

УДК 628.1

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ НА РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ

Дихтярь¹ Т.В., Зайцев² О.Н., Ангелюк³ И.П., Дихтярь⁴ М.С.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,

^{1,3,4}Институт «Академия строительства и архитектуры»,

295943, г. Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: ta_titova@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

305040, Курская область, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, e-mail: zon071941@mail.ru

Аннотация. При заданной (обычно низкой) скорости смеси и вполне определенном газосодержании наступает спокойное разделенное течение, характеризующееся практическим отсутствием пульсаций. С ростом $F_{T_{cm}}$ (возрастание скорости или уменьшение диаметра) частота и амплитуда пульсаций возрастают. Зависимости частоты и амплитуды пульсаций существенно отличаются при различных формах течения. Помимо многообразия структур, отличительной особенностью течения газо-жидкостной смеси в трубе являются высокие пульсации давления, вызванные наличием фаз с различными физическими свойствами, существованием относительной скорости движения компонентов, большой сжимаемостью газо-жидкостной смеси и другими причинами. На поверхностях раздела фаз возникают особые силовые, а при неизотермическом течении и тепловые взаимодействия. Эти взаимодействия самым существенным образом сказываются на изменениях полей скоростей течения, давлений, температур, концентраций при переходе от одной точки пространства к другой, отделенной от первой поверхностью раздела фаз. Во многих случаях на границах раздела фаз возникают скачки давления, температуры и вектора скорости течения. Специфической особенностью рассматриваемой среды является также и тот факт, что даже в случае, когда обе фазы практически можно считать несжимаемыми, газо-жидкостная система ведет себя как сжимаемая жидкость. Формы совместного движения газа и жидкости исключительно многообразны и охватывают все возможные состояния, лежащие между движением двух сплошных параллельных потоков, взаимодействующих только по одной непрерывной поверхности раздела, и движением потока пены, в которой обе фазы образуют сложную, тонкую и неустойчивую структуру. Таким образом, формы движения двухфазных потоков значительно многообразнее и законы их существенно сложнее, чем формы движения и законы гидродинамики однородных сред. Поэтому методы обобщенного анализа опытных данных имеют в этой области еще большее значение, чем в гидравлике однородных потоков.

Предмет исследования: процессы массообмена в тепловых потоках.

Материалы и методы: математические методы физического и численного моделирования.

Результаты: в результате исследований получены зависимости, позволяющие выявить границу перехода режимов от кольцевого к пробковому.

Выводы: основное влияние на процессы перехода от кольцевого режима к пробковому оказывают температура и избыточное давление между паровой и жидкостной фазой в локальной точке системы.

Ключевые слова: поверхность раздела, фазовые превращения, скорость, плотность, давление, температура.

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении движения небольшого одиночного пузыря или потоков с непрерывной фиксированной границей раздела формулировка основной системы уравнений процесса может быть произведена со всей необходимой строгостью. В случае же сложных течений, когда компоненты потока расчленены на отдельные элементы, имеется ряд областей, замкнутых границами раздела, где возникают трудности, связанные с необходимостью рассматривать вероятностные ситуации с элементами, переменными в пространстве и во времени. Последовательные аналитические методы для таких систем в настоящее время отсутствуют. Решающее значение тут имеет эксперимент и метод подобия. Однако и в этом случае необходимо иметь общий метод вывода и анализа безразмерных параметров процесса. В целом, все взаимодействия, имеющие место в двухфазном потоке любой сложности, для каждой его отдельной области описываются теми уравнениями, что и для систем с

одной поверхностью раздела. Вследствие этого критерии подобия могут выводиться из этих уравнений для всей системы в целом с учетом уравнений и параметров, определяющих размеры возникающих дискретных элементов и вероятность их распределения[1].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Для уравнений движения, написанных попарно для каждой из фазовых областей рассматриваемой газо-жидкостной системы, необходимо задать условия, связывающие поля давлений и скоростей по поверхностям раздела фаз[2].

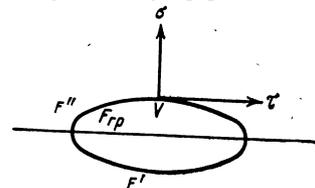


Рис. 1. Условия взаимодействия фаз на границе раздела
Fig. 1. Conditions of phase interaction at the interface

Выделим контрольной поверхностью F замкнутую область объемом V , заключающую в себе часть поверхности раздела фаз[1].

К поверхности $F = F_{\text{ж}}(F') + F_{\text{г}}(F'')$ приложены нормальные напряжения σ и касательные напряжения τ . Условие динамического равновесия рассматриваемой области имеет вид[3]:

$$\int_V \vec{\gamma} dV + \int_F \vec{\sigma} dF + \int_F \vec{\tau} dF = M \frac{d\vec{w}_0}{dt}, \quad (1)$$

здесь $\vec{\gamma}$ - некоторая объемная сила; где M - масса, заключенная в объеме V ; $\frac{d\vec{w}_0}{dt}$ - ускорение центра массы этого объема.

С другой стороны[1],

$$\left. \begin{aligned} \int_F \vec{\sigma} dF + \int_{F_{\text{ж}}} \vec{\sigma}_{\text{ж}} dF + \int_{F_{\text{г}}} \vec{\sigma}_{\text{г}} dF \\ \int_F \vec{\tau} dF + \int_{F_{\text{ж}}} \vec{\tau}_{\text{ж}} dF + \int_{F_{\text{г}}} \vec{\tau}_{\text{г}} dF \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Стягивая поверхность F к заключенной в объеме V поверхности раздела фаз $F_{\text{гр}}$, имеем[126]:

$$F \rightarrow F_{\text{гр}}; V \rightarrow 0; \int_F \vec{\sigma} dF_{\text{гр}} + \int_F \vec{\tau} dF_{\text{гр}} \rightarrow 0. \quad (3)$$

Таким образом, поскольку $\vec{\sigma} \perp \vec{\tau}$, имеет место динамическое равновесие и условие на границе раздела фаз распадается на два соотношения[1]

$$\vec{\sigma}_{\text{ж гр}} + \vec{\sigma}_{\text{г гр}} = 0; \vec{\tau}_{\text{ж гр}} + \vec{\tau}_{\text{г гр}} = 0. \quad (4)$$

Если прямоугольную систему координат расположить так, чтобы плоскость xz была касательной к поверхности раздела фаз в данной точке, а ось y нормальна к этой поверхности, то согласно уравнениям гидродинамики[4]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y = -p - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \vec{w} + 2\mu \frac{\partial w_y}{\partial y}; \\ \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right); \\ \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из условия отсутствия скольжения фаз на границе раздела следует, что[5]

$$w_{\text{ж } xz \text{ гр}} = w_{\text{г } xz \text{ гр}}. \quad (6)$$

Нормальные к плоскости xz составляющие вектора скорости на границе раздела фаз определяются массовой скоростью фазового превращения $g_{\text{гр}}$ [6]:

$$w_{\text{ж } y \text{ гр}} = \pm \frac{g_{\text{гр}}}{\rho_{\text{ж}}}; w_{\text{г } y \text{ гр}} = \pm \frac{g_{\text{гр}}}{\rho_{\text{г}}}. \quad (7)$$

При отсутствии фазовых превращений $g_{\text{гр}} = 0$ и на поверхности раздела совпадают не только

тангенциальные составляющие векторов скоростей течения фаз, но и сами векторы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При фазовых превращениях неравенство плотностей фаз вызывает изменение векторов скоростей течения на границе раздела. При этом меняется также количество движения потока вещества $g_{\text{гр}}$ при пересечении границы раздела фаз. Вследствие этого возникает сила, нормальная к поверхности раздела и равная[7]

$$P_* = g_{\text{гр}} (w_{\text{г } y \text{ гр}} - w_{\text{ж } y \text{ гр}}) = \frac{g_{\text{гр}}^2}{\rho_{\text{г}}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right). \quad (8)$$

$$g_{\text{гр}} = \frac{q_a}{r}; P_* = \frac{q_a^2}{\rho_{\text{г}} r^2} \left(1 - \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right). \quad (9)$$

где q_a - плотность теплового потока, идущего на испарение на поверхности раздела фаз; r - скрытая теплота фазового превращения.

Тепловой баланс рассмотренного выше объема V , включающего в себя поверхность раздела фаз, имеет вид[8]:

$$\int_V \rho \frac{\partial i}{\partial t} dV = - \int_F q_n dF - \int_F i g_n dF, \quad (10)$$

где q_n, g_n - проекции соответствующих векторов на внешнюю нормаль к F .

Стягивая объем V к поверхности $F_{\text{гр}}$ и принимая во внимание, что $i_{\text{г}} - i_{\text{ж}} = r$, получим условие сохранения потока тепла при переходе через границу раздела фаз[9]

$$-\lambda_{\text{ж}} \left(\frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial y} \right)_{\text{гр}} = r g_{\text{гр}} - \lambda_{\text{г}} \left(\frac{\partial T_{\text{г}}}{\partial y} \right)_{\text{гр}}, \quad (11)$$

где $g_{\text{гр}} > 0$ при испарении.

Из условия непрерывности поля температур имеем[10]:

$$T_{\text{г гр}} = T_{\text{ж гр}}, \quad (12)$$

где $T_{\text{г гр}}$ - в случае фазового превращения представляет собой температуру насыщения, соответствующую термодинамическим условиям в данной точке границы раздела фаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Уравнения, описывающие тот или иной класс физических процессов, могут быть всегда представлены в безразмерной форме. Эта операция может быть совершена путем деления уравнения на один из его членов или путем введения масштабных

величин. В первом случае число возможных безразмерных комплексов не превышает числа членов уравнения без единицы[11].

Во втором случае в качестве масштабов можно выбрать характерные значения величин, входящих в уравнение, или комбинацию величин, имеющих необходимую размерность. Например, безразмерная скорость[12]

$$\omega = \frac{w}{w_0}, \quad (13)$$

где w - значение скорости в данной точке в данный момент времени; w_0 - средняя расходная

скорость в заданном сечении или скорость вне пограничного слоя в заданный момент времени.

На гидродинамический режим жидкостного процесса в системе водяного отопления влияет ряд физических величин.

На рисунке 2 представлен анализ данных в безразмерных тепловых параметрах. В качестве масштаба выбрана величина температуры теплоносителя.

На рисунке 3 представлен анализ данных в безразмерных динамических параметрах. В качестве масштаба выбрана величина давления теплоносителя в системе отопления.

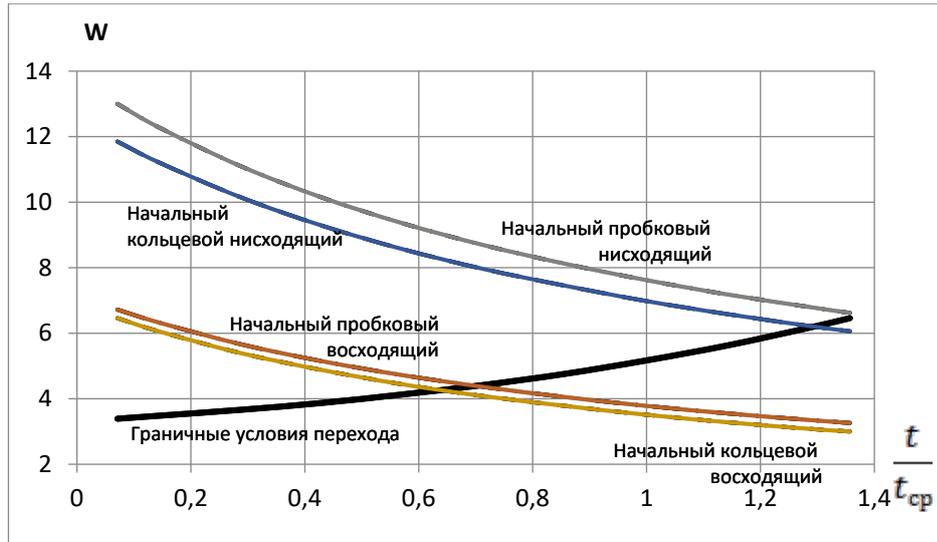


Рис. 2. Анализ теоретических данных в безразмерных тепловых параметрах
Fig. 2. Analysis of theoretical data in dimensionless thermal parameters

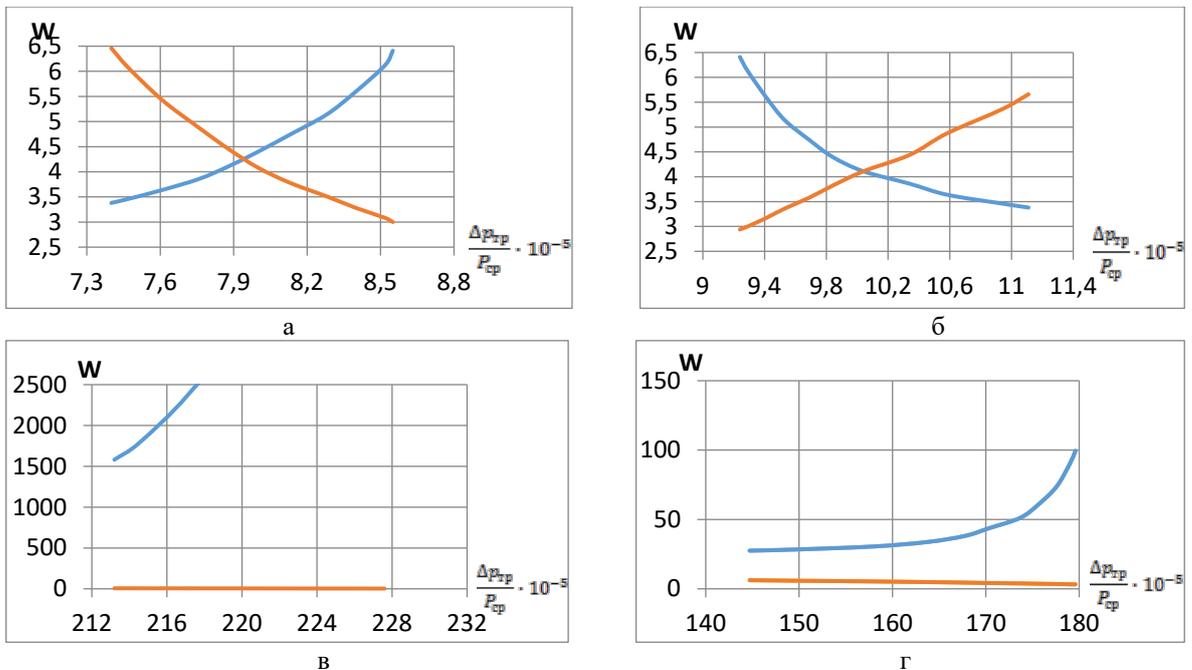


Рис. 3. Анализ теоретических данных в безразмерных динамических параметрах
а) кольцевой горизонтальный и восходящий; б) пробковый горизонтальный и восходящий; в) кольцевой нисходящий; г) пробковый нисходящий
Fig. 3. Analysis of theoretical data in dimensionless dynamic parameters
a) annular horizontal and ascending; b) corked horizontal and ascending; c) annular descending; d) corked descending

Одноименные параметры имеют одно и то же численное значение. Каждый из неопределяющих критериев является функцией совокупности определяющих критериев. Таким образом, метод подобия позволяет в отчетливой и компактной форме анализировать большое число факторов, определяющих рассматриваемое течение.

ВЫВОДЫ

Графический анализ зависимости выявил границу перехода режимов от кольцевого к пробковому при влиянии силы тяжести и давления с учетом изменения гидравлического сопротивления газожидкостной смеси. При кольцевом режиме движения жидкости граница перехода находится в пределах давления 12 - 16 Па/м, а при пробковом режиме происходит резкое увеличение давления с учетом изменения гидравлического сопротивления и перехода из одного режима движения жидкости в другой не происходит. Основное влияние на процессы перехода от кольцевого к пробковому оказывают температура и избыточное давление между паровой и жидкостной фазой в локальной точке системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. М.: Наука, 1976. 500 с.
2. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 472с.
3. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
4. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
5. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 296 с.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 360 с.
7. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 436 с.
8. Левич В.Г. Физико - химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.
9. Гуревич Г.Р., Брусилловский А.И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. М.: Недра, 1984. 264 с.
10. Миропольский З.Л., Шнеерова Р.И., Карамышева А.И. Паросодержание при напорном движении пароводяной смеси с подводом тепла и в адиабатных условиях // Теплоэнергетика. 1971. № 5. С. 60-63.
11. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика: учебник. М.: Машиностроение, 1981. 374 с.

12. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е. О режимах дробления капель и критериях их существования // ИФЖ. 1981. Т. 40, №1. С. 152-157.

REFERENCES

1. Kafarov V.V. and Dorokhov I.N. System Analysis of Chemical Technology Processes. Moscow: Nauka, 1976. 500 p.
2. Deich M.E., Filippov G.A. Gas Dynamics of Two-Phase Media. Moscow: Energoizdat, 1981. 472 p.
3. Nakoryakov V.E., Pokusayev B.G., Shreyber I.R. Wave Dynamics of Gas and Vapor-Liquid Media. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 248 p.
4. Sou S. Hydrodynamics of multiphase systems. M.: Mir, 1971. 536p.
5. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Hydrodynamics of gas-liquid systems. Ed. 2nd, revised. and added. M.: Energiya, 1976. 296 p.
6. Nigmatulin, R.I. Dynamics of Multiphase Media. Moscow: Nauka, 1987. 360 p.
7. Wallis G. One-dimensional two-phase flows. Moscow: Mir, 1972. 436c.
8. Levich V.G. Physico-chemical hydrodynamics. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 700 p.
9. Gurevich G.R., Brusilovsky A.I. A reference manual for calculating the phase state and properties of gas condensate mixtures. Moscow: Nedra, 1984. 264 p.
10. Miropolsky Z.L., Schneerova R.I., Karamysheva A.I. Steam content during pressure movement of a steam-water mixture with heat supply and under adiabatic conditions // Thermal power engineering. 1971. No. 5. pp. 60-63.
11. Sergel O.S. Applied hydrogazodynamics: textbook. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 374 p.
12. Borisov A.A., Gelfand B.E. On modes of droplet crushing and criteria of their existence // IFZH. 1981. Vol. 40, No. 1. pp. 152-157.

INFLUENCE OF THERMODYNAMIC CRITERIA ON THE MOVEMENT REGIME OF A GAS-LIQUID MIXTURE

Dikhtyar¹ T.V., Zaitsev² O.N., Angelyuk³ I.P., Dikhtyar⁴ M.S.

^{1,3,4}Institute "Academy of Construction and Architecture", V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Kievskaya str., 181, Simferopol, 295943, e-mail: ta_titova@mail.ru

² Southwest State University, 50 let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Kursk Region 94, e-mail: zon071941@mail.ru

Abstract. At a given (usually low) mixture velocity and a specific gas content, a calm separated flow occurs, characterized by a practically non-existent pulsation. As Fr_{cm} increases (either by increasing the velocity or decreasing the diameter), the frequency and amplitude of pulsations increase. The frequency and amplitude of pulsations vary significantly depending on the flow pattern. In addition to the variety of structures, a distinctive feature of the flow of a gas-liquid mixture in a pipe is the high pressure fluctuations caused by the presence of phases with different physical properties, the existence of relative velocity of the components, the high compressibility of the gas-liquid mixture, and other factors. Special forces and thermal interactions occur at the phase interfaces during non-isothermal flow. These interactions have a significant impact on the changes in flow velocity fields, pressures, temperatures, and concentrations as we move from one point in space to another, separated by a phase boundary. In many cases, there are abrupt changes in pressure, temperature, and flow velocity at the phase boundaries. Additionally, even when both phases can be considered incompressible, the gas-liquid system behaves like a compressible fluid. The forms of the combined motion of gas and liquid are extremely diverse and cover all possible states that lie between the motion of two continuous parallel flows that interact only along a single continuous interface, and the motion of a foam flow in which both phases form a complex, thin, and unstable structure. Thus, the forms of motion of two-phase flows are much more diverse and their laws are much more complex than the forms of motion and laws of hydrodynamics of homogeneous media. Therefore, the methods of generalized analysis of experimental data are even more important in this field than in the hydraulics of homogeneous flows.

Subject: mass transfer processes in heat flows.

Materials and methods: mathematical methods of physical and numerical modeling.

Results: as a result of research, dependencies are obtained that allow to reveal the boundary of the transition of modes from annular to cork.

Conclusions: the main influence on the processes of transition from the annular mode to the cork mode is the temperature and excess pressure between the vapor and liquid phase in a local point of the system.

Key words: interface, phase transformations, speed, density, pressure, temperature.