

ОБ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ДИАГРАММЕ РЕЖИМОВ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ

Корельштейн Л. Б., ООО «НТП Трубопровод»

В данной статье предлагается универсальная диаграмма, позволяющая оценивать режим двухфазного газожидкостного течения в трубопроводе без сложных расчетов.

На страницах журнала ТПА мы уже рассказывали о проблемах и современных подходах к расчету двухфазных газожидкостных течений в трубопроводах [1].

Как известно, при газожидкостном течении могут реализовываться различные варианты расположения и движения

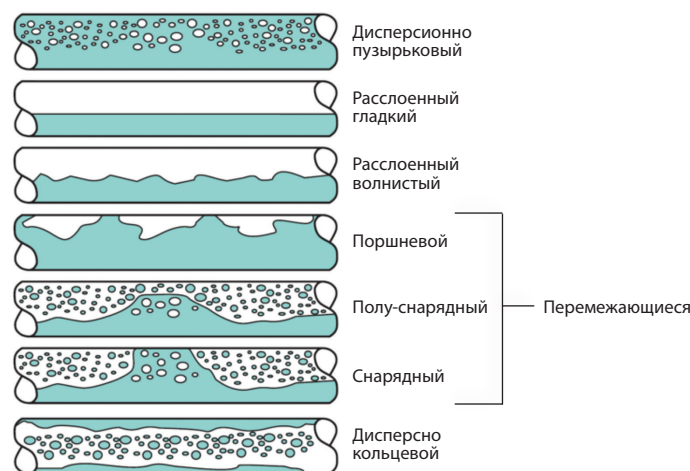


Рисунок 1 – Режимы течения, возникающие в горизонтальных трубах

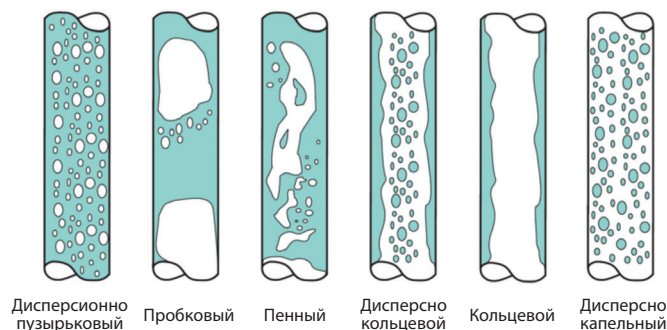


Рисунок 2 – Режимы течения, возникающие в вертикальных трубах

жидкой и газовой фаз – так называемые режимы течения. Примеры режимов течения приведены на рис. 1 и 2.

Одной из важнейших проблем расчета газожидкостных потоков является определение режима течения. Особенно важно предсказание переменяющихся режимов течения, которые могут вызвать опасные вибрации в трубопроводах.

Для предсказания режимов течения предложено множество методов и диаграмм – однако все они либо чисто эмпирические и не имеют прозрачного физического смысла, либо требуют расчетов (зачастую трудоемких) и выбора некоторых замыкающих соотношений для используемых при этом вспомогательных величин (таких как коэффициент межфазного трения, доля

капельной взвеси жидкой фазы внутри газовой фазы и др.).

На практике диаграммы режимов течения чаще всего строят в координатах так называемых приведенных скоростей v_{sg} , v_{sl} , рассчитываемых как скорости, которые имела бы каждая из фаз, если бы она заполняла все сечение трубы:

$v_{sg} = Q_g / (\rho_g A)$, $v_{sl} = Q_l / (\rho_l A)$, где Q_g , Q_l , ρ_g , ρ_l – массовые расходы и плотности газовой и жидкой фаз, $A = (\pi D^2) / 4$ – площадь поперечного сечения трубы диаметром D .

Приведенные скорости связаны с истинными средними скоростями фаз по сечению трубы соотношениями $v_{sg} = \alpha_g v_g$, $v_{sl} = \alpha_l v_l$, где α_g , α_l – истинные объемные содержания фаз (которые заранее неизвестны и определение которых при расчете двухфазного течения может быть весьма нетривиальным). Типичный пример диаграммы режимов течения в приведенных скоростях для горизонтальных труб показан на рис. 3.

Подобные диаграммы нашли широкое применение при расчетах двухфазного течения, однако они имеют тот недостаток, что границы областей режимов течения на них плавают, зависят от свойств продукта и диаметра трубы и их в каждом случае приходится рассчитывать. Возникает вопрос – а нельзя ли использовать вместо приведенных скоростей такие их безразмерные аналоги, чтобы характер диаграммы режимов течения сохранился, но границы режимов течения практически не зависели от свойств продуктов и диаметра трубы?

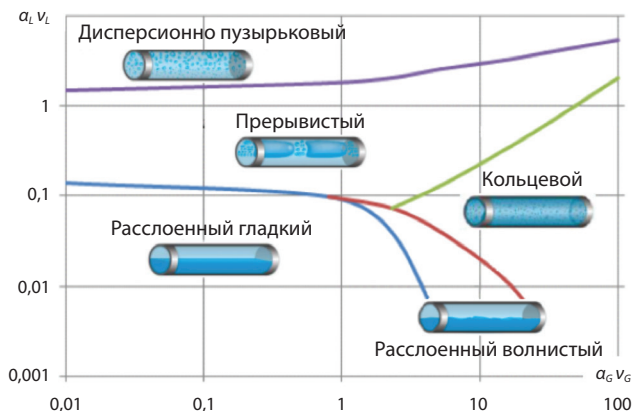


Рисунок 3 – Диаграмма режимов течения в координатах приведенных скоростей

Режимы течения, горизонтальная труба

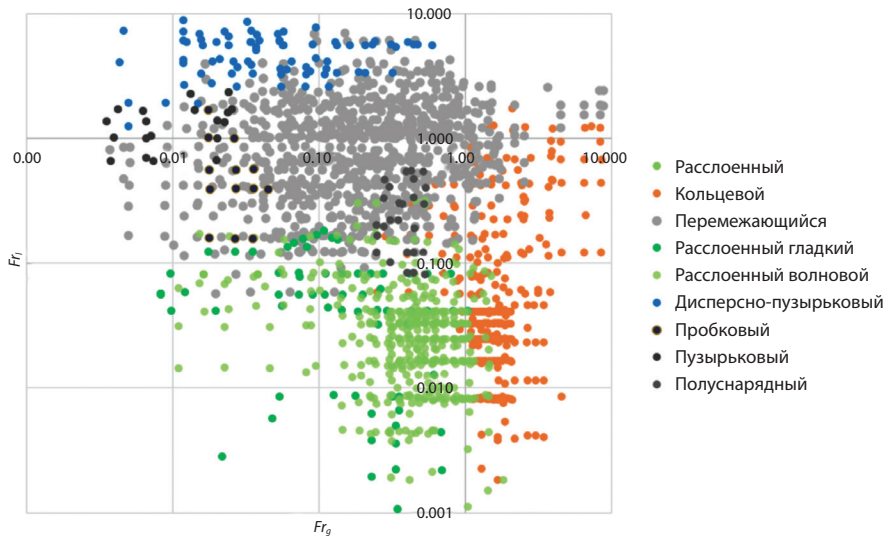


Рисунок 4 – Диаграмма режимов течения в безразмерных координатах

Режимы течения, уклон 2 град

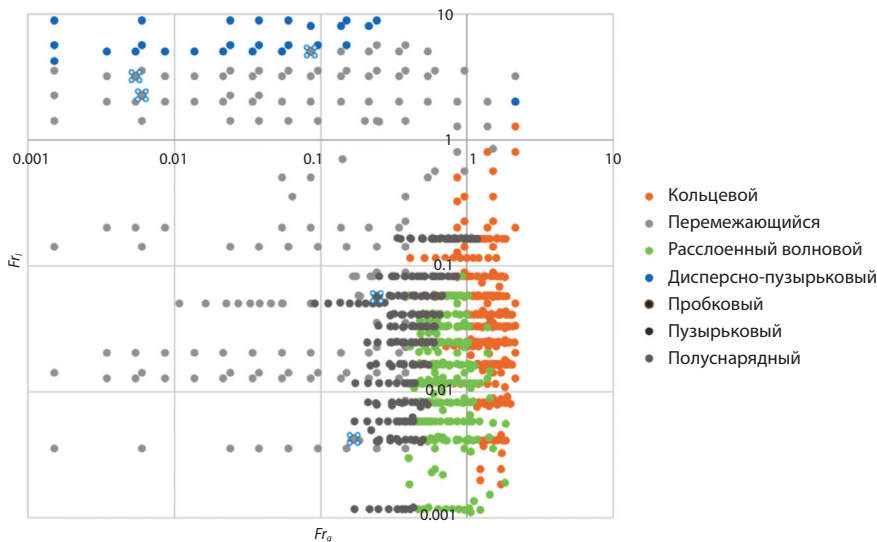


Рисунок 5 – Диаграмма режимов течения в безразмерных координатах, восходящее течение

Режимы течения, уклон -1 град

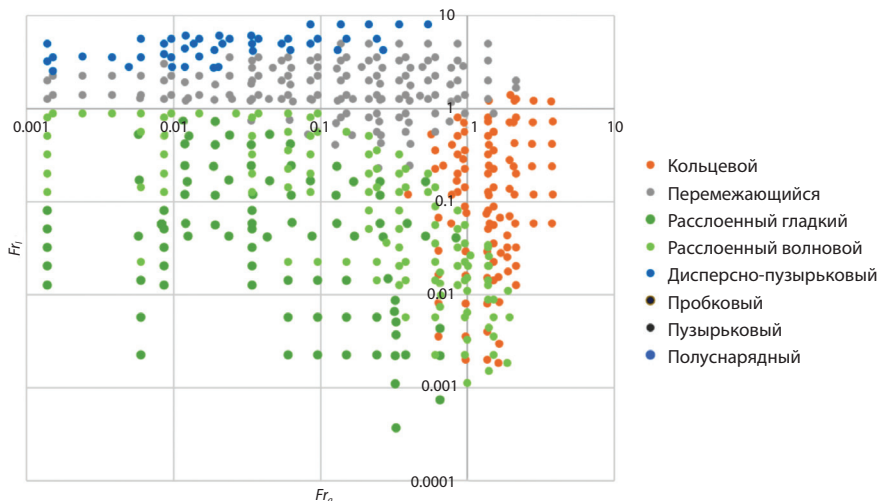


Рисунок 6 – Диаграмма режимов течения в безразмерных координатах, нисходящее течение

Оказывается, в определенной степени это возможно! Для этого вместо приведенных скоростей предлагается использовать такие давно известные безразмерные параметры, как числа Фруда для двухфазного течения

$$Fr_g = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} \frac{v_{sg}}{\sqrt{gD}}, \quad Fr_l = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g}} \frac{v_{sl}}{\sqrt{gD}},$$

где g – ускорение свободного падения.

В этих координатах были построены диаграммы режимов течения для труб с различными углами уклона (от -90 до 90 град) для всех имеющихся в распоряжении исследовательской группы Tulsa University Fluid Flow Projects данных экспериментальных исследований за последние несколько десятков лет. При этом учитывались только данные с умеренной вязкостью жидкой фазы (высокая вязкость существенно меняет границы режимов течения). Границу, отделяющую высоковязкую жидкую фазу, можно провести по безразмерному параметру

$$N_a = \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}} \frac{\mu_l}{\sigma}$$

(где μ_l – динамическая вязкость жидкой фазы, σ – коэффициент поверхностного натяжения): области течений с умеренной вязкостью соответствуют значения $N_a < 1$.

На рис. 4 показана диаграмма режимов течения для горизонтальных труб на базе около 1800 экспериментальных точек, с условными диаметрами труб от 25 до 150, включающая данные как для низкого, так и для высокого давления. Как видно, границы основных режимов течения (перемежающегося, расслоенного, кольцевого и дисперсно-пузырькового) определяются довольно четко, что позволяет с большой вероятностью предсказать режим течения по легко рассчитываемым величинам Fr_g , Fr_l . Аналогичные диаграммы для других углов уклона трубы также демонстрируют достаточно четкие границы (см., например, рис. 5, 6), однако для более уверенных выводов требуется больше экспериментальных данных. Работа по их сбору и обработке продолжается!

Автор выражает благодарность Eduardo Pereyra за помощь в сборе и обработке экспериментальных данных для исследования.

Москва, октябрь 2022 года

Список литературы:

1. Бабенко А. В., Корельштейн Л. Б. Гидравлический расчет двухфазных газожидкостных течений: современный подход // ТПА. – 2016. – № 2 (83). – С. 38–42.