

ГИДРОМЕХАНИКА

Б. К. КОЗЛОВ

**ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СКОРОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ
ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ В ТРУБАХ**

(Представлено академиком М. В. Кирпичевым 9 IV 1954)

Для гидравлических расчетов течения пара и газо-жидкостных смесей в трубах наиболее важными величинами являются истинный удельный вес смеси и коэффициент гидравлического сопротивления ⁽¹⁾. Оба эти параметра были предметом ряда экспериментальных исследований.

А. П. Крылов ^(2,3) в опытах, проведенных на вертикальных трубах диаметрами 38; 64 и 100 мм в зоне объемных расходных газосодержаний в смеси от 0,9 до 1,0, измерял общий вес смеси путем отсечки участка опытной трубы кранами. Разность между общим перепадом давления и весом смеси на исследуемом участке трубы определяла общее сопротивление трения и ускорения. В результате исследования им рекомендована формула для истинного удельного веса смеси

$$\gamma_{см} = \gamma_{ж} \frac{V_{ж} + f}{V_{г} + V_{ж} + f} \quad (1)$$

Эта формула основана на двух соотношениях:

$$\gamma_{см} = \gamma_{ж} (1 - C_{он}), \quad w = v_{см} + 1,$$

где $\gamma_{ж}$ — удельный вес жидкости; $V_{г}$ и $V_{ж}$ — объемный расход газа и жидкости; $C_{он}$ — истинное объемное газосодержание; w — истинная скорость газа; $v_{см}$ — скорость смеси.

В опытах А. А. Арманда ^(4,5), проведенных на горизонтальной трубе диаметром 25 мм, вес смеси определялся путем взвешивания экспериментального участка трубы. На вертикальной трубе того же диаметра специальными весами определялась сила тангенциального напряжения на стенке трубы и общее динамическое давление на выходе из трубы. Это дало возможность определить отдельно вес смеси, сопротивление трения и ускорения. В результате опытов для горизонтальной и вертикальной труб дана общая зависимость истинного объемного газосодержания в смеси от расходного газосодержания при значениях последнего от 0,02 до 0,9

$$C_{он} = 0,833 C_{ор}. \quad (2)$$

При обработке опытных данных по истинным удельным весам смеси встает вопрос — искать ли обобщенные зависимости непосредственно для истинного удельного веса или определяющего его газосодержания или же для определяющей эти величины относительной скорости. Очевидно, что целесообразно это сделать для той величины, которая легче может быть проанализирована физически и в дальнейшем

выражена в физических обобщенных зависимостях. Таковой, конечно, является относительная скорость.

Согласно общему соотношению

$$\frac{u}{v} + 1 = \frac{C_{ор}}{1 - C_{ор}} \frac{1 - C_{он}}{C_{он}}, \quad (3)$$

где $u = w - v$ — разность истинных скоростей газа и жидкости, и формуле (1) получаем эмпирическую зависимость также для приведенной относительной скорости

$$\frac{u}{v} = \frac{f}{V_{ж}} = \frac{1}{v_{пр}}. \quad (4)$$

В силу того же общего соотношения (3) и формулы (2) получаем эмпирическую зависимость вида

$$\frac{u}{v} = \frac{0,2}{1 - C_{ор}}. \quad (5)$$

Таким образом, согласно формуле (1), приведенная относительная скорость зависит только от приведенной скорости жидкости, а согласно формуле (2) — от объемного расходного водосодержания смеси.

Выражение истинного удельного веса смеси в функции расходного удельного веса $\gamma'_{см}$, приведенной относительной скорости u/v , весового расходного газосодержания C и объемного $C_{ор}$, имеет вид:

$$\gamma_{см} = \gamma'_{см} \frac{1 + \frac{u}{v}(1 - C)}{1 + \frac{u}{v}(1 - C_{ор})}, \quad (6)$$

где $\gamma'_{см} = \gamma_{ж} - C_{ор}(\gamma_{ж} - \gamma_{г})$; $C_{ор} = \frac{V_{г}}{V_{г} + V_{ж}}$; $C = \frac{V_{г}\gamma_{г}}{V_{г}\gamma_{г} + V_{ж}\gamma_{ж}}$.

В общем случае основными параметрами, определяющими относительную скорость газо-жидкостной смеси в трубах, как это следует из теории подобия, является: газосодержание смеси, критерий Fr смеси, критерий Ga жидкости, отношение удельного веса газа к удельному весу жидкости и отношение вязкости газа к вязкости жидкости:

$$\frac{u}{v} = f\left(T_{ор}, Fr_{см}, Ga_{ж}, \frac{\gamma_{г}}{\gamma_{ж}}, \frac{\mu_{г}}{\mu_{ж}}\right). \quad (7)$$

Значения критериев и комплексов:

$$Fr_{см} = \frac{v_{см}^2}{gd}; \quad Ga_{ж} = \frac{gd^3}{\nu_{ж}^3}; \quad T_{ор} = \frac{C_{ор}}{1 - C_{ор}}; \quad v_{см} = \frac{4G_{см}}{\pi d^2 \gamma'_{см}}.$$

При обработке опытных данных по относительным скоростям в критериальной форме имеет свои преимущества также величина приведенной относительной скорости в виде $u/v_{см}$.

Для установления более обобщенной зависимости типа (7), применимой в широкой области газосодержаний, скоростей смеси и диаметров труб, нами была применена специальная методика, позволившая опыты, проведенные сериями, при различных постоянных расходах жидкости в разных достаточно узких зонах газосодержаний, обработать в функции критериев $T_{ор}$, $Fr_{см}$ и $Ga_{ж}$.

На рис. 1А дана зависимость приведенной относительной скорости газо-жидкостной смеси в горизонтальной трубе диаметром 25 мм. Как видно из рисунка, при газосодержаниях меньше 0,75 относительная

скорость зависит только от $C_{ор}$ и не зависит от $Fr_{см}$. При $C_{ор} > 0,75$ начинается резкий рост относительной скорости, причем тем раньше, чем меньше критерий $Fr_{см}$. При значениях $C_{ор}$, стремящихся к нулю, u/v также стремится к нулю.

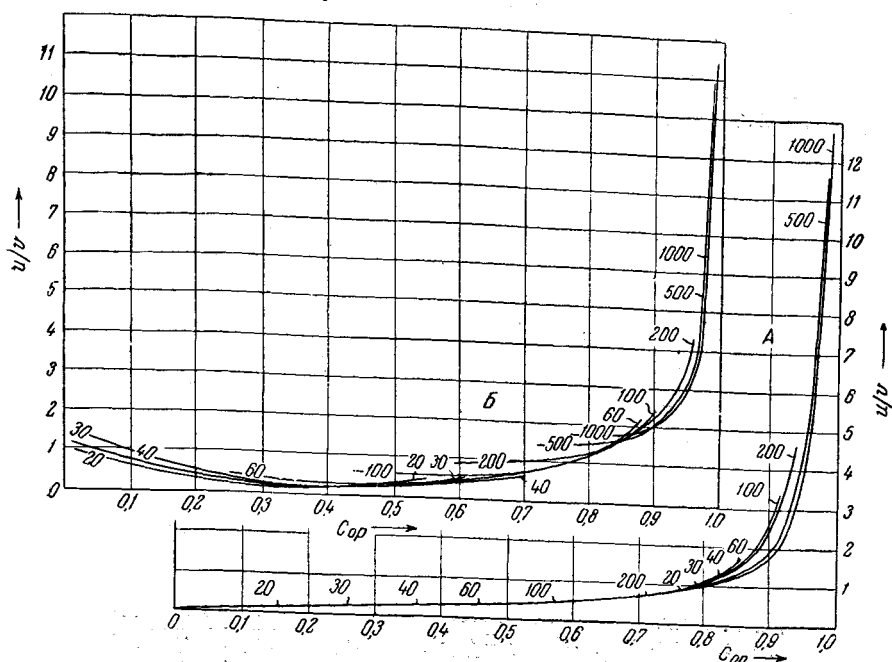


Рис. 1. Приведенные относительные скорости газожидкостного потока в функции $C_{ор}$ и $Fr_{см}$, полученные по опытным данным на трубе диаметром 25 мм. А — горизонтальная труба, Б — вертикальная

Представленная на рис. 1А зависимость относительной скорости от $C_{ор}$ и $Fr_{см}$ для горизонтальной трубы описывается формулой

$$\frac{u}{v} = a T_{ор}^{0.6}. \quad (8)$$

Для $C_{ор} < 0,75$ (или $T_{ор} < 3$) вне зависимости от $Fr_{см}$

$$a = 0,4.$$

Для $C_{ор} > 0,75$ (или $T_{ор} > 3$) и $Fr_{см}$ от 5 до 5000

$$a = 4 \left(0,1 + \frac{T_{ор} - 3}{Fr_{см}} \right).$$

Зависимость от диаметра трубы этой формулой еще не отражена, так как она построена по опытным данным для трубы только одного диаметра 25 мм.

На рис. 1Б дана зависимость относительной скорости для вертикальной трубы того же диаметра. Как видно из рисунка, значение приведенной относительной скорости с ростом $C_{ор}$ от 0,02 до 0,4—0,5 для разных критериев $Fr_{см}$ падает. Начиная с $C_{ор} = 0,4—0,5$ до 0,75 наблюдается медленный рост относительной скорости. С дальнейшим увеличением $C_{ор}$ до 0,995 приведенная относительная скорость резко возрастает. Аналогично горизонтальной трубе, она начинает расти тем раньше, чем меньше $Fr_{см}$. В отличие от горизонтальной трубы, относительная скорость растет в сторону малых значений $C_{ор}$, что объясняется, очевидно, влиянием подъемной силы газовых пузырьков, движущихся в вертикальной трубе в менее стесненных условиях.

На рис. 2 представлена зависимость относительной скорости для вертикальных труб трех диаметров: 38; 64 и 100 мм. Для труб диаметром 38 и 64 мм опытные кривые захватывают область C_{op} от 0,88 до 0,995 и критериев Fr_{cm} от 30 до 1000; для трубы в 100 мм область C_{op} 0,975—0,995 и Fr_{cm} от 10 до 100. Представленные графические зависимости показывают, что закономерность относительной скорости имеет одинаковый характер для вертикальных труб всех четырех диаметров.

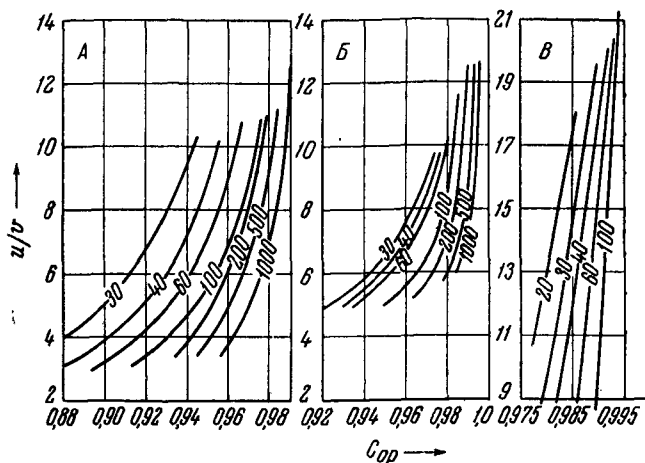


Рис. 2. Приведенные относительные скорости газо-жидкостного потока, полученные по опытным данным на вертикальных трубах диаметрами 38 мм (А), 64 мм (Б) и 100 мм (В) в функции C_{op} и Fr_{cm}

Полученные опытные кривые позволили построить общую эмпирическую формулу для приведенной относительной скорости газо-жидкостной смеси для труб диаметром 25; 38; 64 и 100 мм в области газосодержаний от 0,02 до 0,995 и критериев Fr_{cm} от 10 до 1000:

$$\frac{u}{v} = a Fr_{cm} T_{op}^{-1/2} + b Fr_{cm}^{-1/2} T_{op}, \quad (9)$$

где $a = 0,002$; $b = 3,85 - 0,0013 Ga_{ж}^{1/2}$.

Относя значение кинематической вязкости жидкости к температуре 18° и выражая диаметр труб в метрах, получим

$$b = 3,85 - 27,5 d.$$

Нижняя граница значений C_{op} , для которых можно пользоваться эмпирической формулой (9), есть

$$C_{op} = 0,0035 Fr_{cm}^{2/4}. \quad (10)$$

Сравнение формул (4) и (5) с предлагаемой формулой (9) показывает, что последняя более точно отображает экспериментальную зависимость по приведенной относительной скорости газо-жидкостной смеси. Она пригодна для определения истинного удельного веса газо-жидкостной смеси в более широкой области скоростей смеси и объемных расходов газосодержаний.

Поступило
5 IV 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ С. Г. Телетов, ДАН, 50, 99 (1945); 51, № 8 (1946). ² А. П. Крылов, Нефть, хоз., № 8 (1935). ³ И. М. Муравьев, А. П. Крылов, Эксплуатация нефтяных месторождений, 1949. ⁴ А. А. Арманд, Изв. ВТИ, № 1 (1946). ⁵ А. А. Арманд, Е. И. Невструева, Изв. ВТИ, № 2 (1950).