Доклады Академии наук СССР
1955. Том 104, № 4

ГИДРАВЛИКА

Н. И. СЕМЕНОВ

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

(Представлено академиком Г. М. Кржижановским 27 IV 1955)

Обозначения. $G_г$, $G_ж$ — весовые расходы газа и жидкости; $C = \frac{G_г}{G_г + G_ж}$, $C_{ор} = \frac{G_г/\gamma_г}{G_г/\gamma_г + G_ж/\gamma_ж}$ — соответственно, весовое и объемное газосодержания; $Re_{см} = \frac{4}{\pi D g}\left(\frac{G_г}{\mu_г} + \frac{G_ж}{\mu_ж}\right)$, $Fr_{см} = \frac{v_{см}^2}{gD}$ — соответственно, критерии Рейнольдса и Фруда смеси.

Гидравлические сопротивления течений газо-жидкостных смесей в трубах изучены недостаточно. Влияние на процесс течений многих факторов делает эксперимент сложным. Отсутствие единой методики расчета гидравлических сопротивлений затрудняло анализ опытных данных. Рассчитывались отношения перепадов давления при течении смесей к перепадам при течении только одного из компонентов с тем же его расходом, что и в смеси. Эти отношения изменяются в 10^4 раз в диапазоне газосодержаний от 0,01 до 0,99 и в основном отражают рост $\gamma_ж/\gamma_{см}(1-C)^2$ или $\gamma_г/\gamma_{см}C^2$. На фоне этого роста остается незаметным влияние других основных критериев на гидравлические сопротивления.

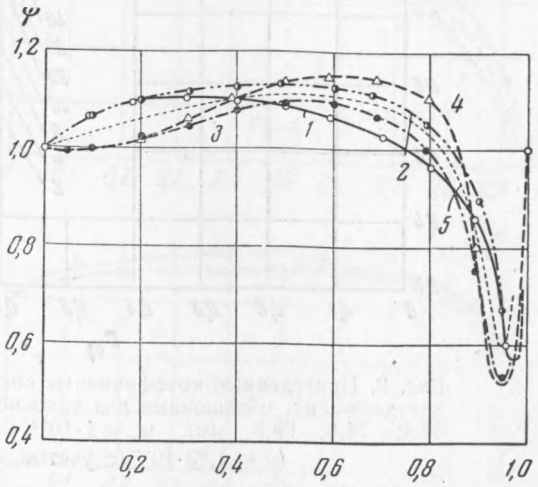


Рис. 1. Приведенные коэффициенты сопротивления. *1* — $d = 25{,}8$ мм; *2* — 47,4 мм; *3* — 74,7 мм; *4* — 99,8 мм; *5* — осредненная кривая

С. Г. Телетов (1) предложил исследовать закономерность гидравлических сопротивлений смесей в виде $\psi = \lambda_{см}/\lambda(Re)$, где ψ представляет отклонение коэффициентов сопротивления смеси $\lambda_{см}$ от коэффициента сопротивления для однородной жидкости $\lambda(Re)$ при $Re = Re_{см}$

$$\lambda_{см} = \lambda(Re)\,\psi(C_{ор}, Fr_{см}, \mu, \gamma, \ldots).$$

Коэффициенты ψ имеют порядок 1 или близкий к 1. Поэтому этот метод представляет преимущества перед упомянутыми выше и предъявляет более высокие требования к эксперименту.

Впервые приведенные коэффициенты были рассчитаны по опытным данным С. И. Костерина (2). Зависимость их от основных двух крите-

риев C_{op} и $Fr_{см}$ тогда не была еще четко установлена из-за недостаточной точности опытов.

Нами было проведено более 300 опытов по гидравлическим сопротивлениям течений воздухо-водяных смесей в горизонтальных трубах диаметром $D = 26$; 47; 75 и 100 мм при отношении удельных весов компонентов $\gamma = \gamma_ж / \gamma_г = 637$ и вязкостей $\mu = \mu_г / \mu_ж = 1{,}83 \cdot 10^{-2}$. На трубе диаметром в 47 мм были проведены также опыты при пониженной и повышенной вязкости жидкости — при $\mu = 1{,}25 \cdot 10^{-2}$ и $3{,}66 \cdot 10^{-2}$. Скорость

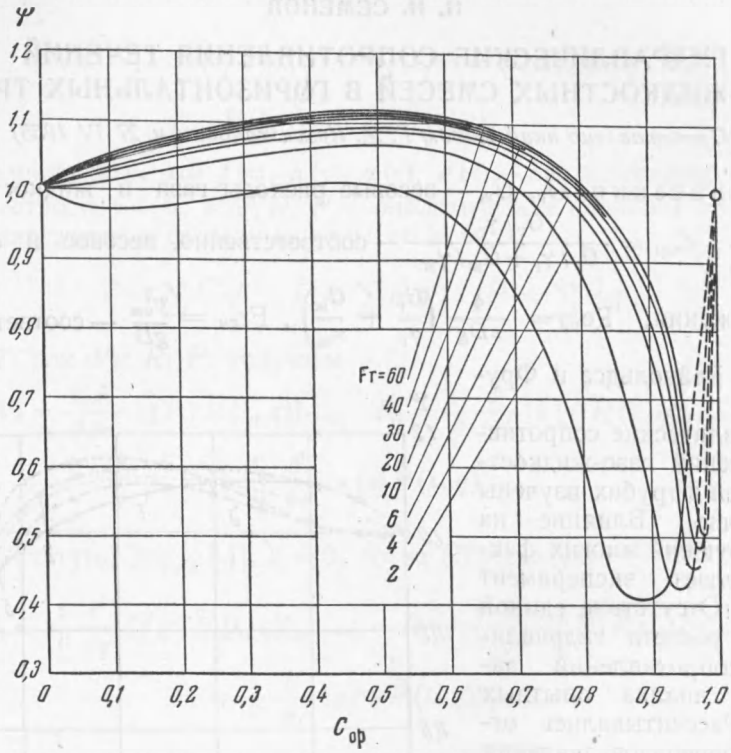


Рис. 2. Приведенные коэффициенты сопротивлений в функции газосодержания, обобщенные для труб четырех диаметров ($d = 25{,}8$; 47,4; 74,6; 99,8 мм). $\mu_ж = 1 \cdot 10^{-3}$, $\mu_г = 1{,}83 \cdot 10^{-5}$ кг/м·сек, ($\mu = 1{,}83 \cdot 10^{-2}$ (с учетом сжимаемости)

смеси $v_{см} = \left(\frac{G_г}{\gamma_г} + \frac{G_ж}{\gamma_ж}\right) \frac{4}{\pi D^2}$ изменялась в пределах от 0,5 до 5,7 м/сек и более, а газосодержание от 0 до 1. Благодаря неоднократным контрольным тарировкам измерительных приборов и проверке опытных труб на постоянство гидравлических сопротивлений при течении однофазной жидкости ошибка определения приведенного коэффициента ψ для смесей не превышала 5,3%.

На рис. 1 представлена зависимость $\psi(C_{op})$ для $Fr_{см} = 10$, полученная на трубах четырех диаметров. Малое расхождение кривых показывает, что влияние диаметра на изменение ψ достаточно точно учитывается $Fr_{см}$. На основании таких зависимостей были построены осредненные кривые (см. кривую 5 на рис. 1) и сведены на общий график (рис. 2).

Для группы кривых при $Fr_{см} < 2$ коэффициент ψ остается меньше единицы при всех газосодержаниях, за исключением крайних точек для $C_{op} = 0$ или 1, где, по условию, $\psi = 1$. Для $Fr_{см} > 2$ и $0 < C_{op} < 0{,}80$ ψ изменяется в пределах $1 < \psi < 1{,}15$. Достигнув максимума, он падает до $\psi_{мин} < 1$ при $C_{op} > 0{,}85$ и затем вновь возрастает до 1. С ростом $Fr_{см}$, начиная от 6, его влияние на ψ становится весьма незначительным.

Опыты при различных вязкостях жидкости показали, что изменение μ от $1{,}25\cdot10^{-2}$ до $3{,}66\cdot10^{-2}$, т. е. в 3 раза, влияет на изменение ψ в пределах 20—40% при $Fr_{см} = 2{,}15$. С ростом $Fr_{см}$ это влияние быстро снижается и уже при $Fr_{см} > 4$—6 практически отсутствует (рис. 3).

Опытные данные других исследований ([3,5,6]), обобщенные нами в приведенных коэффициентах, дали вполне удовлетворительное согласие с указанными выше данными.

Установленные закономерности находят объяснение в гидродинамике смесей. Основными являются два фактора: относительные скорости компонентов и пульсации течения смесей. С ростом относительной скорости условный динамический напор, принятый для расчета $\lambda_{см}$, завышается по сравнению с истинным

$$Hg_{ист} = C_{ои}\frac{\gamma_г v_г^2}{2g} + (1 - C_{ои})\frac{\gamma_ж v_ж^2}{2g} < \frac{[\gamma_г C_{ор} + \gamma_ж(1-C_{ор})]v_{см}^2}{2g} = Hg_{усл.}$$

Это ведет к снижению величин $\lambda_{см}$ и ψ, рассчитываемых по $\Delta P = \Delta P_{тр} + \Delta P_{уск}$.

Рост пульсаций скоростей повышает трение и перепад давления. В зависимости от превалирующего влияния одного из этих факторов коэффициент может быть больше или меньше единицы.

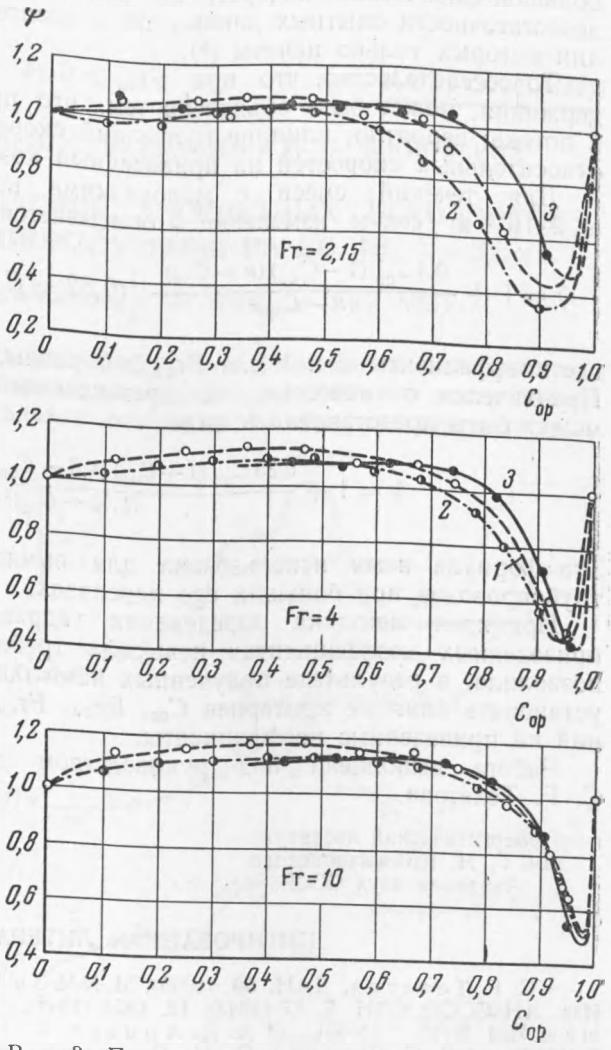


Рис. 3. Приведенные коэффициенты сопротивлений для трубы $d = 47{,}4$ мм в функции газосодержания для различных отношений вязкости $\mu = \mu_г / \mu_ж$. *1* — $\mu = 1{,}25\cdot10^{-2}$; *2* — $1{,}83\cdot10^{-2}$; *3* — $3{,}66\cdot10^{-2}$

Карты форм течений по М. А. Мологину ([7]) подтверждают, что спад кривых ψ находится в области перехода из пробкового к разделенному течению. В этой области поверхность соприкосновения между компонентами уменьшается и относительные скорости быстро растут. Вызванное этим завышение условного динамического напора приводит к спаду кривых в области $0{,}85 < C_{ор} < 1$ даже при наличии сильных пульсаций, т. е. при повышенной диссипации энергии. Минимальное значение ψ почти соответствует критическим скоростям по М. А. Мологину.

Обработка опытных данных А. А. Арманда, измерявшего истинное газосодержание при течениях газо-жидкостных смесей в трубе диаметром 25 мм, показала, что $\psi_{ист}$, рассчитанные по истинному динамическому

напору смеси, в области $C_{ор} > 0{,}85$ имеют максимумы > 1 и снижаются до 1 при газосодержаниях, близких к 1.

Обработка данных опытов в величинах $\psi_{ист}$ хотя и представляет большой физический интерес, но пока практически невозможна из-за недостаточности опытных данных по относительным скоростям, обобщения которых только начаты (8).

То обстоятельство, что при $Fr_{см} > 6$ ψ зависит только от газосодержания, может быть объяснено тем, что при развитой турбулентности в потоке, вероятно, влияние пульсаций скоростей компенсирует влияние относительных скоростей на приведенный коэффициент.

Для течений смеси с маловязкими компонентами порядка $\mu \leqslant \leqslant 2 \cdot 10^{-3}$ кг/сек·м изменение ψ описывается формулой

$$\psi = 1 + \frac{0{,}4\, C_{ор}\,(1 - C_{ор})\,(a - C_{ор})}{(b - C_{ор})^2} \left\{(0{,}82 - C_{ор}) \left[1 - \frac{2\,(1 - C_{ор})}{Fr_{см}}\right] - \frac{0{,}27}{Fr_{см}}\right\},$$

где коэффициенты a и b для $Fr_{см} \geqslant 6$ равны, соответственно, 1,5 и 1,02. Практически с точностью, не превышающей 2%, последняя формула может быть представлена в виде

$$\psi = 1 + \frac{0{,}35\, C_{ор}\,(1 - C_{ор})\,(1{,}6 - C_{ор})\,(0{,}79 - C_{ор})}{(1{,}02 - C_{ор})^2}.$$

Эта формула нами использована для вычисления давления по длине трубопроводов при больших его перепадах.

Принятая методика определения гидравлических сопротивлений в приведенных коэффициентах повысила требования к экспериментам и позволила, в результате полученных нами более точных опытных данных, установить влияние критериев $C_{ор}$, $Re_{см}$, $Fr_{см}$, μ форм и пульсаций течений на приведенные коэффициенты.

Работа выполнена под руководством доктора технических наук С. Г. Телетова.

Энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского
Академии наук СССР

Поступило
22 IV 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Г. Телетов, ДАН, 50, (1945); 51, №№ 3 и 8 (1948). [2] С. И. Костерин, Изв. АН СССР, ОТН, 7, 37 (1943); 12, 1824 (1949). [3] А. А. Арманд, Г. Г. Трещев, Изв. ВТИ, 3 (1953). [4] А. А. Арманд, Е. И. Невструева, Изв. ВТИ, 2 (1950). [5] В. С. Шугаев, С. И. Сорокин, ЖТФ, 9, 20 (1939). [6] Л. Ю. Красякова, ЖТФ, 22, 4 (1952). [7] М. А. Мологин, ДАН, 94, № 5 (1954). [8] Б. К. Козлов, ЖТФ, 24, 12 (1954). [9] L. M. Boelter, R. C. Kepner, Ind. Eng. Chem., 31, 4 (1939). [10] R. C. Martinelli, L. M. Boelter et al., Trans. ASME, 66, № 2, 139 (1944).