

ЛИТЕРАТУРА

1. Фракталы в физике // Тр. VI Междунар. симпоз. по фракталам в физике/Под ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти.— М.: Мир, 1988.
2. Procaccia I. Fractal structures in turbulence // J. Statist. Phys.— 1984.— V. 36, N 5—6.
3. Бершадский А. Г. Фрактальная структура турбулентных вихрей // ЖЭТФ.— 1989.— Т. 96, вып. 2.
4. Levich E., Tsinober A. On dynamical fractal models of homogeneous turbulence // Phys. Lett.— 1984.— V. A101, N 5—6.
5. Бершадский А. Г. О затухании турбулентности во вращающейся жидкости // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.— 1988.— Т. 24, № 4.
6. Townsend A. A. The mechanism of entrainment in free turbulent flows // J. Fluid Mech.— 1966.— V. 26, N 4.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика.— М.: Наука, 1988.
8. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика.— М.: Наука, 1967.— Т. 2.
9. Рис Ф., Вальдфогель А. Анализ фрактальной размерности облаков с мощными конвективными токами // Фракталы в физике.— М.: Мир, 1988.
10. Мирабель А. П., Монин А. С. Двумерная турбулентность // Успехи механики.— 1979.— Т. 2, № 3.
11. Kida S. Numerical simulation of two-dimensional turbulence with high-symmetry // J. Phys. Soc. Jap.— 1985.— V. 54, N 8.
12. Osborne A. R., Kirwan A. D., Provenzale A., Bergamasco L. Fractal drifter trajectories in the Kuroshio extension // Tellus.— 1989.— V. 41A.
13. Гледзер Е. Б. О законе 2/3 теории турбулентности и оценке содержащейся в нем постоянной на основе редукции уравнений гидродинамики // ЖЭТФ.— 1986.— Т. 91, вып. 3.
14. Кузнецов В. Р., Прасковский А. А., Сабельников В. А. Локальная структура турбулентности в свободных течениях с сильной перемежаемостью // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1988.— № 6.

г. Донецк

Поступила 5/1 1990 г.,
в окончательном варианте — 3/VIII 1990 г.

УДК 532.55

М. А. Гольдштик, С. С. Дахин

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ВИХРЕВЫХ КАМЕР С ГАЗОЖИДКОСТНЫМ СЛОЕМ

Промышленное использование вихревых камер (ВК) сдерживается недостаточной изученностью ряда вопросов, к которым относится определение гидравлического сопротивления ΔP_0 ВК с газожидкостным слоем. В литературе данный вопрос неоднократно обсуждался. Так, в [1—3] предложены следующие соотношения для ВК с неподвижным корпусом при закрутке газожидкостного слоя газом:

$$(1) \quad \Delta P = 2\Delta P_0 / (\rho'' W'^2) = 1$$

(ρ'' — плотность газа, W'' — скорость газа в щелях направляющего аппарата);

$$(2) \quad \Delta P = 0,8;$$

$$(3) \quad \Delta P = 23k$$

($k = s\eta$, s — относительное проходное сечение, $\eta = h/r_0$, h и r_0 — высота и радиус направляющего аппарата).

Сопоставления значений гидравлических сопротивлений, рассчитанных по (1)—(3), с экспериментальными данными [1, 2] провести не удастся, так как там не указаны геометрические размеры ВК. В то же время эти значения отличаются от экспериментальных данных [3], как правило, в несколько раз.

Применительно к ВК с закруткой газожидкостного слоя газом и вращающимся корпусом в [4] даны соотношения для расчета гидравлического сопротивления газожидкостного слоя:

$$(4) \quad \Delta P_0 = 2\rho' g_+ h_0$$

(ρ' — плотность жидкости, $g_+ = v_0^2/r_0$ — центробежное ускорение слоя, r_0 — радиус камеры, h_0 — высота исходного слоя, v_0 — скорость вращения слоя);

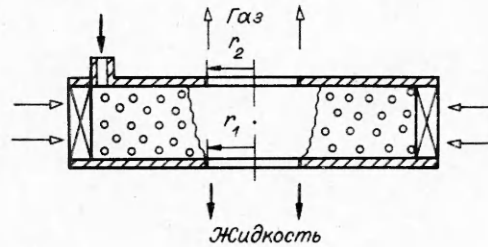
$$(5) \quad \text{EuFr} = 1700$$

($\text{Eu} = \Delta P_0 / (\rho' v_0^2)$, $\text{Fr} = v_0^2 / (g_+ h_0)$ — критерии Эйлера и Фруда). Из (5) получаем $\Delta P_0 = 1700\rho' g_+ h_0$, что противоречит (4).

Для ВК с неподвижным корпусом при закрутке газожидкостного слоя газом и жидкостью в [5] предложен метод расчета гидравлического сопротивления, основанный на аналогии между теплообменом и гидродинамическими процессами при непосредственном контакте газа с жидкостью, которой, как указывает автор (см. [5, с. 67]), практически не существует.

Цель данной работы — получение формул, пригодных для расчета гидравлического сопротивления ВК указанных выше конструкций при наличии вращающегося газожидкостного слоя.

Гидравлическое сопротивление ВК с газожидкостным слоем (рис. 1) состоит из сопротивлений: направляющего аппарата; закрученного газожидкостного слоя, расположенного на участке от r_0 до r_1 ; участка от r_1 до отверстия для выхода газа с радиусом r_2 .



Р и с. 1

Полное гидравлическое сопротивление ВК с газожидкостным слоем определяется формулой

$$(6) \quad \Delta P_0 = \frac{\xi \rho' W'^2}{2} + \int_{r_1}^{r_0} \varepsilon \rho' v_0^2 \frac{dr}{r} + \frac{\xi_2 \rho_2'' u''^2}{2}.$$

Здесь ξ и ξ_2 — коэффициенты гидравлического сопротивления направляющего аппарата и участка от r_1 до отверстия для выхода газа; ε — удельное содержание жидкости в газожидкостном слое; ρ_2'' и u'' — плотность и тангенциальная скорость газа на радиусе r_2 .

Поскольку для закрученного газожидкостного слоя в ВК выполняется равенство [6] $v = v_0/W'' = \text{const}$, то с учетом того, что среднее значение удельного содержания жидкости $\varepsilon = 0,5$ [7], формула (6) интегрируется:

$$(7) \quad \Delta P = \xi - \rho_- v^2 \ln r + \xi_2 \rho_+ u_-^2$$

$$(\rho_- = \rho'/\rho'', r = r_1/r_0, \rho_+ = \rho_2''/\rho'', u_- = u''/W'').$$

Первые две составляющие (7) обычно значительно больше последней. Рассмотрим вначале этот случай

$$(8) \quad \Delta P = \xi - \rho_- v^2 \ln r.$$

В (8) неизвестны ξ и v , без которых невозможно определить полное гидравлическое сопротивление.

Для расчета скорости вращения газожидкостного слоя в ВК при закрутке его газом и вращающимся корпусом в [6] предложена формула

$$(9) \quad v = \beta \omega - 0,5 \alpha r + \sqrt{\alpha + 0,25 \alpha^2 r^2 + (1 - \beta r) \alpha \omega - (\gamma - \beta^2) \omega^2},$$

где $\beta = 0,75(1 - r^4)/(1 - r^3)$; $\omega = \omega_0 r_0/W''$; ω_0 — угловая скорость вращения корпуса камеры; $\alpha = 3\psi\eta/(c_f \varepsilon \rho_- (1 - r^3))$; $\psi = s/\sin \theta$; θ — угол между направлением ввода газа в слой и радиусом ВК, проведенным к месту ввода; c_f — коэффициент трения слоя о торцы ВК. Для ВК с газожидкостным слоем обычно выполняется неравенство

$$(10) \quad G'' W'' r_0 \gg G'' v_0 r_1$$

(G'' — массовый расход газа). С учетом (10) выражение (9) приводится к виду

$$(11) \quad v \approx \beta \omega + \sqrt{\alpha + (1 - \beta r) \alpha \omega - (\gamma - \beta^2) \omega^2}.$$

Поскольку при $0 < r < 1$ выполняется неравенство $\alpha(1 + (1 - \beta r) \omega) \gg (\gamma - \beta^2) \omega^2$, формула (11) упрощается:

$$(12) \quad v \approx \beta \omega + \sqrt{\alpha + (1 - r \beta) \alpha \omega}.$$

В случае неподвижного корпуса (12) имеет наиболее простой вид

$$(13) \quad v \approx \sqrt{\alpha}.$$

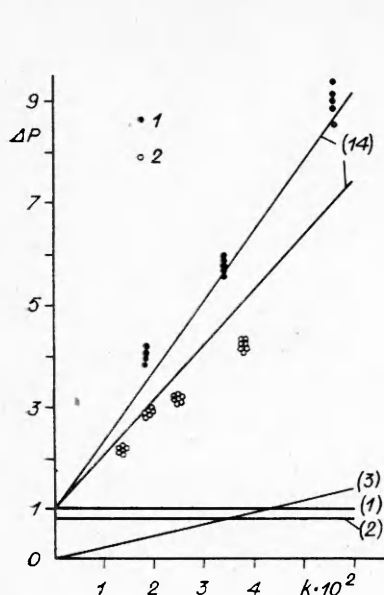


Рис. 2

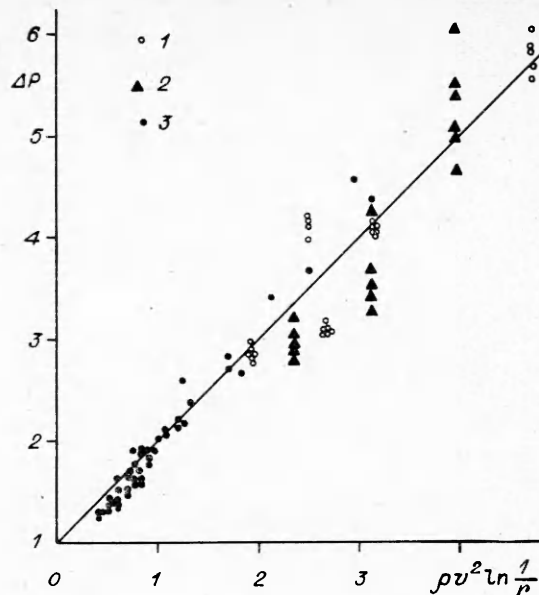


Рис. 3

С использованием (13) и эмпирического равенства [6] $c_f \varepsilon = 0,0125$ при $\sin \theta \approx 1$ из формулы (8) для водно-воздушного слоя находим

$$(14) \quad \Delta P = \zeta + 240k \ln(1/r)/(1 - r^3).$$

На рис. 2 сопоставляются экспериментальные данные [3] для ВК с $h = 0,03$ м (точки 1 — $r = 0,66$, $r_0 = 0,074$ м; 2 — $r = 0,80$, $r_0 = 0,124$ м) с зависимостями безразмерного гидравлического сопротивления от комплекса k , рассчитанными по соотношениям (1)—(3) и (14). Каждая из групп плотно лежащих экспериментальных точек является набором величин ΔP , полученным в диапазоне изменения W'' от 14 до 94 м/с. Зависимости (1)—(3) сильно отличаются от экспериментальных, в то же время рассчитанные по формуле (14) зависимости при $\zeta = 1$ согласуются с экспериментальными данными с точностью $\pm 25\%$.

Обобщение экспериментальных данных [3, 4] о гидравлических сопротивлениях ВК с неподвижным корпусом (точки 1 — с цилиндрическими направляющими аппаратами и размерами: $r_0 = 0,074$ м, $h = 0,03$ м, $r_1 = 0,049$ м, $s = 0,0526$; $0,0726$; $0,1026$; $0,1578$; $0,042$; $0,085$; точки 2 — с коническими направляющими аппаратами и размерами: $r_0 = 0,119$ м, $r'_0 = 0,11$ м, $h = 0,038$ м, $s = 0,0792$; $0,1056$; $0,1320$) и вращающимся корпусом (точки 3 — $s = 0,045$, $r_0 = 0,1$ м, $h = 0,037$ м, $n = 100$; 200 ; 300 ; 400 об/мин, $h_0 = 2,0$; $5,3$; $8,0$; $10,6$; $13,5$; $16,0$; $16,9$ мм, $W'' = 43,0$; $53,8$; $64,6$; $75,3$; $86,1$; $96,9$ м/с) приведено на рис. 3.

В связи с тем что в [4] для данных по гидравлическому сопротивлению фиксировалась не толщина газожидкостного слоя H , а определяемая по объему заливаемой жидкости толщина слоя h_0 , в расчетах по формуле (8) применялось соотношение $\varepsilon' \ln r \approx \varepsilon' H/r_0 \approx \rho' h_0/r_0$. Как видно из рис. 3, использование $\zeta = 1$ позволяет с точностью $\pm 25\%$ провести обобщение имеющихся в литературе экспериментальных результатов по гидравлическим сопротивлениям ВК с газожидкостным слоем. На основе этого можно заключить, что при $\theta \approx 90^\circ$ коэффициент сопротивления направляющих аппаратов ВК равен единице.

Учесть вклад сопротивления участка от r_1 до отверстия для выхода газа в полное гидравлическое сопротивление удается, если заметить, что для этой цели подходит метод расчета гидравлического сопротивления собственно циклонных камер, предложенный в [8]. На основе сводной обработки данных по аэродинамическому сопротивлению собственно циклон-

Обозначения рис. 4	Тип циклона
1 — холодная модель	ЭНИН
2 — стенд, жидкое топливо	ЦКТИ
3 — стенд, уголь	ЭНИН
4 — холодная модель	ЦКТИ
5 — стенд, уголь	ЦКТИ
6 — холодная модель	КазНИИЭ
7 — » »	ЦКТИ
8 — стенд, уголь	МВТУ

ных камер в виде зависимости их относительного сопротивления от отношения диаметра выходного отверстия к диаметру направляющего аппарата d/D ($d = 2r_2$, $D = 2r_0$) для $d/D = 0,3-0,7$ предложена формула [8]

$$(15) \Delta P_+ = \Delta P_- / (\Delta P_-)_{0,45} = (0,9D/d - 1)$$

(ΔP_- — сопротивление собственно циклонной камеры, индекс 0,45 обозначает, что сопротивление взято для камеры с $d/D = 0,45$).

Согласно (15), выражение для сопротивления собственно циклонной камеры имеет вид

$$\Delta P_- = (\zeta_2 \rho_2 u''^2 / 2)_{0,45} (0,9D/d - 1)$$

(ζ_2 — коэффициент аэродинамического сопротивления).

Для всего диапазона изменения d/D физически более обоснованной представляется формула

$$(16) \Delta P_- / (\Delta P_-)_{0,45} = (d/D)_{0,45}^2 / (d/D)^2 = 0,2025 (D/d)^2,$$

полученная из закона сохранения момента импульса (без учета трения) в предположении, что в равенстве $\Delta P_- = \zeta_2 \rho_2 u''^2 / 2$ ζ_2 не зависит от d/D .

О соответствии формулы (16) (линия) экспериментальным данным [8] можно судить по рис. 4. Таким образом,

$$(17) \Delta P_- = 0,2025 (D/d)^2 (\zeta_2 \rho_2 u''^2 / 2)_{0,45}.$$

Предложенный [8] метод расчета сопротивления собственно циклонных камер рекомендуется в [9] для расчета сопротивлений вихревых горелок с аксиальным вводом топлива. Следовательно, формулы (16), (17) справедливы и для вихревых горелок с аксиальным вводом топлива. Обозначения, использованные на рис. 4, и соответствующие им типы циклонов указаны в таблице.

Полное гидравлическое сопротивление ВК с газожидкостным слоем определить расчетом не удастся, если ВК имеет сложную поверхность торцевых стенок и не известны распределения содержания жидкости и тангенциальной скорости в газожидкостном слое. Это полностью относится к ВК центробежных теплообменных аппаратов (ЦТА) [5].

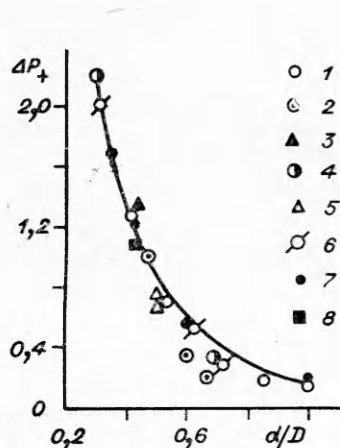


Рис. 4

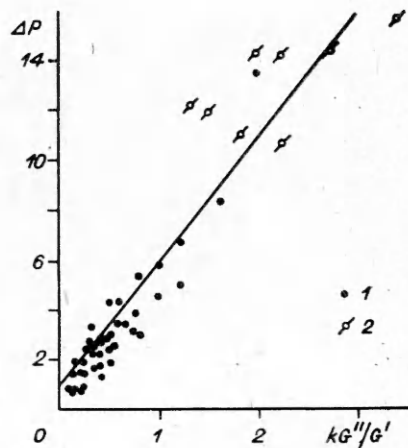


Рис. 5

Поскольку основной вклад в полное гидравлическое сопротивление ВК и в этом случае вносят первые две составляющие, экспериментально должна наблюдаться зависимость

$$(18) \quad \Delta P = 1 + \Delta P_1$$

($\Delta P_1 = \Delta P'_1 / (\rho_1'' W''^2)$), $\Delta P'_1$ — гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя).

На рис. 5 в координатах безразмерного гидравлического сопротивления и комплекса kG'/G'' представлены экспериментальные данные [5, с. 17] (точки 1 — $r_0 = 0,055$ м, $\eta = 1,45$, $G'/G'' = 3,33; 6,25; 4,17; 2,08; 5,56; 8,33; 13,89$, $s = 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10$ и $r_0 = 0,055$ м, $\eta = 0,73$, $s = 0,10$, $G'/G'' = 3,33; 6,25; 4,17; 2,08; 5,56; 8,33; 13,89$; точки 2 — $r_0 = 0,055$ м, $\eta = 4,54$, $s = 0,12$, $G'/G'' = 2,38; 2,78; 3,33; 4,17; 3,57; 4,17; 5,00; 6,25$). Поскольку в указанные ВК ЦТА жидкость вводилась при больших величинах расхода жидкости G' , а ее вход осуществлялся тангенциально и с большой скоростью, то увеличение расхода жидкости приводило к росту скорости вращения газожидкостного слоя и соответствующей составляющей полного гидравлического сопротивления.

Наблюдающаяся линейная зависимость безразмерного гидравлического сопротивления от указанного комплекса приближенно описывается уравнением $\Delta P = 1 + 5kG'/G''$, имеющим вид (18). Это еще раз подтверждает справедливость изложенного здесь подхода, хотя последнее уравнение и противоречит зависимостям, предложенным в [5, с. 83].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдуков А. П., Казаков В. И. Гидродинамика вращающегося барботажного слоя // Дисперсные системы в энергохимических процессах. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1982.
2. Бурдуков А. П., Дорохов А. Р., Казаков В. И. и др. Разработка вихревых барботажных аппаратов для абсорбционной очистки газов // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1985. — Вып. 1, № 4.
3. Казаков В. И., Кармановский Д. Г. Влияние геометрических характеристик газораспределительных устройств на гидродинамику вращающегося барботажного слоя // Процессы переноса в аппаратах энергохимических производств. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1985.
4. Бурдуков А. П., Гольдштик М. А., Казаков В. И., Ли Т. В. Тепло- и массоперенос в закрученном барботажном слое // Расчет тепломассообмена в энергохимических процессах. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1981.
5. Андреев Е. И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. — Л.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Гольдштик М. А., Ли Т. В., Ханин В. М., Смирнов Н. П. О скорости вращения газожидкостного слоя в вихревой камере // Процессы переноса в энергохимических многофазных системах. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1983.
7. Lafferty J. F., Hammitt F. J. An experimental study of vortex two-phase flow // Trans. Amer. Nucl. Soc. — 1967. — V. 10, N 1.
8. Тагер С. А. Расчет аэродинамического сопротивления циклонных камер сгорания // Теплоэнергетика. — 1971. — № 7.
9. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. — М.: Мир, 1987.

г. Новосибирск

Поступила 14/VI 1988 г.,
в окончательном варианте — 12/X 1990 г.

УДК 532.522.2.621.966.1.977

С. Л. Жбанкова, А. В. Колпаков

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КАПИЛЛЯРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СТРУИ РАСТЯЖЕНИЯ

Экспериментально исследуется развитие и распад капиллярной струи жидкости, возникающей при осесимметричном растяжении, расположенного между двумя поверхностями объема жидкости. Струя растяжения образуется в процессе работы генератора монодисперсных капель (ГМК) типа «вибрирующая игла». Объем жидкости, участвующий в процессе растяжения, задается в диапазоне $V_0 = (0,5—15,0) \cdot 10^{-11}$ м³.