

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СНАРЯДНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ БАРБОТАЖНОМ РЕЖИМЕ В ТРУБАХ НЕБОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

АННОТАЦИЯ

Приводятся экспериментальные данные по снарядному течению в вертикальной трубе (с внутренним диаметром 21 мм) при барботажном режиме.

Предложена модель структуры и скоростей фаз, связывающая все статистические параметры развитого снарядного потока при барботажном режиме. Скорости ниспадающей плёнки вокруг снаряда и жидкости в жидкой пробке предсказаны с помощью предлагаемой модели.

1. ВВЕДЕНИЕ

Барботажный режим – это подъём газовой фазы в жидкости, когда расходная скорость направленного движения жидкости равна нулю или исчезающее мала. Барботажный режим может встречаться в парогенераторах АЭС, кипящих реакторах, испарителях, при внештатных и аварийных режимах в трубопроводах энергооборудования, а также во многих других аппаратах. По сравнению с вынужденным газожидкостным течением барботажный режим при равных приведенных скоростях газа (или скоростях смеси) характеризуется наибольшим истинным газосодержанием и является предельной границей возможных вынужденных режимов. Кроме того, барботажный режим характеризуется наиболее ранним переходом от пузырьковой к снарядной структуре течения [1].

Снарядный режим характеризуется движением в жидкости крупных газовых пузырей (называемых пузырями Тейлора), поперечные размеры которых соизмеримы с поперечным сечением канала, а длина может достигать нескольких диаметров трубы. От стенки снаряды отделены слоем текущей жидкости, а друг от друга – жидкостными пузырьковыми пробками. Ввиду большой распространенности в оборудовании многих отраслей промышленности снарядный режим интенсивно изучается в последние десятилетия многими исследователями.

Под развитым режимом подразумевается режим с относительно длинными пузырьковыми пробками, так что перед каждым из снарядов гидродинамические условия одинаковы. Отсутствуют воздействие снарядов друг на друга и их слияние. Следовательно, скорость газа снарядов должна быть одинаковой. Экспериментальный материал по статистически осредненным параметрам структуры развитого снарядного течения, явная зависимость этих параметров от режимного фактора (приведенная скорость газа) позволяют подойти к созданию расчетной модели движения, связать общей системой уравнений все структурные и кинематические параметры снарядного потока.

Отдельные параметры снарядных течений, такие как длины пробок и снарядов, частоты их следования, и т.п., приводятся в работах [2–7].

2. СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА И УРАВНЕНИЯ СНАРЯДНОГО ТЕЧЕНИЯ

Условимся индексами «1» и «2» обозначать жидкость и газ; а индексами «пр» и «сн» – две временных стадии принадлежности к пузырьковой пробке или кольцевой структуре в сечении канала со снарядом соответственно.

Развитый снарядный поток в трубе представлен в виде регуляризированной структуры со статистическими осредненными параметрами $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$, $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$, $\langle \overline{\varphi} \rangle$, ψ , $\overline{L_{сн}}$, $\overline{L_{пр}}$, $\overline{L} = \overline{L_{сн}} + \overline{L_{пр}}$ и частотой следования снарядов f . Здесь, $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$ – среднее по времени и сечению канала газосодержание пузырьковых пробок; $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$ – среднее по времени и по сечению канала газосодержание в снарядах; $\langle \overline{\varphi} \rangle$ – среднее газосодержание по сечению канала и времени; ψ – средняя доля времени следования снарядов за контрольное время; $\overline{L_{сн}}$ и $\overline{L_{пр}}$ – средние длины снарядов, и пробок. Существенно, что параметры $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$ и $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$ являются не простыми средними, а средними с учётом временного веса (средневзвешенными) [11].

Величины $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$, $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$ и $\langle \overline{\varphi} \rangle$ связаны между собой структурным соотношением

$$\langle \overline{\varphi} \rangle = \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle \cdot (1 - \psi) + \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle \cdot \psi. \quad (1)$$

Пусть U_{02} – приведенная скорость газа (задаётся режимом барботажа), U_2 – средняя скорость газа в снарядах и в пробках, $U_{1сн}$ – средняя скорость ниспадающей жидкой плёнки вокруг снаряда, $U_{1пр}$ – средняя скорость жидкости в жидкой пробке. Уравнения несжимаемости для каждой из двух стадий снарядной структуры имеют вид:

$$U_{02} = (1 - \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle) U_{1пр} + \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle U_2; \quad (2)$$

$$U_{02} = (1 - \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle) U_{1сн} + \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle U_2; \quad (3)$$

уравнение несжимаемости нужно дополнить расходным по газу балансным соотношением

$$(1 - \psi) U_2 \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle + \psi U_2 \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle = U_{02}. \quad (4)$$

Для скорости подъёма газа U_2 можно использовать хорошо известное в литературе соотношение

$$U_2 = 1.2U_{02} + 0.351\sqrt{gd\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}}. \quad (5)$$

Это соотношение не единожды подтверждалось и опытно и теоретически.

Очевидно, что полученная система из пяти уравнений является незамкнутой.

Поскольку главный вклад в истинное газосодержание дают снаряды [8], то в случаях простых расчётов и оценок достаточно часто полагают $\overline{\varphi_{пр}} = 0$. Однако этот прием достаточно груб.

Другие исследователи принимают $\overline{\varphi_{пр}} = \text{const}$, так, в работе [9] предполагалась $\overline{\varphi_{пр}} = 0,25$. Реальное газосодержание в пробках зависит от U_{02} . В [8] на основе экспериментальных данных лучше воспользоваться предложенной формулой для газосодержания в жидкой пробке:

$$\overline{\varphi_{пр}} = \frac{0.14\sqrt[3]{U_{02}}}{1 + 2U_{02}}. \quad (6)$$

Исследователи снарядного потока отмечают, что в качестве показателя развитости потока следует считать уравнение $\overline{L_{пр}}/d = \text{const}$ ($\text{const} = 8 \div 16$) [9–11]. Авторы работ [7, 12] предположили, что развитая длина жидкой пробки равна расстоянию, на котором входящая в жидкость струя поглощается жидкостью. В наших экспериментах $\overline{L_{пр}}/d$ наблюдались в пределах $8,5 \div 12$ и можно принять в среднем

$$\frac{\overline{L_{пр}}}{d} = 10,5, \quad (7)$$

поскольку

$$\psi = \overline{L_{сн}} / (\overline{L_{сн}} + \overline{L_{пр}}), \quad (8)$$

то соответственно средняя длина снарядов

$$\frac{\overline{L_{сн}}}{d} = \frac{\overline{L_{пр}}}{d} \frac{\psi}{1 - \psi}, \quad (9)$$

а частота следования снарядов

$$f = \frac{U_2}{\overline{L_{сн}} + \overline{L_{пр}}}. \quad (10)$$

Для замыкания системы уравнений не хватает ещё одного уравнения. Ниже предлагаются два варианта выхода из затруднения. По первому варианту на основе оценки толщины плёнки вокруг снаряда по ряду теоретических и экспериментальных исследований можно предложить расчётную формулу для $\overline{\varphi_{сн}}$, по другому – воспользоваться опытной формулой для ψ , полученной авторами

[8], а $\overline{\varphi_{сн}}$ при этом будет получаться при решении системы уравнений. Ниже рассмотрены эти два варианта.

2.1. Расчетное соотношение для газосодержания в снарядах (первый вариант)

В работе [13] на основе анализа формы снарядов пара предложена следующая формула для $\overline{\varphi_{сн}}$;

$$\overline{\varphi_{сн}} = \frac{1}{L_{сн}} \int_0^{L_{сн}} \frac{U_{02} + U_{п} - (U_{02} + U_{п})e^{-10x}}{U_n + U_{2сн} - (U_{02} + U_n)e^{-10x}} dx, \quad (11)$$

где $U_{п}$ – средняя скорость в плёнке жидкости вокруг снаряда газа, м/с.

Связь скорости $U_{п}$ и $\overline{\varphi_{сн}}$ получена на основе данных Уоллеса [14] и Ферниардеса [9]

$$U_{п} = 9,916 \left[gd \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1} (1 - \sqrt{\overline{\varphi_{сн}}}) \right]^{0,5}. \quad (12)$$

2.2. Расчетное соотношение для временного веса снарядной (кольцевой) структуры (второй вариант)

В [8] на основе экспериментальных данных была предложена формула для доли времени следования снарядов:

$$\psi = \frac{1 + 0,03U_{02}}{1,05 + 0,14/U_{02}}, \quad (13)$$

в этом случае вместо уравнения для $\overline{\varphi_{сн}}$ используется уравнение для ψ .

3. СИСТЕМА РАСЧЕТНЫХ УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИ СНАРЯДНОГО ТЕЧЕНИЯ

Для развитого восходящего снарядного течения в вертикальной трубе со снарядами без капель жидкости и пленки без пузырьков газа при условии несжимаемости фаз система уравнений состоит из 10 уравнений (1)–(7), (9)–(11). Эти уравнения включают 10 временных, пространственных и кинематических параметров снарядного потока: $\overline{\varphi}$, ψ , $\overline{\varphi_{сн}}$, $\overline{\varphi_{пр}}$, $\overline{L_{сн}}$, $\overline{L_{пр}}$, f , U_2 , $U_{1сн}$, $U_{1пр}$. При барботажном режиме скорость газа (U_{02}) является режимной характеристикой (т.е. известна), а остальные параметры могут быть найдены при решении уравнений (1)–(7), (9)–(11). Предполагаемая схема решения уравнений в случае первого варианта с помощью итерации представлена на рис. 1, а в случае второго варианта прямо из системы уравнений.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных представлено на рис. 2–8.

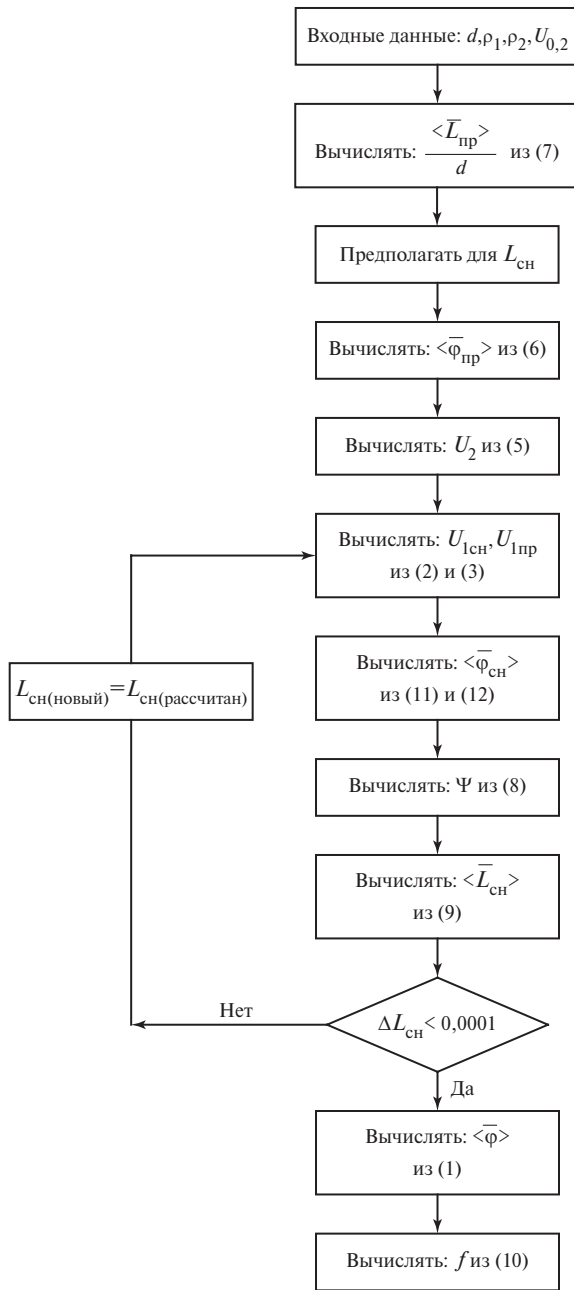


Рис. 1. Расчётная схема модели

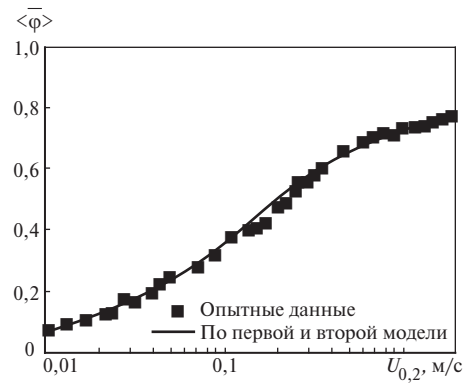


Рис. 3. Среднее газосодержание

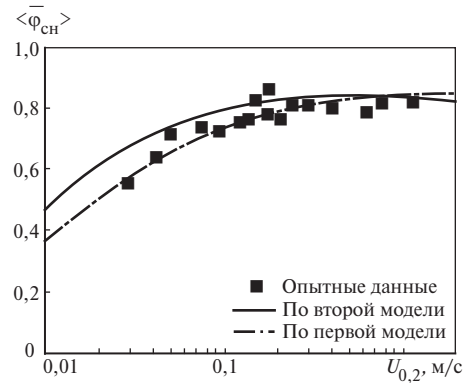


Рис. 4. Среднее газосодержание в снарядах

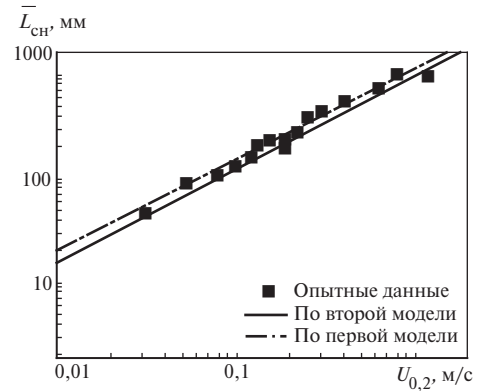


Рис. 5. Средняя длина снарядов

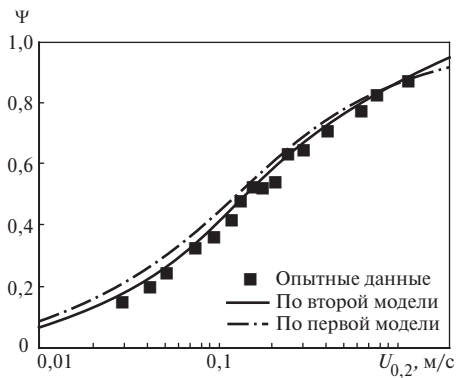


Рис. 2. Доля времени следования снарядов

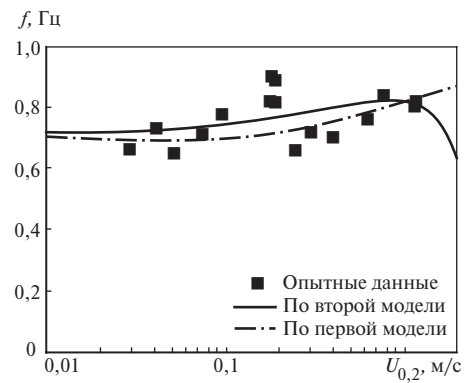


Рис. 6. Частота следования снарядов

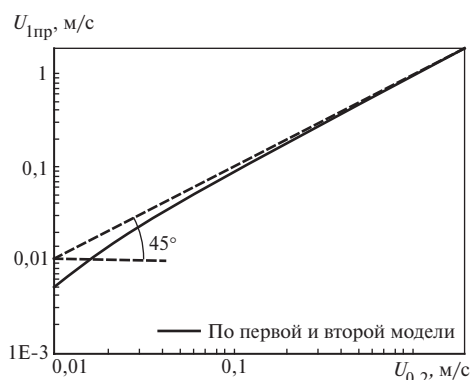


Рис. 7. Средняя скорость жидкости в жидкой пробке

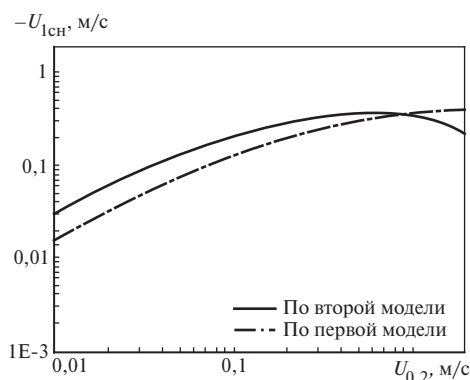


Рис. 8. Средняя скорость ниспадающей жидкой плёнки вокруг прибора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше было установлено, что параметры структуры снарядного барботажного режима в трубе небольшого диаметра имеют статическую природу и просматриваются чёткие зависимости их изменения от режима барботажного (U_{02}). На основании этого разработана двухстадийная параметрическая модель, позволяющая однозначно связать все параметры снарядного потока единой системой уравнений. Скорости ниспадающей плёнки вокруг прибора и средняя скорость жидкости в пузырьковой пробке предсказываются также при решении этой системы уравнений. В литературе нет экспериментальных данных по этим параметрам.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d — диаметр трубы, м;
 g — гравитационное ускорение, м/с^2 ;
 L — длина, м;
 f — частота, Гц;
 ψ — доля времени следования снарядов;

ρ — плотность, кг/м^3 ;

ϕ — газосодержание.

Индексы:

1 — жидкая фаза;

2 — газовая фаза;

сн — снаряд;

пр — пробка;

п — плёнка.

Усредняющие операторы:

$\langle \rangle$ — оператор осреднения по пространству;

$\bar{}$ — оператор осреднения по времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Омар Х., Похвалов Ю.Е.** Гидродинамика и структура двухфазного потока при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра // Теплоэнергетика (в печати).
2. **Bendiksen K.H.** An Experimental Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes // International Journal of Multiphase Flow. 1984. 4. P. 467–483.
3. **Taitel Y. and Barnea D.** Two-Phase Slug Flow // Advances in Heat Transfer. 1990. 20. P. 83–132.
4. **Petalas N. and Aziz K.** A Mechanistic Model for Multiphase Flow in Pipes // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2000. 39. 6. P. 43–55.
5. **Abdul-Majeed G.H.** Liquid Slug Holdup in Horizontal and Slightly Inclined Two-Phase Slug Flow // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2000. 27. 1. P. 27–32.
6. **Gomez L.E. et al.** Prediction of Slug Liquid Holdup, Horizontal to Upward Vertical Flow // International Journal of Multiphase Flow. 2000. 26. P. 517–521.
7. **Braunea N. and Barnea D.** Slug/Churn Transition in Upward Gas-Liquid Flow // Chemical engineering science. 1985. 41. P. 1–12.
8. **Омар Х., Похвалов Ю.Е.** Параметры снарядного течения при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра // Теплоэнергетика (в печати).
9. **Fernandes R.C. et al.** Hydrodynamic Model for Gas-Liquid Slug Flow in Vertical Tubes // AIChE Journal, 1983. 29. 6. P. 981–989.
10. **Mi Y., Ishii M., Tsoukalas L.H.** Investigation of vertical slug flow with advanced two-phase flow instrumentation // Nuclear Engineering and Design. 2001. 204. P. 69–85.
11. **Обручкова Л.Р., Похвалов Ю.Е.** Параметрическое описание и статистические параметры двухфазного снарядного потока // Теплоэнергетика. 1997. 6. С. 69–75.
12. **Taitel Y. et al.** Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes // AIChE Journal. 1980. 26. 3. P. 345–354.
13. **Xiaodong Zhao M.S.** Mechanistic based model for slug flow in vertical pipes. PhD Dissertation, university of Texas. 2005.
14. **Wallis, G. B., One-Dimensional Two-Phase Flow** // McGraw-Hill. New York. 1969.