

Уэндландт У. Термические методы анализа. - М., 1978.

УДК 536.242

В.П.Петренко, Н.А.Прядко, А.Б.Мельник,
А.В.Форсэк

**ГИДРОДИНАМИКА ВОСХОДЯЩИХ ПЛЕНОК ЖИДКОСТИ И ТЕПЛОТДАЧА
В РЕЖИМЕ ИСПАРЕНИЯ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Между стекающей пленкой жидкости и газовым потоком существует силовое взаимодействие, величина которого в режиме противотока определяет структуру двухфазного течения. При достижении некоторого критического расхода газа (пара) происходит "захлебывание", а

дальнейший рост скорости легкой фазы сопровождается инверсией потока. Указанный режим имеет место в том случае, если значение

$$K_r = W_2 \sqrt{\rho_2} / \sqrt{g \sigma (\rho_1 - \rho_2)}$$

больше или равно 3,2.

Интегральные характеристики восходящей пленки могут быть рассчитаны при наличии информации о закономерностях распределения коэффициентов переноса по сечению. Для пленок, движущихся против гравитационных сил, такие данные отсутствуют. Представляется оправданным, применив упрощенные модели переноса, на их основе выполнить анализ теплогидродинамических характеристик потока с целью получения коррелирующих параметров.

Данные непосредственных измерений профилей турбулентной вязкости в стекающих пленках [1-3] указывает на существенное подавление интенсивности турбулентных пульсаций вблизи межфазной поверхности. Сопутствующий паровой поток деформирует кривую распределения поперечных турбулентных пульсаций, однако подавление их вблизи внешней границы пленки имеет место и в этом случае [4]. Межфазная поверхность, обладая упругими свойствами, демпфирует турбулентные вихри; очевидно, подобный характер воздействия сохраняется и в условиях восходящего течения.

Для определения теплогидродинамических характеристик восходящих пленок использован неявно интегральный метод анализа, основанный на решении уравнений движения и передачи теплоты при задании приближенной функции распределения турбулентных пульсаций. В опытах [1; 3] профиль поперечных пульсаций был близок к параболическому, поэтому распределение коэффициентов турбулентного переноса импульса и теплоты представлен в виде

$$\epsilon_m = 4\epsilon_m (\eta - \eta^2), \quad (1)$$

$$\epsilon_m = \epsilon_m / R_{\eta}, \quad (2)$$

где ϵ_m - неизвестная функция режимных параметров потока по физическому смыслу соответствующая максимуму интенсивности турбулентности в середине пленки; $\eta = y/\delta$ - безразмерная толщина; y - расстояние от стенки; δ - толщина пленки.

Используя безразмерные параметры

$$\delta^+ = \frac{\delta u^+}{\nu}, \quad u^+ = \frac{u}{u^*}, \quad T^+ = \frac{\rho c_p u^* (T_w - T)}{q}$$

($u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ - динамическая скорость; τ_w - касательное напряжение на стенке; ν - кинематическая вязкость; T_w - температура стенки), определяемые соответственно как толщина пленки, скорость и температура, запишем решения уравнений движения и передачи теплоты

$$\tau_w + \rho g y = -(\mu + \rho \epsilon_m) du/dy, \quad (3)$$

$$q = -(\lambda + \rho c_p \epsilon_T) dT/dy \quad (4)$$

при граничных условиях $\eta = 0; u = 0; T = T_w$ в следующем виде:

$$u^+ = \left[\frac{\delta^+ \nu}{4 \epsilon_m c_1} + \frac{\delta^+ \nu}{8 \epsilon_m c_1} \left(\frac{\tau_i}{\tau_w} - 1 \right) \right] \ln \left[\left| \frac{2\eta - 1 - c_1}{2\eta - 1 + c_1} \right| \left(\frac{c_1 - 1}{c_1 + 1} \right) \right] \times \\ \times \frac{\delta^+ \nu}{8 \epsilon_m} \left(\frac{\tau_i}{\tau_w} - 1 \right) \ln \left| \frac{\eta^2 - \eta - \frac{\nu}{4 \epsilon_m}}{\nu/4 \epsilon_m} \right|, \quad (5)$$

$$T^+ = \frac{\delta^+ \nu}{4 c_2} \ln \left[\left| \frac{2\eta - 1 + c_2}{2\eta - 1 - c_2} \right| \left(\frac{c_2 + 1}{c_2 - 1} \right) \right], \quad (6)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м³; c_p - теплоемкость, Дж/(кг·К);

$c_1 = \sqrt{1 + \frac{\nu}{\epsilon_m}}$; $c_2 = \sqrt{1 + \frac{R_T \nu}{R_T \epsilon_m}}$ - параметры пленки; τ_i, τ_w - касательное напряжение на межфазной поверхности, $\tau_i = \tau_w + \rho y g$.

Среднее значение скорости жидкости в пленке определяется так:

$$\bar{u}^+ = \int_0^1 u^+ d\eta = \frac{\delta^+ \epsilon_m}{4 \nu} c_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_i}{\tau_w} - 1 \right) \right] \ln \left(\frac{c_1 - 1}{c_1 + 1} \right) - \\ - \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_i}{\tau_w} - 1 \right) c_1 \left[\ln \left| \frac{(c_1 - 1)^{(c_1 - 1)}}{(c_1 + 1)^{(c_1 + 1)}} \right| + \ln \frac{\nu}{\epsilon_m} + 2 \right]. \quad (7)$$

Тогда толщина пленки

$$\delta^+ = \frac{Re_{пл}}{4 \cdot \bar{u}^+}, \quad (8)$$

где $Re_{пл} = \frac{4\Gamma_v}{\nu}$, $\Gamma_v = \frac{G_{пл}}{\rho_2 D}$ - объемная плотность орошения (D - диаметр трубы); $G_{пл}$ - массовый расход жидкости, движущейся в пристенной пленке жидкости,

Из условия $\alpha = q / (T_w - T_i)$ имеем

$$St = \frac{\rho}{\rho_2} \frac{C_2}{\frac{\nu}{\epsilon_m} Pr_2 \ln \left[\frac{(C_2+1)}{(C_2-1)} \right]} \quad (9)$$

($St = \frac{\alpha d}{\rho c_p u_w}$ - число Стентона).

Из условия $\epsilon_w = \frac{\rho}{8} \rho u_w^2$ получаем.

$$\xi = 128 \left(\frac{\rho^+}{Re_{пл}} \right)^2 \quad (10)$$

Уравнения (8)-(10) отражают взаимосвязь гидродинамических и тепловых параметров пленочного течения и содержат в качестве параметра величину ϵ_m , которую можно найти, сопоставив уравнения (8)-(10) с полученными независимо экспериментальными данными по $\delta, d, \Delta P_{TP}$. Анализ экспериментальных данных ряда авторов, исследовавших гидродинамические параметры дисперсно-кольцевых адиабатных потоков (системы вода - воздух, сахарные растворы - воздух) [5; 6], а также теплогидродинамические параметры парожидкостных потоков в адиабатных и парогенерирующих режимах [7], позволил получить в явном виде зависимость ϵ_m от расходных характеристик двухфазного потока:

$$\frac{\epsilon_m}{\nu} = 6 \cdot 10^{-5} Re_{пл}^m K_{гя}^{0,25} \left[1 - \exp(-5 \cdot 10^{-3} Re_{пл}) \right]^4, \quad (11)$$

где $m = 1,33 - 8 \cdot 10^{-3} \sqrt{Re_{пл}}$; $K_{гя} = \frac{W_2 \sqrt{\rho_2}}{\sqrt{\rho_1 \rho_2 (P_1 - P_2)}}$ - модифицированный параметр гидродинамической устойчивости; $\rho_c = \rho_2 \left(1 + \frac{E \rho_1 W_1}{\rho_2 W_2} \right)$ - гомогенная плотность ядра потока; $E = \frac{G_{чн}}{G_1}$ - массовая доля уноса; $W_1 = \frac{4 G_1}{\rho_1 \eta D^2}$, $W_2 = \frac{4 G_2}{\rho_2 \eta D^2}$ - соответственно приведенная скорость жидкой и газовой фазы; G_1, G_2 - соответственно массовый расход жидкой и газовой фазы; ρ_1, ρ_2 - соответственно плотность жидкой и газовой фазы.

Для того чтобы воспользоваться соотношениями (8)-(11) для расчета толщины пленки и интенсивности теплоотдачи, необходима дополнительная информация о напряжениях трения на межфазной поверхно-

сти ξ_i либо на стенке ξ_w , а также данные о массовой доле уноса E . Величины T_w и E могут быть рассчитаны по соотношениям, приведенным в [5].

Зависимость сопротивления трения от расходных характеристик двухфазного потока в трубах диаметром 20...25 мм достаточно точно определяется соотношением Чизолма:

$$\left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_w / \left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_g = 1 + 20/X_{tt} + 1/X_{tt}^2 \quad (12)$$

Для труб большего диаметра (30...34 мм) рекомендуется следующее уравнение для ξ_w , полученное на базе экспериментальных данных [5-7] по сопротивлению движению паро- и воздушножидкостных дисперсно-кольцевых потоков:

$$\left[\left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_w / \left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_{gs}\right]^{1/2} = 3.1 \left(X_{tt}^{cs}\right)^{-0.85} \quad (13)$$

где $\left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_g = \xi_{TP} \frac{1}{D} \rho_1 \frac{w_1^2}{2g}$; $\left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_{gs} = \xi_{TP} \frac{1}{D} \rho_1 \frac{[(1-E)w_1]^2}{2g}$; $\xi_w = \left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta Z}\right)_w \frac{D}{4}$;

$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^{0.1}$ - параметр Доккарта - Мартинелли;

$X_{tt}^{cs} = \left[\frac{(1-x)(1-E)}{x+E(1-x)}\right]^{0.9} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^{0.1}$ - модифицированный параметр

Доккарта - Мартинелли; x - массовое расходное паросодержание;

ξ_{TP} - коэффициент гидравлического трения; μ_1, μ_2 - соответственно динамическая вязкость жидкой и газовой фазы.

Для расчета массовой доли уноса E может быть использовано соотношение

$$C_E = \frac{E \rho_1 w_1}{w_2} = 175 B \left(\frac{\tau_i \delta}{\sigma}\right)^{2.13} \quad \text{при } \frac{\tau_i \delta}{\sigma} < 0.11; \quad (14)$$

$$D_E = 0.145 B \frac{\tau_i \delta}{\sigma} \quad \text{при } \frac{\tau_i \delta}{\sigma} \geq 0.11.$$

где $B = A (450 + w_0^n)$;

$$A = 0.18; n = 0.47 \exp\left[20\left(\frac{\tau_i \delta}{\sigma} - 0.07\right)\right] \quad \text{при } \frac{\tau_i \delta}{\sigma} \leq 0.055;$$

$$A = 0,035; \quad n = 0,54 \quad \text{при} \quad \frac{\tau_i \delta}{\sigma} > 0,055;$$

$$W_0 = W_2^2 D P_i / \sigma; \quad \sigma - \text{поверхностное натяжение.}$$

Уравнение (14) получено на основе обработки экспериментальных данных по уносу в паро- и воздухожидкостных дисперсно-кольцевых потоках [5; 7].

Значение Pr_t , при котором наблюдается удовлетворительное соответствие рассчитанных по соотношению (9) коэффициентов теплоотдачи с экспериментальными данными, равно 0,8.

Область режимных параметров экспериментальных данных, на базе которых получены уравнения (11), (13) и (14), охватывает следующий диапазон: $W_1 = 0,003 \dots 0,15$ м/с; $W_2 = 20 \dots 65$ м/с; $P = 0,12 \dots 0,05$ МПа. Рабочие среды - вода, сахарные растворы концентрацией до 60%, воздух, водяной пар. Результаты расчета по соотношениям (8)-(11) сопоставлены с экспериментальными данными, полученными рядом авторов по St , St , St (рис. 1-3). Результаты расчета по (13), (14), обобщающие данные о потерях давления от трения и уноса, показаны на рис. 3-5. Нисходящие ветви на графиках рис. 1-3 соответствуют инверсии потока при заданном значении параметра

$$\beta = \frac{\tau_i}{[\rho_2 g (\frac{v^2}{g})^{1/2}]}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jepsen J.C., Grosser O.K., Perry R.H. The effect of wave induced turbulence on the rate of absorption of gases in falling liquid films. - A.I.Ch.E. Journal, 1966, v. 12, p. 186-192.
2. Lamorelle A.P., Sandall O.C. Gas absorption into a turbulent liquid // Chem. Eng Science. - 1972. - v. 27. - p. 1035-1043.

3. Ганчев Б.Г., Козлов В.М. Экспериментальное исследование гидродинамической структуры пленки жидкости при свободном стекании по вертикальной поверхности // Теор. основы хим. технологии. - 1973. - № 5. - С. 727-739.

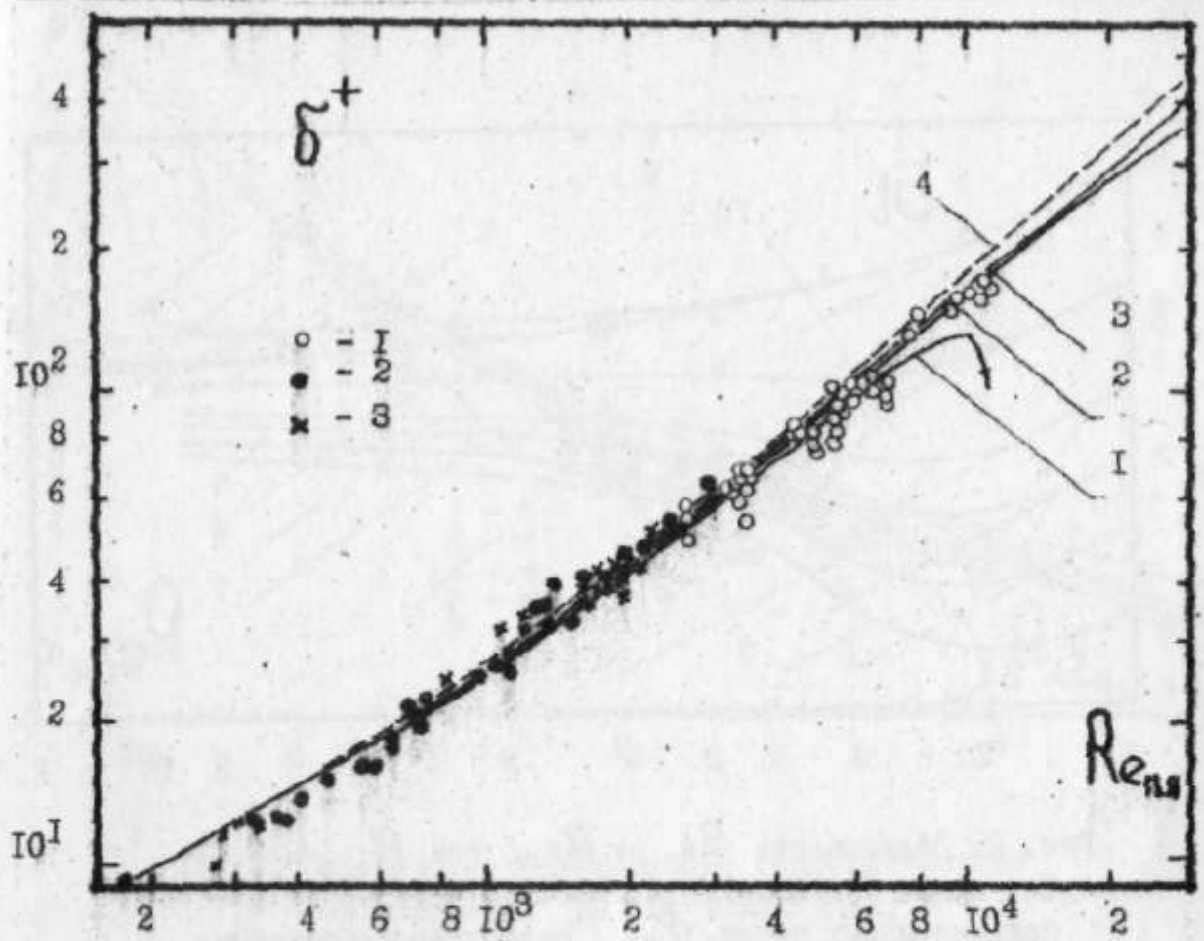


Рис. 1. Зависимость толщины пленки δ^+ от числа $Re_{пл}$:
 1 - данные [7]; 2 - данные [6]; 3 - данные [5]
 (линии соответствуют расчету по уравнениям (8), (11):
 1, 2, 3 - $K_{гя} = 6$; 4 - $K_{гя} = 15$; 1 - $\beta = 50$; 2 - 100;
 3 - 150; 4 - 150

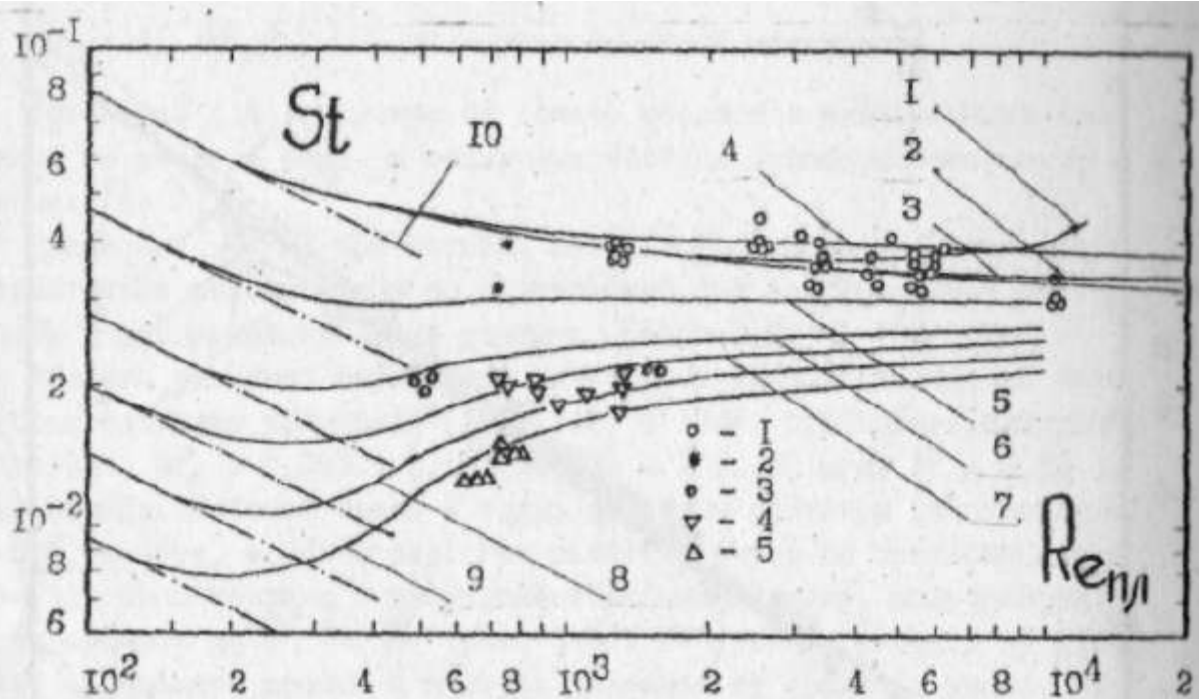


Рис. 2. Зависимость St от $Re_{пл}$ при $Pr_{\pm} = 0,8$:
 1 - вода, $Pr = 1,73$; 2, 3, 4, 5 - сахарные растворы при значениях чисел Pr , равных соответственно 3,6, 7, 9, 12
 (линии соответствуют расчету по уравнениям (8), (9), (11):
 1, 2, 3, 4 - $Pr = 1,7$; 5 - 3; 6 - 5; 7 - 7;
 8 - 10; 9 - 15;
 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 - $K_{гр} = 6$; 4 - $K_{гр} = 15$;
 1 - $\beta = 50$; 2 - 100; 3 - 150; 4 - 100;
 5, 6, 7, 8, 9 - 100;
 линия 10 соответствует расчету по уравнениям для ламинарного режима течения пленки

$$St = 1 / (Pr \delta^+); \quad \delta^+ = \left[\frac{Re_{пл}}{2} \frac{3}{(2 + \epsilon_i / \epsilon_w)} \right]^{1/2}$$

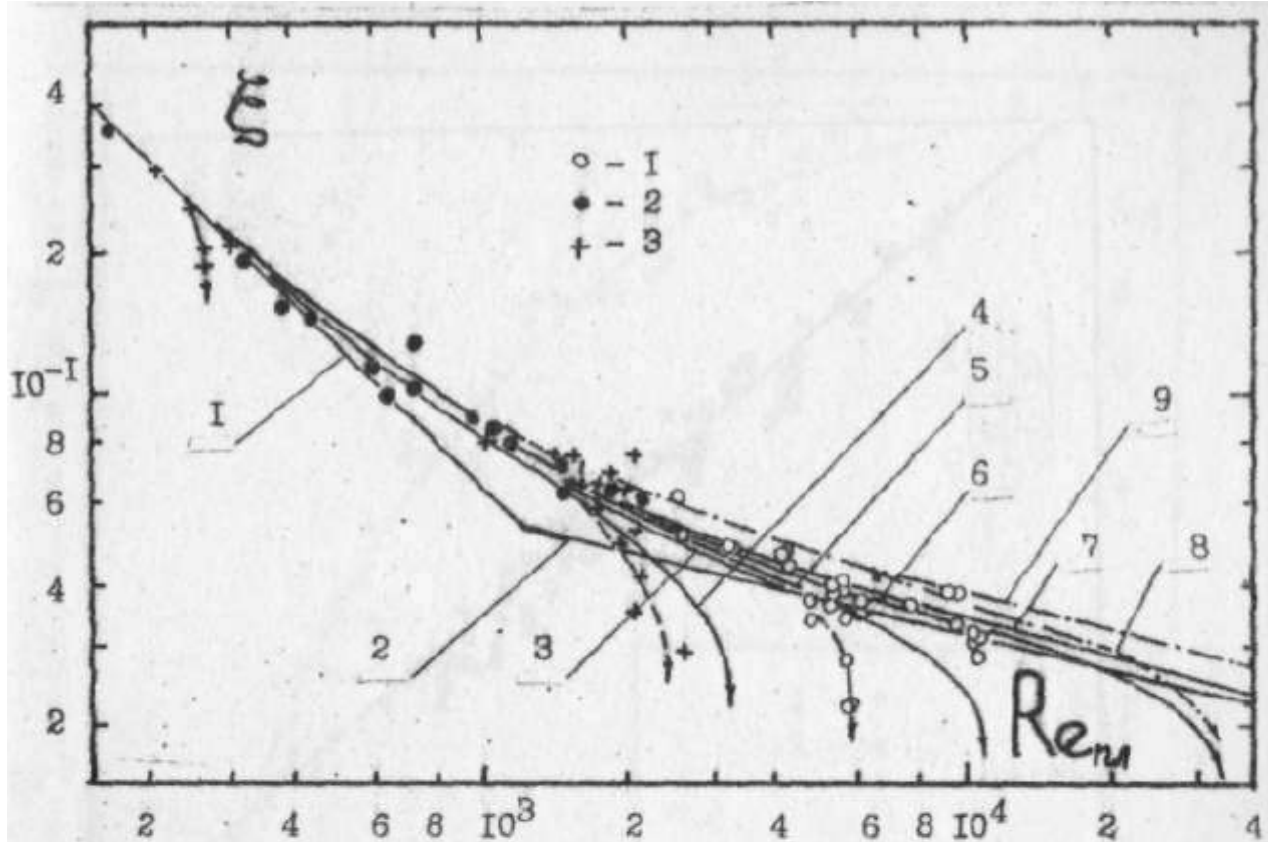


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ от числа $Re_{пл}$:

1 - данные [7]; 2 - данные [6]; 3 - данные [5]

(линия 1 соответствует расчету по уравнению $\xi = 64 / Re_{пл}$;
линия 2 соответствует расчету по уравнению $\xi = 0,316 / Re_{пл}^{0,25}$;

линия 3 соответствует расчету по уравнению, рекомендованному в [5]: $\xi = \frac{64}{Re_{пл}} + 0,024 [1 - \exp(2 - 0,004 Re_{пл})]$;

линия 4, 5, 6, 7, 8, 9 соответствует расчету по уравнению (10); 4, 5, 6, 7 - $K_{гя} = 6$; 8, 9 - $K_{гя} = 15$;

4 - $\beta = 25$; 5 - 50; 6 - 100; 7 - 300; 8 - 100; 9 - 150

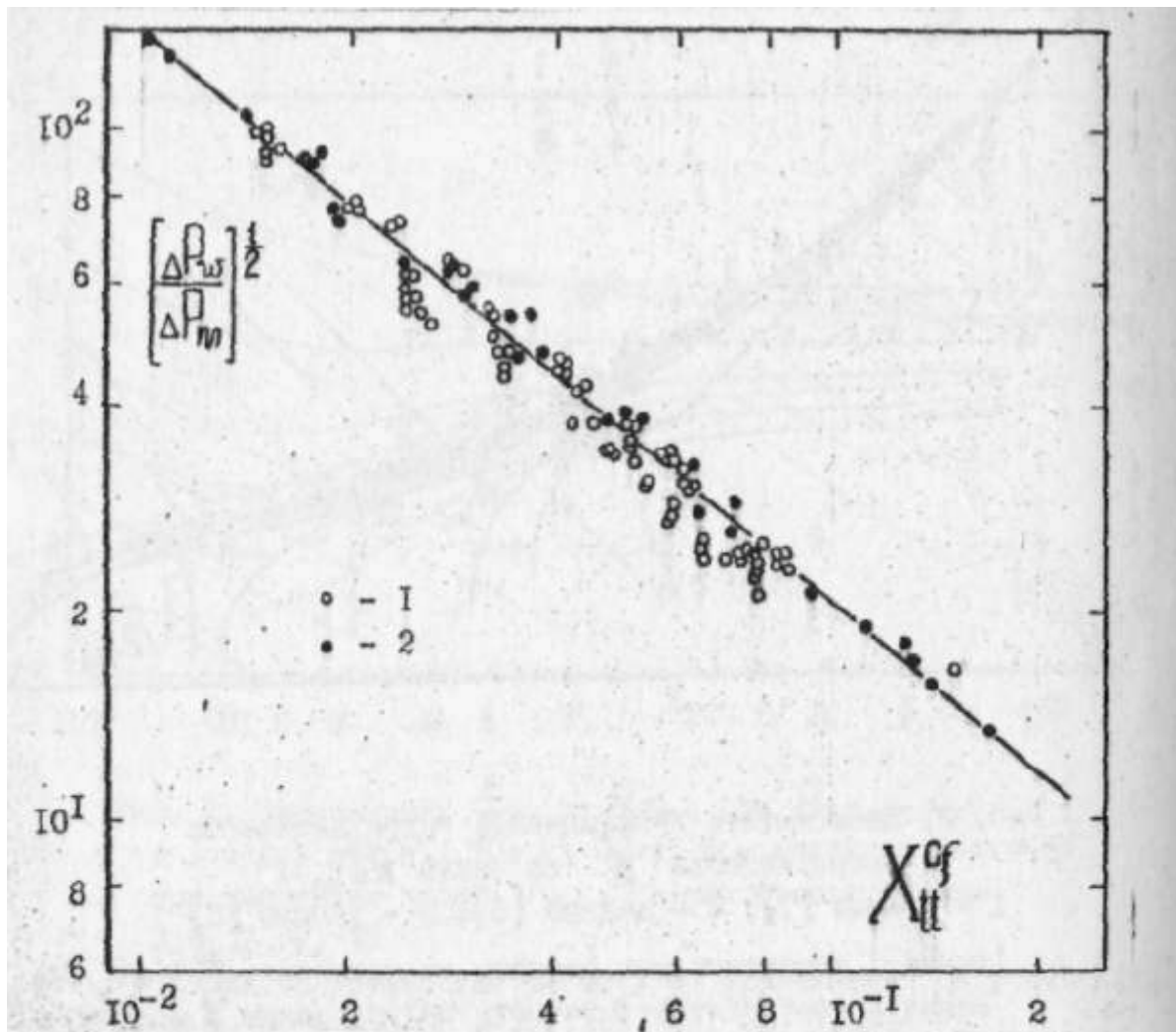


Рис. 4. Зависимость $\left[\frac{\Delta P_w}{\Delta P_m} \right]^{1/2} = f(X_{tt}^{cf})$:
 1 - данные [7]; $D = 0,034$ м; поток вода - пар;
 2 - данные [6]; $D = 0,0317$ м; поток вода - воздух

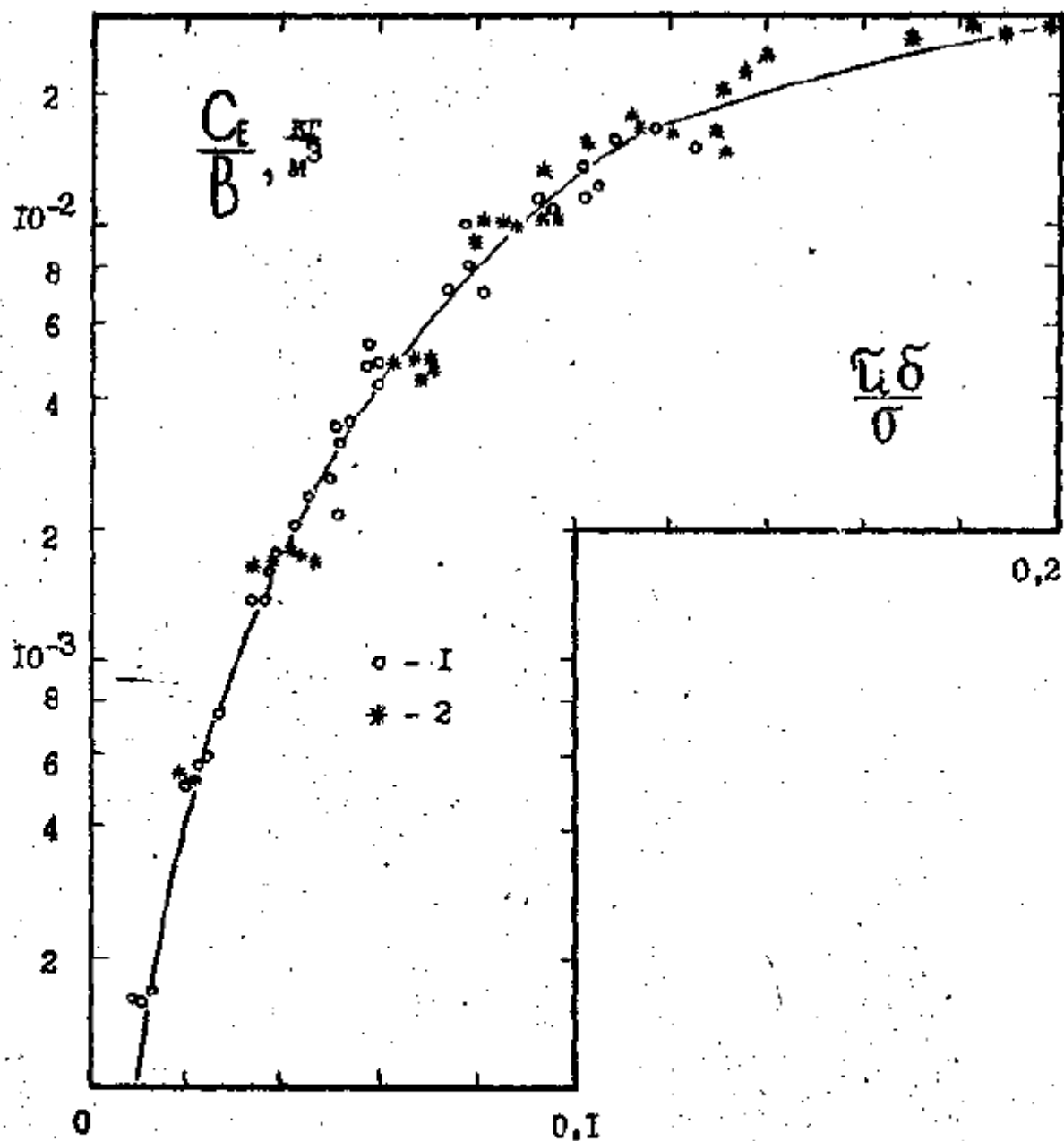


Рис. 5. Зависимость концентрации капель в потоке C_E от параметра $\xi; \delta/\sigma$: 1 - данные [7], поток вода - пар; 2 - данные [5], поток вода - воздух

4. Хаббард Г.Д., Милз А.Ф. Теплоотдача к турбулентной стекающей пленке с сопутствующим паровым потоком // Тр. Амер. об-ва инж. мех. Сер. С. Теплопередача. - 1976. - Т. 98. - № 2. - С. 183-185

5. Засядько Я.И. Гидродинамика двухфазных потоков с высокими объемными газосодержаниями применительно к условиям работы выпарных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук. - К., 1984. - 228 с.

6. Hewitt G. F., King J., Lovergrove P.M.C. Hold-up and pressure drop measurements in the two-phase annular flow of air-water mixtures // Brit. Chem. Eng. - 1963. - v.8. - p. 311-318.

7. Петренко В.П. Теплообмен в двухфазных потоках с высокими объемными паросодержаниями: Дис. ... канд. техн. наук. - К., 1986. - 230 с.