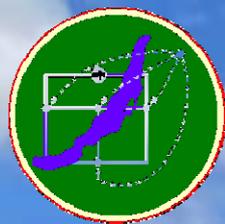




Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН



**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ  
АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА  
РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ И  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**ТРУДЫ**

**XVIII Всероссийского научного семинара**

**Алтай  
12 – 18 сентября 2022 г.**

**Иркутск  
2022**

---

ФГБУН Институт Систем Энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН

---

## XVIII Всероссийский научный семинар

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Труды семинара

12 – 18 сентября 2022 г.

Алтай

Иркутск  
2022

УДК 519.6+519.8

Труды XVIII Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Алтай, 12 – 18 сентября 2022 г. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2022. – 477 с.

ISBN 978-5-93908-155-9.

В сборнике научных трудов обсуждаются актуальные проблемы математического моделирования трубопроводных систем (ТПС) энергетики – тепло-, водо-, нефте-, и газоснабжения, а также развития методов теории гидравлических цепей, имеющих межотраслевое значение.

Сборник предназначен для сотрудников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, преподавателей вузов, студентов и аспирантов.

Ответственный за выпуск: к.т.н. Токарев Вячеслав Вадимович

Без объявления.

ISBN 978-5-93908-155-9

© Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2022

## ОБ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ДИАГРАММЕ РЕЖИМОВ ГАЗО-ЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ

Корельштейн Л.Б.

(ООО «НТП Трубопровод», г. Москва)

### Введение

В трудах семинара и на страницах отечественных профильных журналов автор и его коллеги из НТП Трубопровод уже рассказывали о проблемах и методах расчета двухфазного газо-жидкостного течения в трубопроводах, в том числе о проблеме определения режима течения [1-3].

Как известно, при газо-жидкостном течении могут реализовываться различные варианты расположения и движения жидкой и газовой фаз – так называемые режимы течения. Примеры режимов течения в горизонтальных и вертикальных трубах приведены на рис.1 и 2.

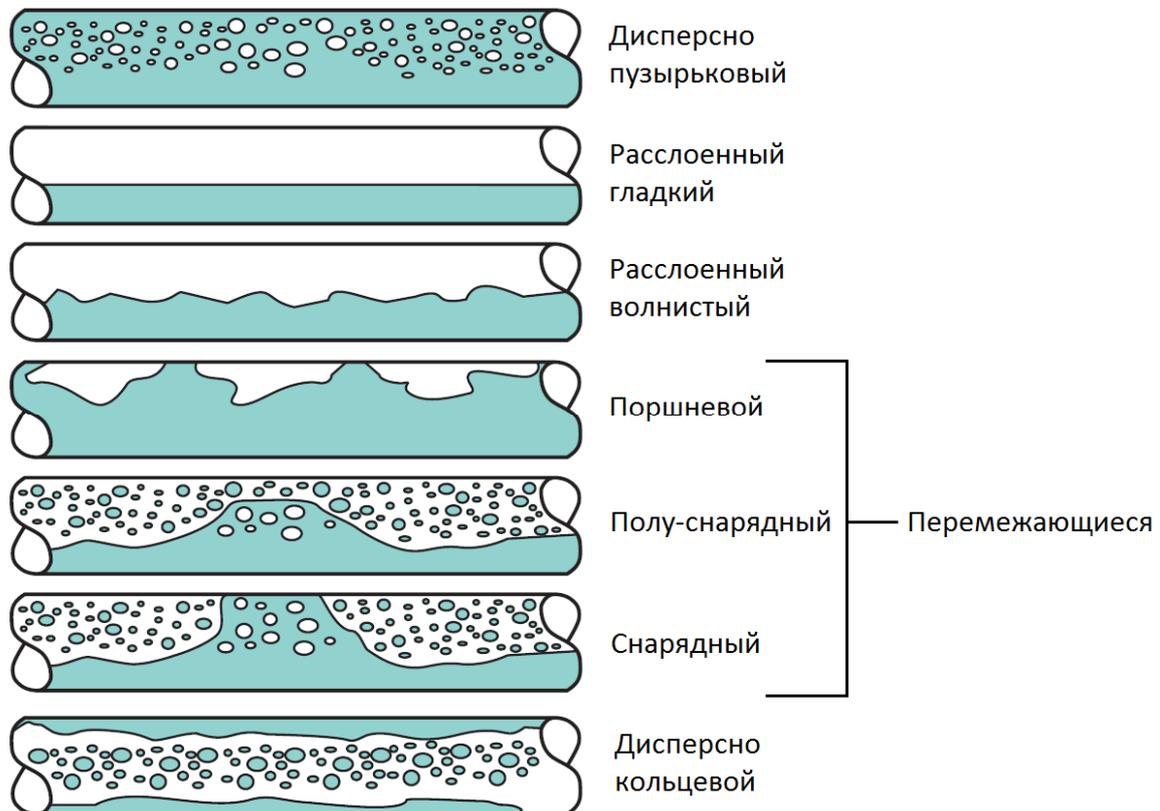


Рис. 1. Режимы течения, возникающие в горизонтальных трубах

Особенно важно на практике предсказание перемежающихся режимов течения, которые могут вызвать опасные вибрации в трубопроводах.

В данной статье сделана попытка предложить метод предсказания режима течения, основанный на простых и легко вычисляемых безразмерных параметрах и соответствующих диаграммах.



Рис. 2. Режимы течения, возникающие в вертикальных трубах

### Диаграммы режимов течения

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  $Q_g$ ,  $Q_l$ ,  $\rho_g$ ,  $\rho_l$  – 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  $\alpha_g$ ,  $\alpha_l$  – истинные объемные содержания фаз (которые заранее неизвестны и определение которых при расчете двухфазного течения может быть весьма нетривиально). Типичный пример диаграммы режимов течения в приведенных скоростях для горизонтальных труб приведен на рис.3.

Подобные диаграммы нашли широкое применение при расчетах двухфазного течения, однако 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?

Оказывается, в определенной степени это возможно!

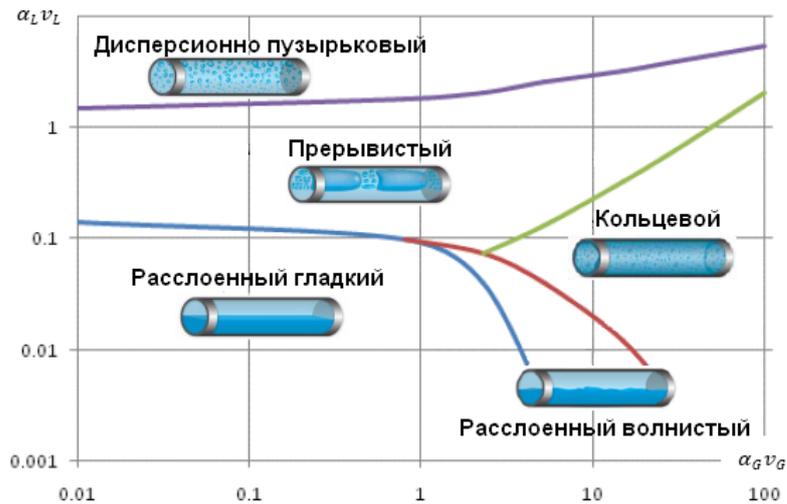


Рис. 3. Диаграмма режимов течения в координатах приведенных скоростей

### Анализ размерностей двухфазного газожидкостного течения

Для правильного выбора безразмерных параметров выполним анализ размерностей задачи газожидкостного течения в трубах.

Если не учитывать эффекты теплообмена и ограничится приближенно изотермическим течением, задача управляется следующими 11 независимыми параметрами:

- 2 параметра, характеризующих течение:

$Q_g$  - массовый расход газовой фазы, кг/с;

$Q_l$  - массовый расход жидкой фазы, кг/с;

- 3 параметра, характеризующие трубу:

$\beta$  – угол уклона трубы, град;

$D$  – внутренний диаметр трубы, м;

$\delta$  – шероховатость внутренней стенки трубы, м;

- 5 параметров, характеризующих свойства транспортируемых продуктов:

$\rho_g$  – плотность газовой фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_l$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_g$  – динамическая вязкость газовой фазы, Па·с (кг/м·с);

$\mu_l$  – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с (кг/м·с);

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения между жидкой и газовой фазами, Н/м (кг/с<sup>2</sup>)

- 1 параметр окружающей среды:

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Таким образом, согласно пи-теореме, задача описывается 11-3=8 безразмерными параметрами.

Однако не все перечисленные выше параметры задачи одинаково существенны, поэтому число безразмерных параметров можно сократить. Сравнительная важность различных параметров описана в Таблице 1.

Сравнительная значимость управляющих параметров задачи

Параметр	Сравнительная значимость
$\beta$	Критически важен
$Q_g$	Очень важен
$Q_l$	Очень важен
$\rho_g$	Очень важен
$\rho_l$	Очень важен
$D$	Очень важен
$g$	Очень важен
$\mu_l$	Важно только в случае высоковязкой жидкой фазы (когда ее течение близко к ламинарному)
$\mu_g$	На практике не важен (ламинарное течение газовой фазы очень редко)
$\delta$	Влияет (умеренно) только на потери давления
$\sigma$	Влияет не очень сильно

Таким образом, для течений с умеренно вязкой жидкой фазой для определения режима течения существенны только угол уклона трубы и 6 размерных параметров – что дает только 3 размерных параметра дополнительно к углу уклона!

В статьях [5, 6] были предложены два таких независимых параметра (число Фруда смеси  $Fr_m$  и параметр  $X^*$ ), которые, как оказалось, хорошо коррелируют с такими характеристиками двухфазного течения, как отношение скоростей движения фаз и потери на трение. В качестве третьего независимого безразмерного параметра можно принять  $\rho_g/\rho_l$ , который учитывает влияние давления.

Заметим, что при этом  $X^* = Fr_l/Fr_g$ ,  $Fr_m = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} Fr_g + Fr_l$ , где числа Фруда для течения газовой и жидкой фаз определяются по приведенным скоростям по формулам  $Fr_g = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} \frac{v_{sg}}{\sqrt{gD}}$ ,  $Fr_l = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g}} \frac{v_{sl}}{\sqrt{gD}}$ . В таком виде они были предложены еще Lockhart и Martinelli [4], опущен только множитель  $\cos \beta$ , учет которого не имеет особого смысла, поскольку влияние угла уклона все равно учитывается отдельно. При этом Rodrigues в своей диссертации [7] заметил, что  $Fr_g$  уже сам по себе во многом учитывает влияние давления.

Поэтому можно предположить, что безразмерные параметры  $Fr_g$ ,  $Fr_l$  являются весьма подходящими для использования в диаграммах режимов течения вместо приведенных скоростей.

## Универсальные диаграммы режимов течения

В координатах были  $Fr_g$ ,  $Fr_l$  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 Project 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, предположительно можно провести по безразмерному параметру  $N_a = \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g) \mu_l}{\rho_l \sigma}}$  (где  $\mu_l$  – динамическая вязкость жидкой фазы,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения): области течений с умеренно 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, включающих данные как для низкого, так и 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 величинам легко рассчитываемых величин  $Fr_g$ ,  $Fr_l$ . Аналогичные диаграммы для других углов уклона трубы также демонстрируют достаточно четкие границы режимов (см. например рис.5. б), однако для более уверенных выводов тут требуется больше экспериментальных данных. Работа по их сбору и обработке продолжается!



Рис. 4. Диаграмма режимов течения в безразмерных координатах

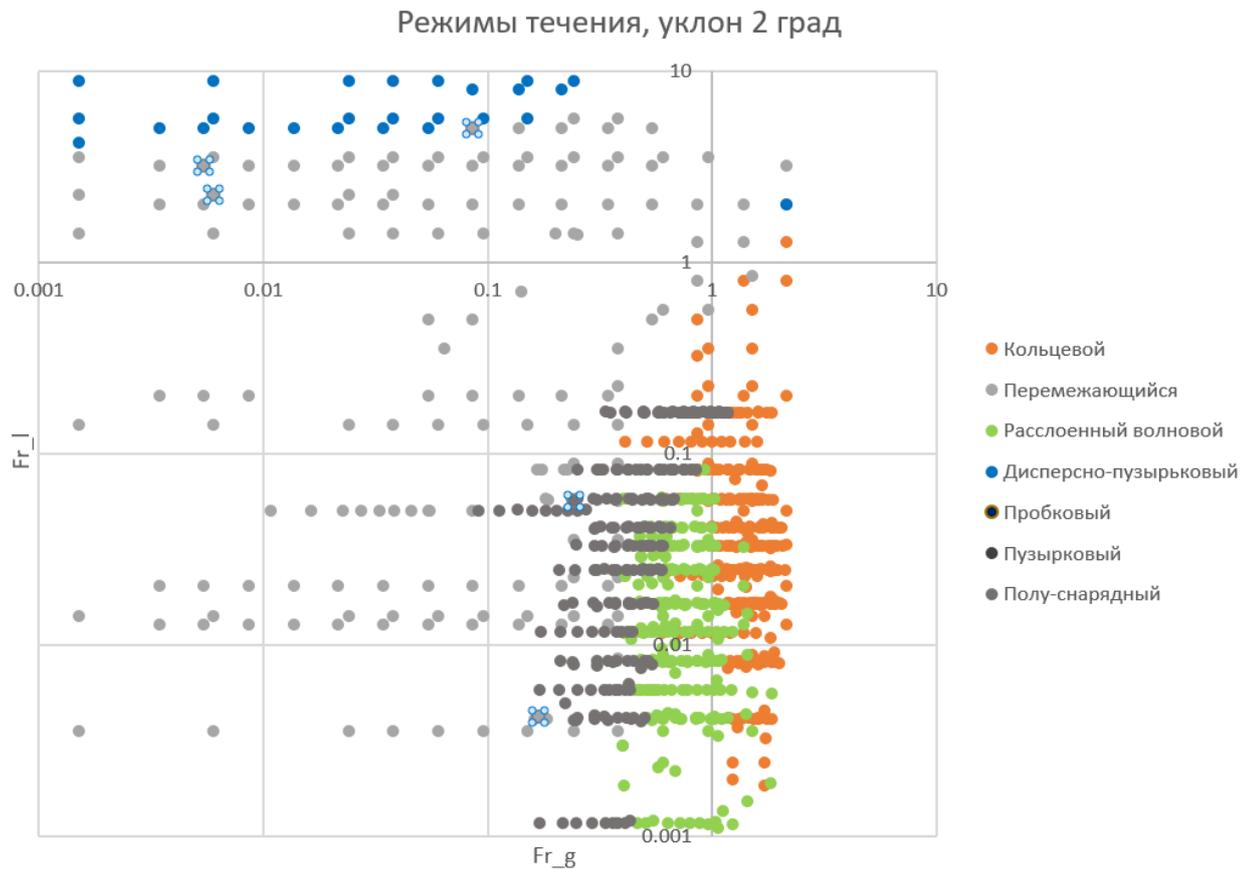


Рис. 5. Диаграмма режимов течения в безразмерных координатах, восходящее течение

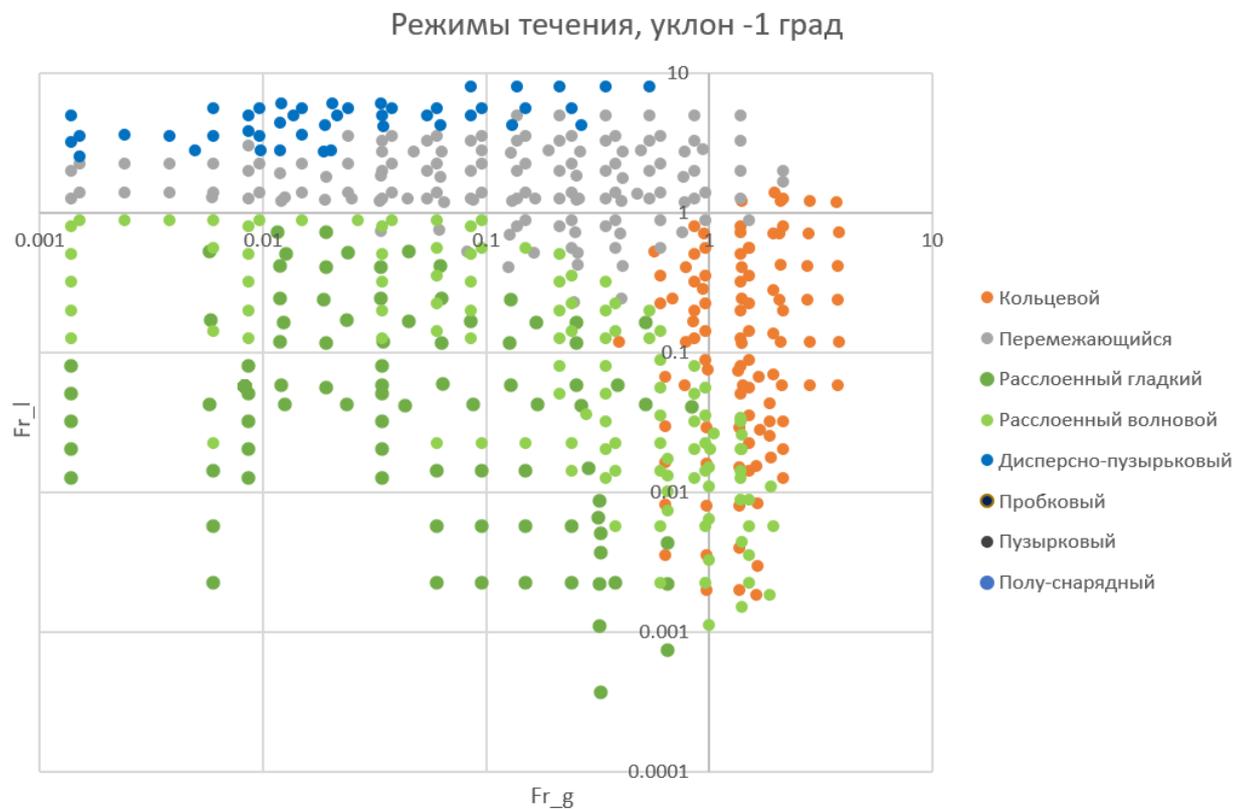


Рис. 6. Диаграмма режимов течения в безразмерных координатах, нисходящее течение

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

## Литература

1. Бабенко А.В., Корельштейн Л.Б. Гидравлический расчет двухфазных газожидкостных течений: современный подход. ТПА, 2016, №2(83), с.38-42.
2. Бабенко А.В., Лисин С.Ю. Методы расчета режимов течения в трубопроводах и их программная реализация // Труды XII семинара «Математическое моделирование трубопроводных систем энергетики». 2010. С. 165-173.
3. Бабенко А. В., Юдовина Е.Ф., Корельштейн Л. Б., Гартман Т. Н. Программная реализация модуля гидравлических расчетов двухфазных газожидкостных потоков // Программные продукты и системы. 2013. №1. С. 141-146.
4. Lockhart, R.W., Martinelli, R.C., 1949. Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase. Two-Component Flow in Pipes. Chemical Engineering Progress, 1949, Vol. 45, pp. 39-48.
5. Al-Sarkhi A., Sarica C., Pereyra E. New Dimensionless Number for Gas-Liquid Flow in Pipes. Int. J. Multiphase Flow, 2016, Vol. 18, pp.15-19.
6. Al-Sarkhi A., Sarica C. Power-Law Correlation for Two-Phase Pressure Drop of Gas/Liquid Flows in Horizontal Pipelines. SPE Proj Fac & Const, 2010, Vol. 5(4), pp.176-182.
7. Rodrigues H.T. Pressure Effects on Low-Liquid Loading Two-Phase Flow in Near-Horizontal Upward Inclined Pipes. PhD Thesis. The University of Tulsa, 2018.