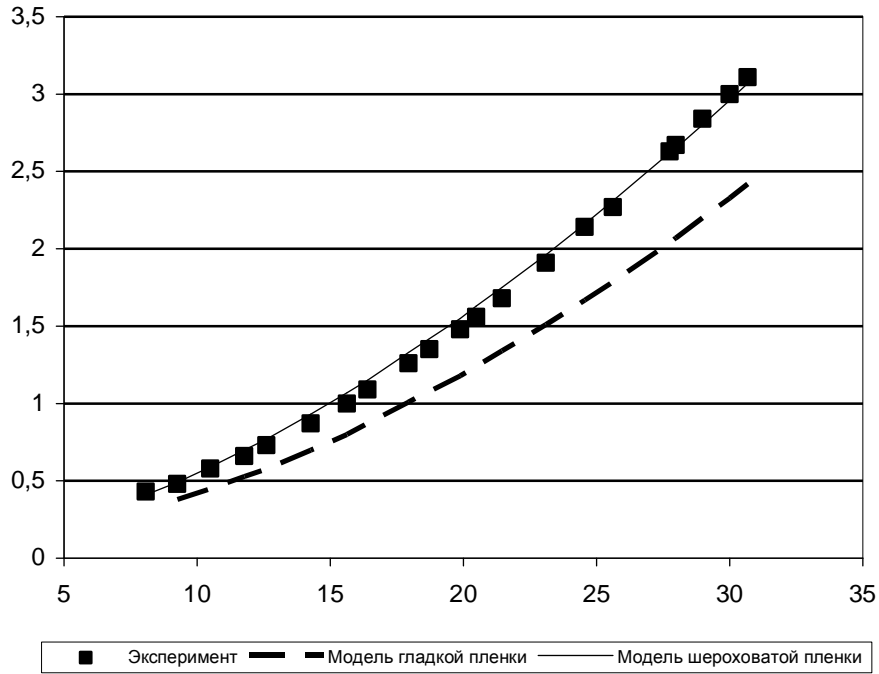


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных величин при $\Gamma = 0,06$ кг/м·с; $\beta = 5^\circ$

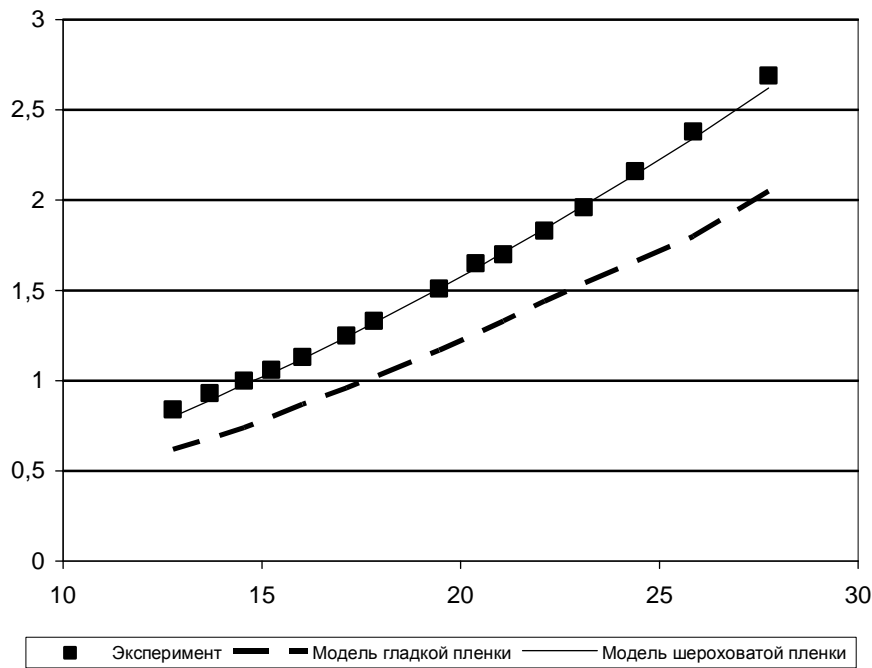


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных величин при $\Gamma = 0,06$ кг/м·с; $\beta = 10^\circ$

Анализ результатов расчетов показал, что для модели шероховатой пленки среднее расхождение с экспериментальными данными составляет 2,93%, а максимальное 12%, что не превышает погрешности эксперимента. Модель гладкой пленки дает систематическое занижение гидравлического сопротивления в среднем на 21,3%.

Таким образом, можно сделать вывод, что модель шероховатой пленки применима для описания волнового ламинарного её течения при восходящем прямоотке как в вертикальных трубах, так и в наклонной плоскости щели. Замкнутое со-

пряженное решение для потока турбулентного газа, взаимодействующего с ламинарной пленкой позволяет решать практические задачи сепарации аэрозолей, для расчета эффективности которых требуется знание динамической скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Фарахов М.И., Разинов А.И., Казанцев С.А. Взаимодействие газового потока с пленкой жидкости при восходящем прямоотке в вертикальной трубе. // Современные проблемы науки и образования, №5, 2008. – С.77-81.

INTERACTION OF A GAS STREAM WITH A FILM OF FLUID AT ASCENDING CONCURRENT FLOW IN A PLANE INCLINED CHANNEL

Farakhov M.I.*, Razinov A.I., Kazantsev S.A., Velichko M.Yu., Kuznetsov V.A.,
Farakhov M.M., Burmistrov D.A.

**Limited company "Engineering promotional center "Inzhekhim"
Kazan' state technological university*

A coupled solution for a turbulent gas flow and a liquid laminar wave film is obtained at ascending concurrent flow in a plane inclined channel. The model of representation of waves as roughness is used. Experimental studies and comparison of experimental data with computational results are accomplished.