

М. А. МОЛОГИН

**ФОРМЫ ТЕЧЕНИЙ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ
В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ**

(Представлено академиком Г. М. Кржижановским 10 XII 1953)

Формы течений газо-жидкостных смесей были предметом ряда советских (1-4,7) и некоторых зарубежных (8,9) исследований. Этими исследованиями было установлено большое разнообразие форм течений.

Нами были проведены подробные визуальные наблюдения и кино-съемка течений воздушно-водяных смесей в горизонтальных трубах диаметром $\approx 25, 50, 75$ и 100 мм в области газосодержаний $C_{ор}$ от 0 до 1 при скоростях смеси от 0,2 до 6 м/сек, а для трубы диаметром ≈ 50 мм — до 20 м/сек при давлениях на входе $\approx 1,8 \div 2$ ата, на сливе $\approx 1,3$ ата. Это исследование дало возможность построить впервые уточненные карты областей форм течений газо-жидкостных смесей и сделать ряд выводов о их закономерностях.

Карты форм течений построены в координатах: по оси абсцисс — скорость смеси $v_{см}$, по оси ординат — объемное расходное газосодержание $C_{ор}$, т. е. отношение объемных расходов газа и смеси (см. рис. 1).

Установлены следующие основные формы течений газо-жидкостных смесей.

I. Разделенное течение. В основном при малых скоростях смеси наблюдается спокойное разделенное течение газа и жидкости с плоской поверхностью раздела (см. рис. 2а).

С ростом скорости на поверхности раздела появляются волны (рис. 2б) небольшой амплитуды. Как только гребни волн начинают смачивать верхнюю образующую стенки трубы, разделенное течение переходит в пробковое. По мере роста скорости смеси наблюдались различные формы пробкового течения.

II. Пробковое течение без пены. Эта форма течения (рис. 2в) занимает наибольший диапазон скоростей смеси для трубы диаметром 25 мм. С увеличением диаметра трубы область этой формы течений уменьшается.

III. Пробковое течение с пеной за пузырем (рис. 2г).

IV. Пробковое течение с пеной между пузырями (рис. 2д).

V. Пробковое течение с пеной по всей поверхности раздела (рис. 2е).

VI. Визуально-эмульсионное течение. При более высоких скоростях смеси (3—4 м/сек) и при малых газосодержаниях наблюдается визуально-эмульсионное течение с мелкими воздушными пузырьками.

VII. Кольцевое течение (рис. 2ж). При больших газосодержаниях жидкость стремится в виде пленки все более равномерно

распределяться по поверхности стенки, и течение переходит в кольцевую форму.

На трубе диаметром ≈ 50 мм при скоростях смеси до 20 м/сек равномерное распределение водяной пленки еще не было достигнуто, в то же время на ее поверхности наблюдались интенсивные капиллярные волны.

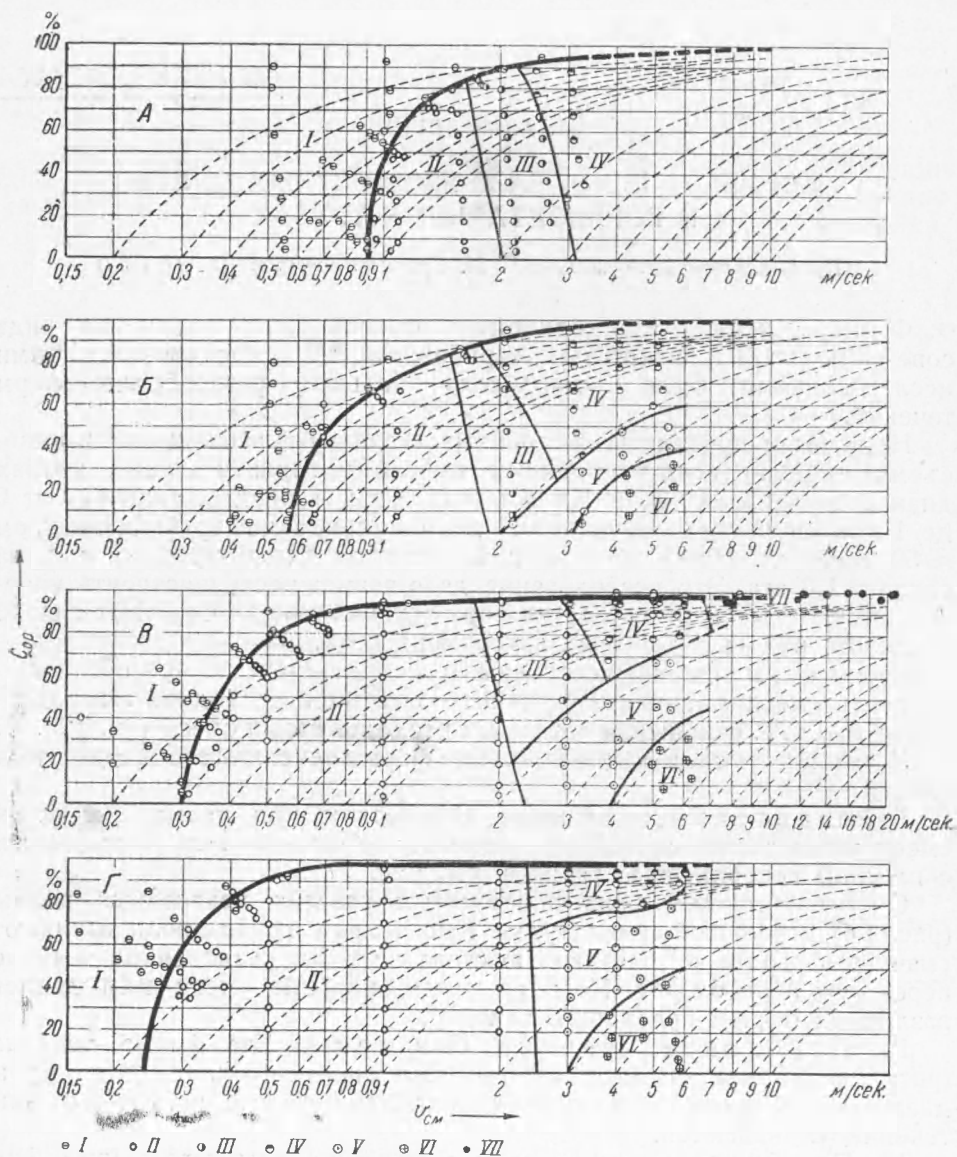


Рис. 1. Распределение областей форм течений газожидкостных смесей в горизонтальных трубах: А — труба, $d = 99,8$ мм; Б — $d = 74,7$ мм; В — $d = 47,4$ мм; Г — $d = 25,8$ мм

В ранее опубликованных картах форм течений газожидкостных смесей в работе С. И. Костерина⁽²⁾ области форм течений воздуожидкостных смесей и границы между ними были намечены ориентировочно. Карты форм течений воздуожидкостных смесей, представленные на рис. 1, дают полностью определенные границы перехода пробкового течения в разделенное в зависимости от диаметра трубы

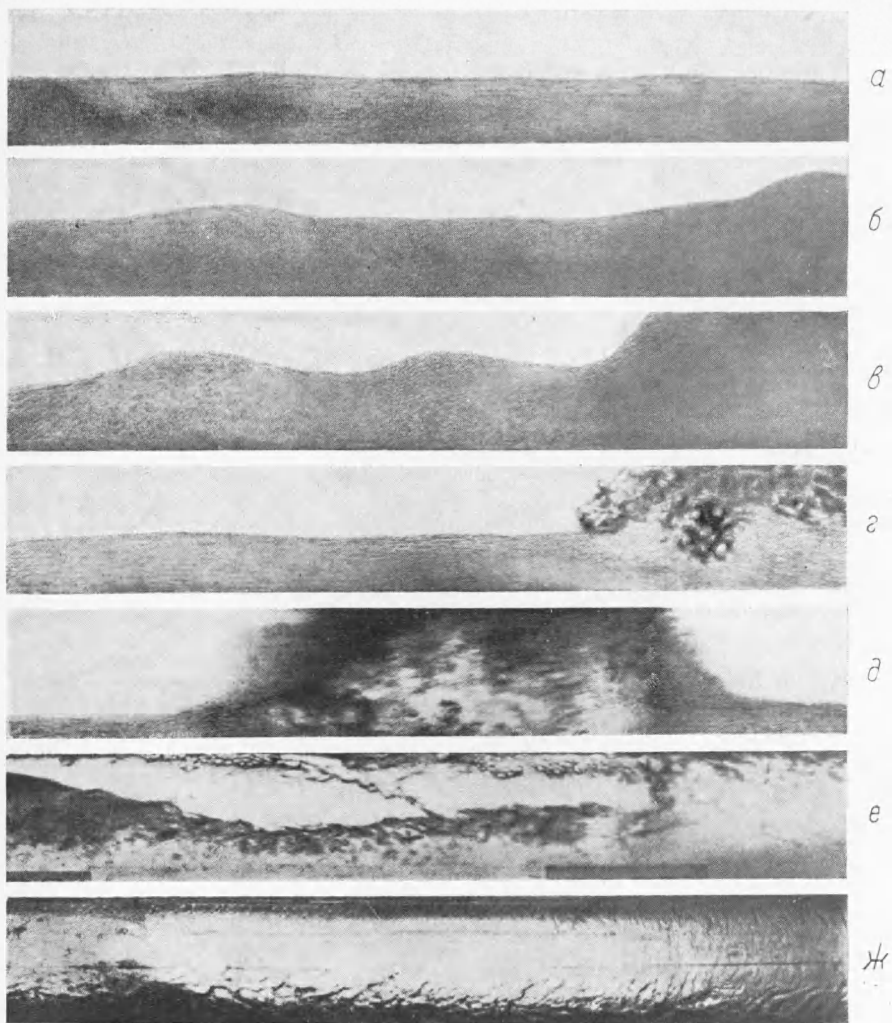
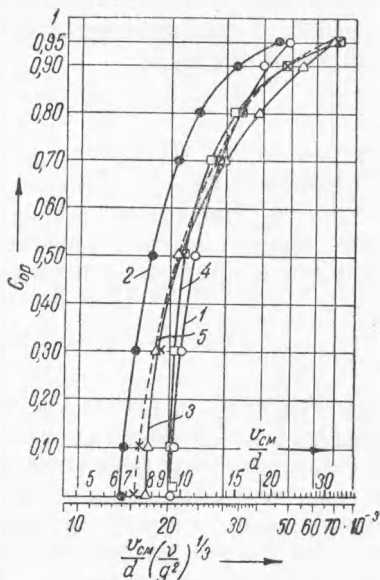


Рис. 2

БИИЖТ
МПС СССР
БИБЛИОТЕКА

для разных значений C_{op} и v_{cm} . Они охватывают значительно более широкую область по газосодержанию и скоростям смеси и создают основу для дальнейшего обобщения опытных данных.

Рис. 3. Зависимость $v_{cm}^{кр}/d$ от газосодержания C_{op} для горизонтальных труб. 1-4 — по опытным данным: 1 — труба, $d = 25,8$ мм, 2 — $d = 47,4$ мм, 3 — $d = 74,7$ мм, 4 — $d = 99,8$ мм, 5 — по эмпирической формуле $v_{cm}^{кр} = 7d(1 - C_{op})^{-0,5}$ м/сек.



Знание форм течений паро- и газо-жидкостных смесей имеет большое практическое значение для работы ряда технологических аппаратов, особенно при предупреждении опасного для парогенерирующих

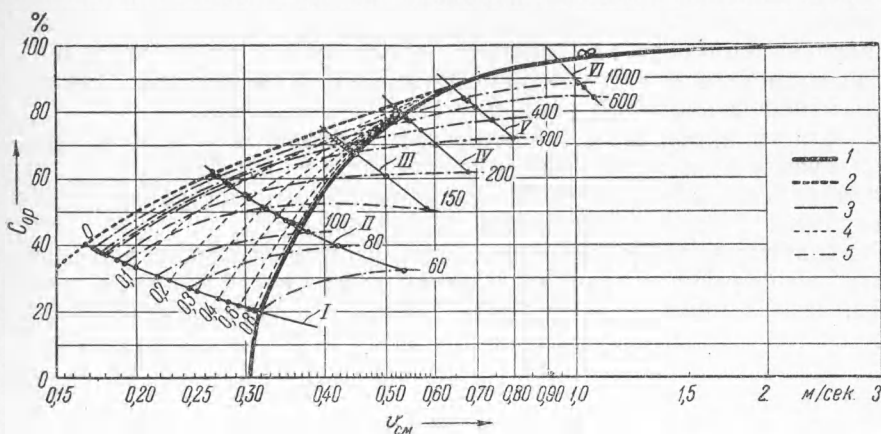


Рис. 4. Режимная карта волнового движения при разделенном течении газо-жидкостной смеси в горизонтальной трубе $d = 47,4$ мм. Кривые постоянных амплитуд и постоянных длин волн. 1 — граница перехода из пробкового в разделенное течение, 2 — кривая спокойного (штилевого) разделенного течения, 3 — кривые пересечений границы (I, II, III, IV, V, VI); 4 — кривые постоянных амплитуд, волн $\lambda \approx A/dC_{op}$; 5 — кривые постоянных длин волн $\lambda \approx \lambda/d = CT/d = H_0$, для пробкового течения $\lambda = WT/d$

труб разделенного течения. Поэтому особый интерес представляет граница между разделенным и пробковым течением. Установленные граничными кривыми зависимости критических скоростей от v_{cm} и C_{op} на картах рис. 1 (толстые кривые между областями I и II) характерны тем, что с ростом диаметра трубы эти кривые смещаются в сторону больших скоростей. Эта закономерность вполне объясняется тем, что

при увеличении диаметра трубы касание верхней образующей ее гребнями волн будет происходить при больших абсолютных амплитудах волн, для поддержания которых требуются большие скорости.

На рис. 3 представлена обобщенная зависимость $v_{см}^{кр}/d = f(C_{ор})$ для четырех диаметров труб и нанесена кривая (5), построенная по эмпирической формуле

$$v_{см}^{кр} = 7d(1 - C_{ор})^{-0.5} \text{ м/сек}, \quad (1)$$

где d — диаметр трубы.

Кривые $v_{см}^{кр}/d = f(C_{ор})$ на рис. 3 показывают, что критические скорости приблизительно пропорциональны диаметру трубы. Это позволяет представить критические скорости перехода из разделенного течения в пробковое в виде эмпирической формулы

$$Fr_{см}^{кр} = \frac{a}{1 - C_{ор}} Ga^{1/2}, \quad (2)$$

где $Fr_{см}^{кр} = v_{кр, см}^2 / gd$ и $Ga = gd^3 / \nu^2$. Безразмерная константа a должна зависеть от отношений $\mu = \mu_r / \mu_{ж}$ и $\gamma = \gamma_{ж} / \gamma_r$, где μ_r и $\mu_{ж}$ — динамические вязкости газа и жидкости, $\gamma_{ж}$ и γ_r — удельные веса жидкости и газа, ν — кинематическая вязкость жидкости. По данным наших экспериментов с газо-жидкостными смесями при $t = 18-20^\circ$ и давлении 1—1,3 ата коэффициент $a \approx 2,42 \cdot 10^{-4} - 2,33 \cdot 10^{-4}$.

В области разделенного течения нами были исследованы параметры волнового движения в части этой области, прилегающей к границе перехода в пробковое течение.

На рис. 4 представлена режимная карта с линиями постоянных амплитуд и длин волн для трубы диаметром ≈ 50 мм. Она дает наглядное представление процесса перехода из разделенного в пробковое течение вследствие развития волнового движения на границе раздела газового и жидкостного потоков. Аналогичные карты построены по опытным данным для труб диаметром $\approx 25, 75$ и 100 мм; также построены карты периодов волн для труб 4 диаметров.

В области пробкового течения нами исследованы частоты прохождения пузырей, а также размеры последних и водяные перемиčky в зависимости от $C_{ор}$, $v_{см}$ и диаметра трубы; построены графики, номограммы и составлены эмпирические формулы.

Результаты исследования уже дают частичное обобщение опытных данных по формам течений газо-жидкостных смесей (влияние диаметра трубы, газосодержания и скорости смеси), и конкретизируют дальнейшую работу в этом направлении по паро- и газо-жидкостным смесям как в отношении обобщения опытных данных, так и методики исследования.

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

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

Поступило
19 V 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. С. Шугаев, С. И. Сорокин, ЖТФ, 9, 20 (1939). ² С. И. Костерин, Изв. АН СССР, ОТН, 7, 37 (1943); 12, 1824 (1949). ³ С. Г. Телетов, ДАН, 50 (1945); 51, № 3 (1946). ⁴ В. Ф. Ладицкий, Сов. котлотурбостроение, 1 (1945); ЦКТИ, Циркуляция в паровых котлах, 10 (1948). ⁵ К. Ф. Роддатис, Электрические станции, 3 (1947); Изв. ВТИ, 4 (1947). ⁶ М. А. Стырикович, З. Л. Миропольский, Изв. АН СССР, ОТН, 10 (1951). ⁷ Л. Ю. Красякова, ЖТФ, 22, 4 (1952). ⁸ L. M. Boelter, R. H. Kern, Ind. Eng. Chem., 31, 4 (1939). ⁹ R. C. Martinelli, L. M. Boelter et al., Trans. ASME, 66, № 2, 139 (1944).