

УДК 532.542.1;622.276

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ И РАЗВИТИЯ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ
МНОГОФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**EVALUATION OF FLOW REGIME MULTIPHASE SYSTEMS
FOR NUMERICAL HYDRODYNAMIC MODELS**

Стрекалов А.В., Глумов Д.Н.

**ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
г. Тюмень, Российская Федерация**

A. V. Strekalov, D. N. Glumov

**FSBEI HE «Tyumen Industrial University»,
Tyumen, the Russian Federation**

e-mail: Glumov@mail.ru

Аннотация. С развитием возможностей вычислительной техники в нефтегазовой отрасли широкое распространение получили задачи по гидравлическому расчету режимов работы нефтегазотранспортных систем. Аналитические решения, основанные на применении эмпирически выведенных корреляций (Оркижевского, Беггс, Брилла, Грея и др.) в большинстве случаев при многофазном течении не обеспечивают точное определение технологических параметров работы системы транспортировки нефти, газа и конденсата. Основная ошибка в применении данных методик накапливается за счет неверного определения режима течения.

Существующие в настоящее время программные комплексы, позволяющие выполнять динамические расчеты (программный комплекс OLGA) требуют привлечения высококвалифицированных специалистов и значительных затрат машинного времени на реализацию одного сценария расчетов.

В связи с вышеобозначенной проблематикой вопроса возникла актуальная задача по усовершенствованию методики учета режима течения для расчета межфазного трения, путем внедрения критериев, определяющих режим течения многофазной системы в непрерывной постановке, и вычисления их взаимосвязи с гидродинамическим действием. Вследствие крайней важности настройки численных моделей на физический эксперимент вводятся специальные функции, которые впоследствии могут быть, как «теоретизированы», так, и табулированы по результатам экспериментов. В данной работе будут описаны теоретические предпосылки по однозначному определению режима течения.

Для определения режима течения выделяются следующие критерии:

- фактор раздробленности компонентов;
- фактор формы элементов компонента;
- фактор степени раздробленности потока компонентов и совершенства форм элементов.

В результате представленной работы показана теоретическая основа и алгоритм по определению режима течения многофазной системы. Применение данной методики возможно для выполнения динамических расчетов, программирования расчетных модулей многофазных расходомеров, построения номограмм, позволяющих учесть режим течения при аналитических расчетах.

Abstract. With the development of computer technology in the oil and gas industry, widespread tasks on hydraulic calculation of the modes of transport systems. Analytical solutions based on the use of correlations (Erkezeskor, Beggs and Brill, Grea etc.) in multiphase did not provide a precise definition of the technological parameters of work of system of transportation of oil, gas and condensate. The fundamental error in the application of these methods accumulates due to the incorrect determination of the flow regime.

Currently existing software packages that allow for dynamic calculations (the software package OLGA) require the involvement of highly qualified spe-

cialists and a considerable amount of computer time to implement one of the scenario calculations.

In connection with the above issues the question has arisen an urgent task for improving the methods of accounting for the flow regime to calculate the interfacial friction by implementing criteria that determine the flow regime of the multiphase system in the continuous formulation, and compute their correlation with hydrodynamic action. Due to the extreme importance of setting the numerical models for experimental studies are special features that can be later as "speculative" and tabulated the results of experiments. In this work, we will describe the theoretical background for an unambiguous definition of the flow regime.

To determine the flow regime are the following criteria:

- factor of disintegration of components;
- form factor component elements;
- factor degree of fragmentation of the flow components and the perfect forms of the elements.

The result presented work shows the theoretical basis and the algorithm for determining the flow regime of the multiphase system. The application of this methodology makes it possible to perform dynamic calculations, programming, design modules, multiphase flow meters, the construction of nomograms that take into account the flow regime in analytic calculations.

Ключевые слова: многофазная система, структура потока, вязкостное трение, движение жидкостей и газов, режим течения жидкости.

Key words: the flow regime, multiphase system, the flow structure, the viscous friction, the movement of liquids and gases.

С развитием возможностей вычислительной техники в нефтегазовой отрасли широкое распространение получили задачи по гидравлическому расчету режимов работы нефтегазотранспортных систем. Аналитические решения, основанные на применении эмпирически выведенных корреляций (Оркижевского, Беггс и Брилла, Грея и др.[1, 2, 8]) в большинстве случаев при многофазном течении не обеспечивают точное определение технологических параметров работы системы транспортировки нефти, газа и конденсата. Основная ошибка в применении данных методик накапливается за счет неверного определения режима течения.

Существующие в настоящее время программные комплексы, позволяющие выполнять динамические расчеты (программный комплекс OLGA) требуют привлечения высококвалифицированных специалистов и значительных затрат машинного времени на реализацию одного сценария расчетов.

В связи с вышеобозначенной проблематикой вопроса возникла актуальная задача по усовершенствованию методики учета режима течения для расчета межфазного трения, путем внедрения критериев, определяющих режим течения многофазной системы в непрерывной постановке, и вычисления их взаимосвязи с гидродинамическим действием. Вследствие крайней важности настройки численных моделей на физический эксперимент вводятся специальные функции, которые впоследствии могут быть, как «теоретизированы», так, и табулированы по результатам экспериментов. Далее авторами будут описаны теоретические предпосылки по однозначному определению режима течения.

Для определения режима течения выделяются следующие критерии:

- фактор раздробленности компонентов (α);
- фактор формы элементов компонента (β);
- фактор степени раздробленности потока компонентов и совершенства форм элементов (ψ).

Первый фактор, влияющий на взаимодействие фаз – это фактор раздробленности компонента i в контрольном объеме V

$$\alpha_i = \frac{V_i^e}{V}, \quad (1)$$

где V_i^e – объем элемента в объеме компонента – i , м^3 .

Этот фактор показывает долю объема элемента в общем объеме.

Элементами потока могут быть капли, глобулы, струи, полосы, кольцевые структуры (рисунок 1).

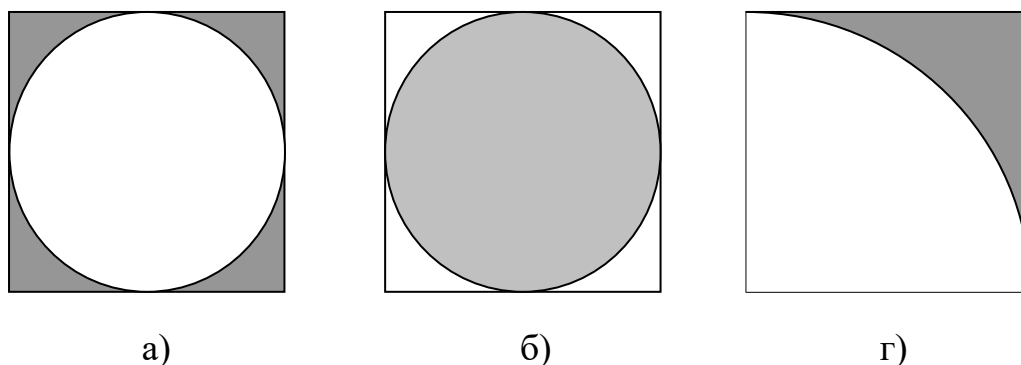


Рисунок 1. Элемент потока в сечении контрольного объема:
 a – сфера; b – область, окутывающая сферу; g – выбор элемента позволяющий учесть инверсию эмульсии

Чем меньше объем (не обязательно размеры) элементов компонента в потоке, тем меньше фактор α_i .

Когда $\alpha_i=1$, тогда объем, например, капли или глобулы полностью покрывает контрольный объем (КО), т.е. форма капли совпадает с формой контрольного объема. При этом насыщенность компонента – σ_i будет равна 1. Примером такого случая может служить кольцевая и расслоенная структура (рисунок 2).

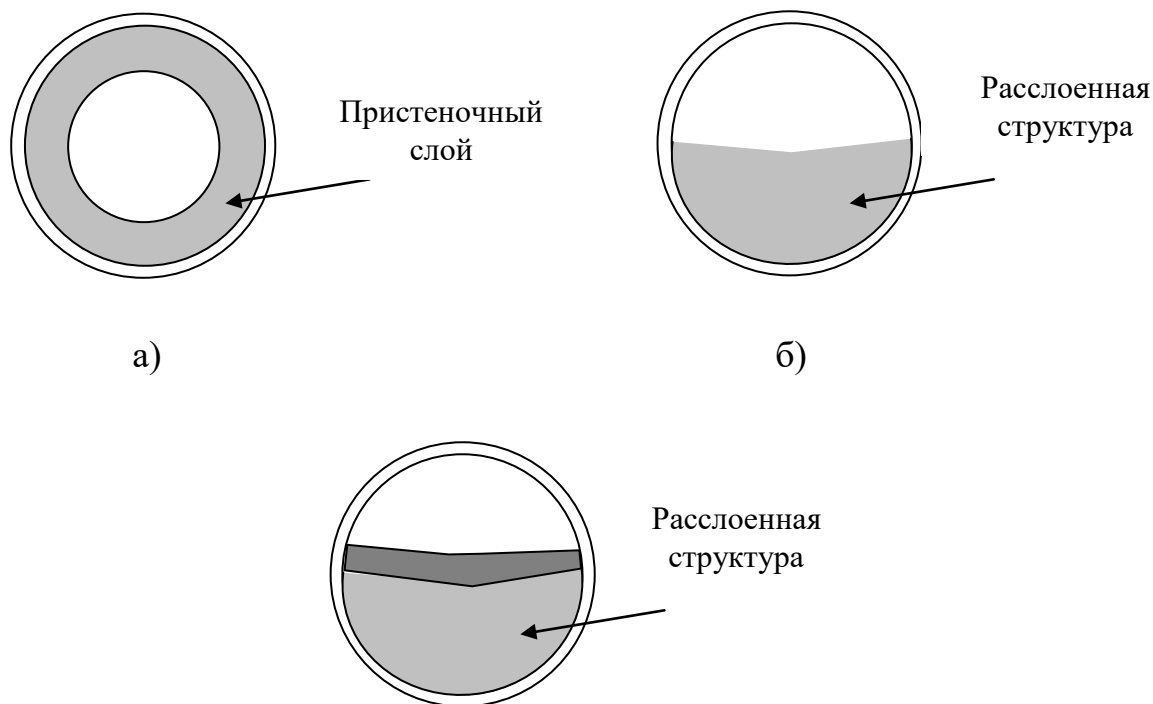


Рисунок 2. Примеры структур с одним элементом:
 $\alpha_i = 1, \sigma_i \in [0,1]$

Как видно из рисунка 2 одноэлементные структуры потока не отличаются по фактору раздробленности, что вполне логично.

Расположение элементов потока относительно других компонентов, безусловно, будет влиять на фактор α .

Для КО кубической формы, ограниченными с какой-либо грани твердым телом, с целью учета положения слоев относительно граней объема потребуется коэффициент связи компонента с гранями.

Количество элементов i -го компонента в контрольном объеме будет

$$V^e = V\alpha_i \Rightarrow n_i = \frac{V\sigma}{V^e} = \frac{V\sigma}{V\alpha_i} = \frac{\sigma}{\alpha_i}. \quad (2)$$

Т.е. когда объем элемента равен всему объему среды, то элемент один. Равно, как если $\alpha = \sigma$, то элемент тоже один.

Введем критерий/фактор, показывающий рациональность формы элементов компонента (пузырьков, струй, лент и т.п.).

Этот фактор отражает форму элемента и показывает отношение боковой площади элемента, т.е. площади поверхности внешнего контакта (границы) к площади контрольного объема

$$\beta_i = \frac{S_i^e}{S}, \text{ д.е.}, \quad (3)$$

где S_i^e – средняя боковая поверхность капли/глобулы i -го компонента, м^2 .

S – боковая поверхность контрольного объема, м^2 .

Почему выбрана площадь поверхности элемента. Дело в том, что если вместо нее брать периметр в поперечном сечении, то для сферических капель и квазицилиндрических струй, четок и снарядных структур этот параметр будет одинаковым.

Для нормирования выбрана площадь контрольного объема, вследствие того, что она неизменна и всегда (за исключением кольцевой структуры) будет больше боковой площади одного элемента потока – капли, глобулы, струи и полосы.

Так неравномерность распределения вдоль потока компонента также учитывается в данном факторе – β .

Направление, по которому происходит вытягивание струй и т.п. можно считать известным из текущего вектора скорости движения.

Проведем проверку классических структур для оценки инвариантности относительно введенных факторов.

Вариант 1. Полное заполнение цилиндрического или любого другого КО дает нам $\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \sigma = 1$.

Когда элементом потока является струя квазицилиндрической формы, то факторы будут

$$\alpha = \frac{\pi r^2 L}{\pi R^2 L} = \frac{r^2}{R^2}, \quad \beta = \frac{2\pi r L}{2\pi R L} = \frac{r}{R}. \quad (4)$$

Вариант 2. Сферические капли в цилиндрическом КО.

$$\alpha = \frac{4}{3} \frac{r^3}{R^2 L}, \beta = 2 \frac{r^2}{RL}, \quad (5)$$

где r – радиус сферы;

R – радиус контрольного объема;

L – длина контрольного объема.

Для удобства анализа введем пси-фактор, показывающий степень раздробленности потока компонента и совершенство форм элементов

Пси-фактор здесь

$$\psi = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\frac{4}{3} \frac{r^3}{R^2 L}}{2 \frac{r^2}{RL}} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{R^2 L} \cdot \frac{RL}{2r^2} = \frac{2}{3} \frac{r}{R}. \quad (6)$$

Количество элементов потока

$$n = \frac{\sigma}{\alpha} = \frac{3}{4} \frac{R^2 L \sigma}{r^3}. \quad (7)$$

Если радиус сферы равен радиусу КО, тогда

$$\alpha = \frac{4}{3} \frac{R}{L}, \beta = 2 \frac{R}{L}, \quad (8)$$

Пси-фактор

$$\psi = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\frac{4}{3} \frac{R}{L}}{\frac{2R}{L}} = \frac{2}{3} \quad (9)$$

Насыщенность $\sigma = \frac{4}{3} \frac{R}{L}$, для длины канала равной $2R$ будет – $\sigma = \frac{2}{3}$.

Если сфера по малому диаметру равна диаметру канала, при этом вытянута вдоль канала (аналог снарядной структуры), то пси-фактор будет увеличиваться.

Определение количества элементов связано с допущением, что количество капель по длине канала и по площади сечения примерно равно.

Таким образом, получается, что при радиусе капли, равном радиусу канала, пси-фактор равен $2/3$. При уменьшении радиуса пси-фактор падает, что отражает более сильное взаимодействие компонентов через трение.

Получим функцию от 0 до $2/3$, когда сфера перекрывает весь КО в сечении, но не весь в объеме (рисунок 3).

В процессе вычисления сил трения потребуется вычислить суммарную площадь соприкосновения фаз. Для начала нужно вычислить суммарную поверхность всех элементов потока через известные на данный момент значения α и β .

β -фактор позволяет вычислить среднюю площадь элемента, а α -фактор количество элементов

$$n_i = \frac{\sigma_i}{\alpha_i}. \quad (10)$$

Для включения в расчет нам понадобится натуральное выражение площади соприкосновения фаз. Для канала, в котором как по площади, так и по длине равномерно распределены текущие среды. Таким образом можно получить суммарную поверхность всех элементов компонента i

$$\sum S_i^e = n_i \beta_i S = \sigma_i \frac{\beta_i S}{\alpha_i}. \quad (11)$$

При этом в качестве настроечных функций можно ввести вероятность взаимодействия компонента i с компонентом j в виде $-g_{i,j}(\sigma_i, \sigma_j)$.

На рисунке 3 показана зависимость пси-фактора от радиуса капель. При увеличении размеров капель пси-фактор реагирует линейным ростом.

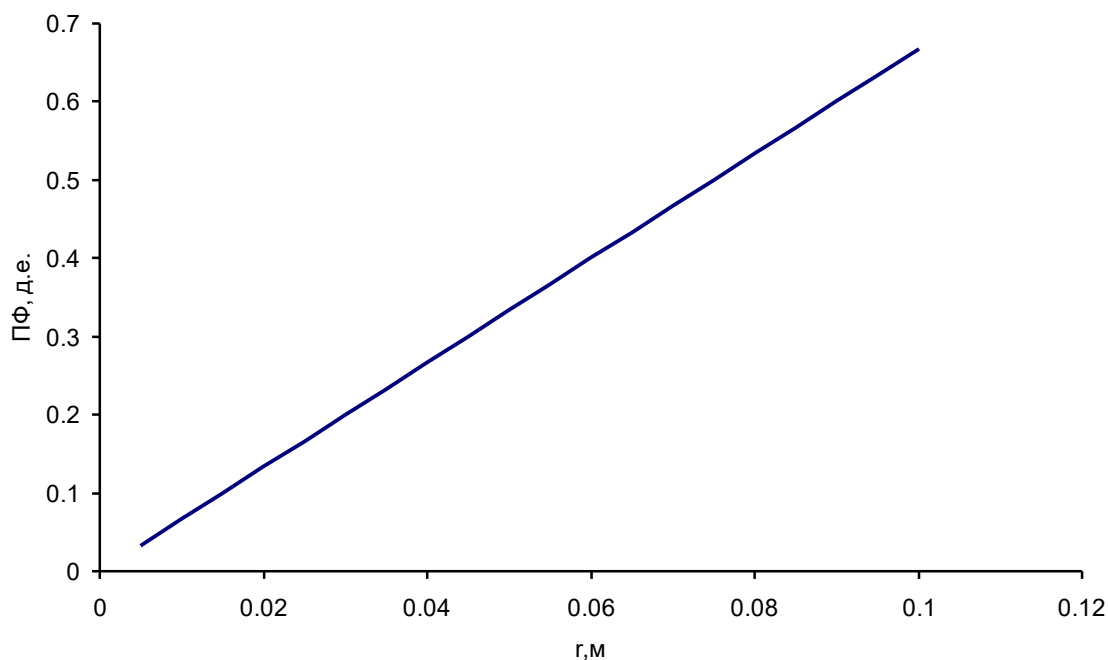


Рисунок 3. Зависимость пси-фактора для сферических капель в цилиндрическом канале от их размера

Логично полагать, что при деформации капле в сторону вытягивания вдоль канала форма будет стремиться к цилиндру (или эллипсоиду) и отношение их объемов к боковым поверхностям будет расти, стремясь к единице.

Рассмотрим случай струйного течения. Для нашего случая (r – радиус струек, R – радиус цилиндрического канала)

$$\psi_i = \frac{V_i^e S}{S_i^e V} = \frac{\pi r^2 L}{2\pi r L} \frac{2\pi R L}{\pi R^2 L} = \frac{r}{R} \quad (12)$$

Логично предположить, что при переходе от пузырьковой структуры к струйкам (промежуточные моменты – вытягивание капле вдоль канала, локальная четочная структура, а затем струйки), рисунок 4.

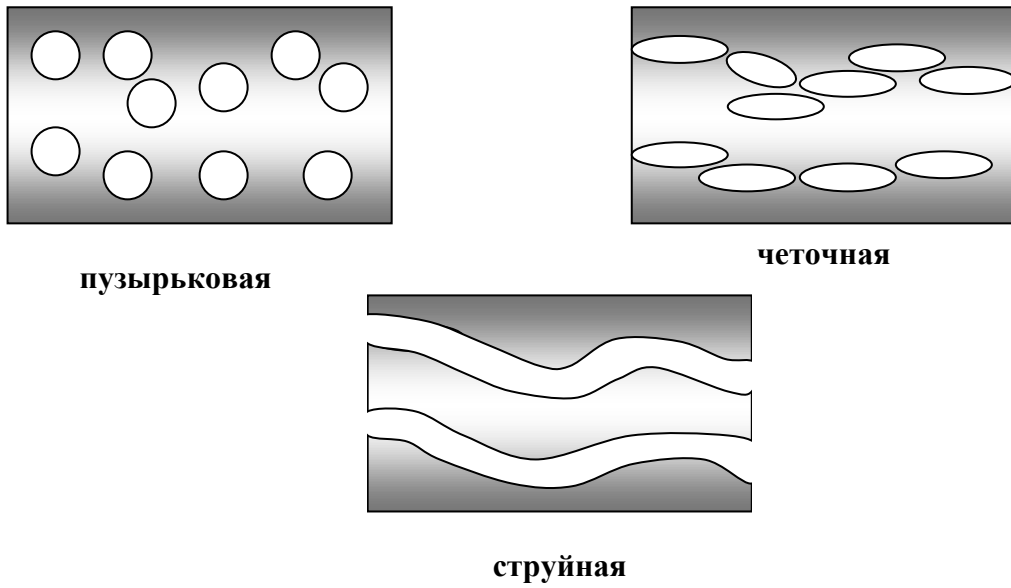


Рисунок 4. Переход от пузырьковой структуры к струйной

Как видно из рисунка 5 пузырьковый режим переходит к струйному и далее достигнет предела $r = R$ ($R = 0.1$ м в примере).

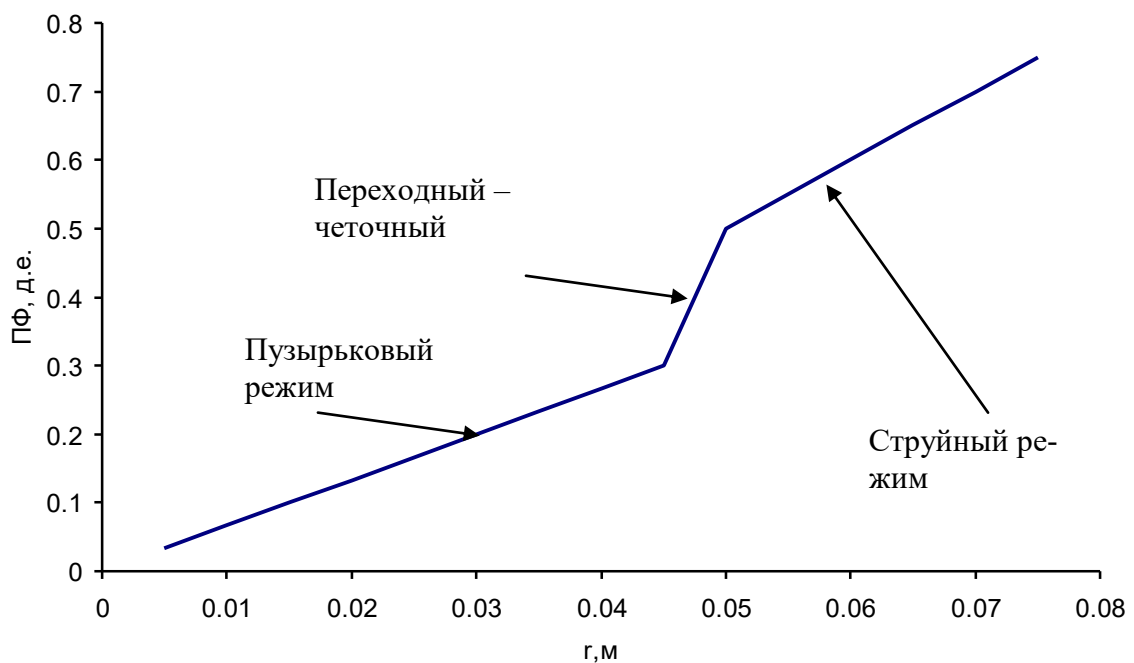


Рисунок 5. Пси-фактор от радиуса пузырьков, четок и струй

Наиболее не оптимально с позиции минимума энергии (минимальная производная пси-фактора по размеру – r) будет лентовидная или кольцевая структура при малых толщинах (r), когда каждый элемент компонента i будет иметь минимальный объем при больших боковых площадях.

Вышеописанные теоретические аспекты не ограничивают применения предложенного фактора, т.к. линейный участок (рисунки 4, 5) характеризуют идеальные формы. Для вычленения характерных размеров элементов структуры можно опираться на размер канала и его боковую поверхность.

Так теоретическую зависимость $\psi_i(r)$ лучше построить в относительных координатах $\psi_i\left(\frac{r_i}{R}\right)$ (рисунок 6).

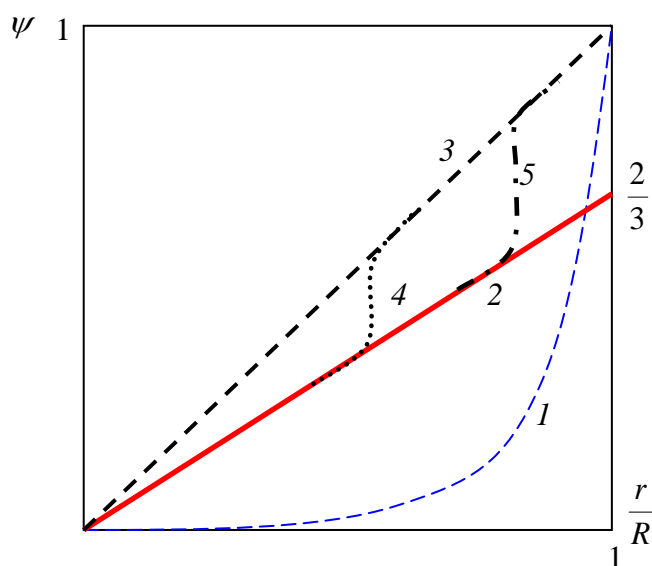


Рисунок 6. Сводный график теоретической зависимости пси-фактора от характерного размера элементов структуры расположения компонента i в другой среде:

1 – расслоенная, лентовидная, кольцевая; 2 – пузырьковая; 3 – струйная;
 4 – четочная; 5 – снарядная

Интересным моментом является кольцевая и расслоенная структуры.

Для кольцевой структуры, если компонент прижат к стенкам контрольного объема (рисунок 2а), характерным размером – r будет толщина слоя:

$$\alpha = \frac{\pi[R^2 - (R-r)^2]L}{\pi R^2 L} = \frac{R^2 - (R-r)^2}{R^2}, \quad (13)$$

$$\beta = L \frac{2\pi[R + (R-r)]}{2\pi RL} = \frac{R + (R-r)}{R}. \quad (14)$$

На рисунке 7б отображена теоретическая зависимость пси-фактора от толщины слоя. Как видно предельное значение пси-фактор равное 2/3 достигается, когда толщина слоя равна R .

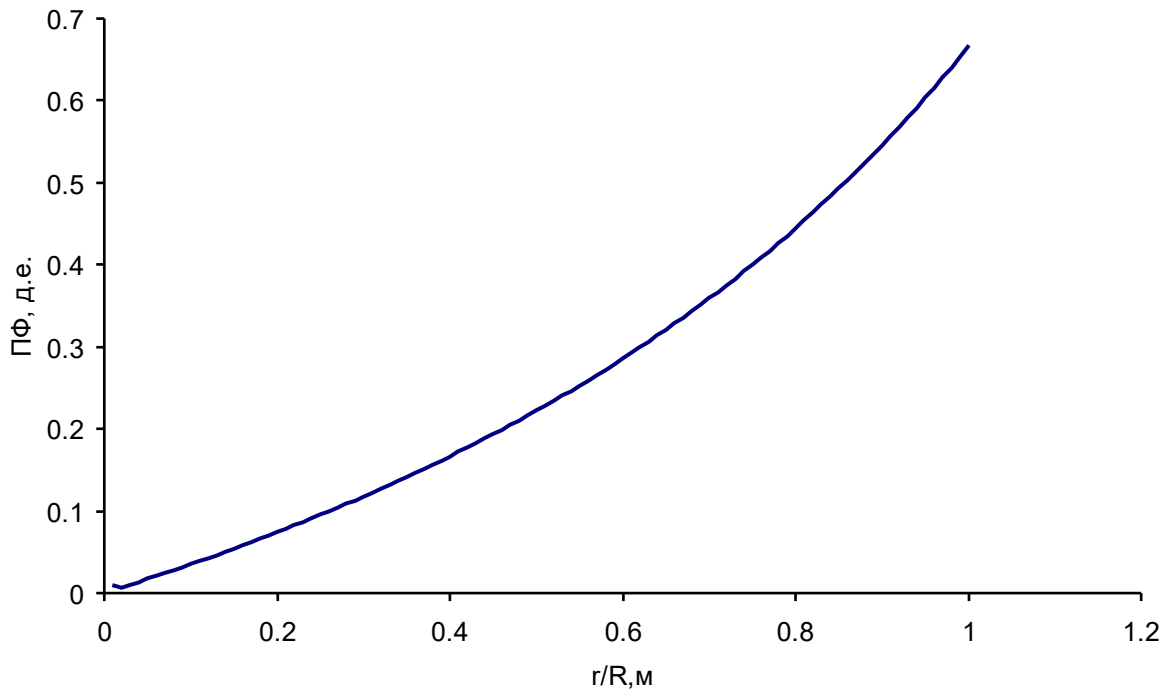
Как видно функция $\psi\left(\frac{r}{R}\right)$ имеет нелинейную форму, а $\beta\left(\frac{r}{R}\right)$ линейную и находится в границах (1,2) (рисунок 7б).

В случае расслоенной структуры характерным размером r будет расстояние от края контрольного объема (рисунок 2б)

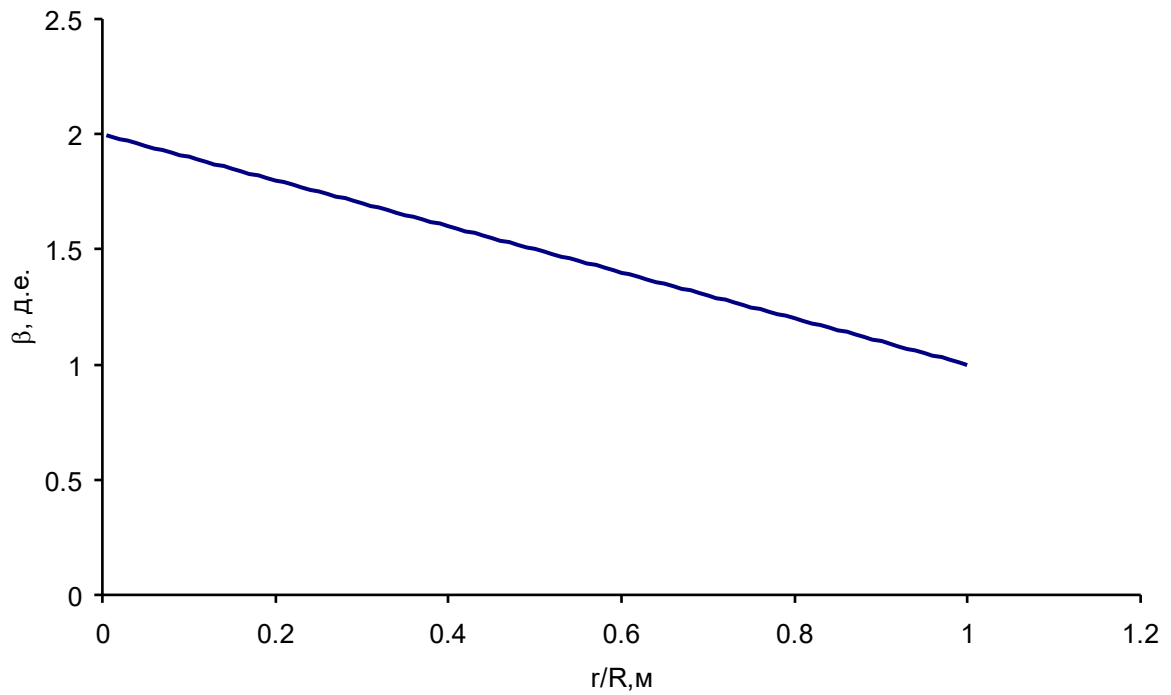
$$\alpha = \frac{\pi[R^2 - (R-r)^2]L}{\pi R^2 L} = \frac{R^2 - (R-r)^2}{R^2}, \quad (15)$$

$$\beta = L \frac{2\pi[R + (R-r)]}{2\pi RL} = \frac{R + (R-r)}{R}. \quad (16)$$

При лентовидной и особенно кольцевой структуре β -фактор может быть больше единицы, т.к. у кольца берется внутренняя и внешняя площадь.



а)



б)

Рисунок 7. Зависимость пси-фактора и бета-фактора от относительной толщины кольцевого слоя

Таблица 1. Типы структур в цилиндрическом контрольном объеме

Форма элемента	α	$n = \frac{\sigma}{\alpha}$	β	$\psi = \frac{\alpha}{\beta}$	σ	$\frac{\sum S_i^e}{S}$	Тип структуры
цилиндр	1	1	1	1	1	1	сплошная
цилиндр	$\ll 1$	$\gg 1$	$\gg 1$	0..1	< 1	$\gg 1$	струйная
полый цилиндр	$\alpha = \sigma$	1	1..2	$< 2/3$	< 1	1..2	кольцевая
любая	$\alpha = \sigma$	1	< 1	$\ll 1$	< 1	< 1	расслоенная
сфера	$\alpha = \sigma$	1	1	$2/3$	$2/3$	1	идеальная пробковая
эллипсоид	$\alpha = \sigma$	1	$> 2/3$	$2/3 < \psi < 1$	$2/3 < \sigma < 1$	$> 2/3$	снарядная
сфера	$\alpha \ll \sigma$	$\gg 1$	$\ll 1$	$< 2/3$	< 1	$\gg 1$	пузырьковая
инверсия сфера	$\alpha \ll \sigma$	$\gg 1$	$\ll 1$	< 1	< 1	$\gg 1$	обратно-пузырьковая
эллипсоид	$\alpha \ll \sigma$	$\gg 1$	$\ll 1$	< 1	< 1	$\gg 1$	четочная

В качестве вывода стоит отметить, что два выведенных фактора – α и β позволяют идентифицировать характеристику потока компонента в контрольном объеме. При этом по ним можно легко вычислить необходимые для определения силы бинарного трения через введенные функции вероятности взаимодействия компонентов.

Задача расчета изменений данных факторов вследствие гидродинамической обстановки (давление, температура, кинетические энергии, скорости, вязкости и т.п.) можно свести, как к настроечным функциям, полагая процесс перехода от структуры к структуре мгновенным, или согласно методике, основанной на противодействии сдерживающих сил (агрегационные силы – молекулярного притяжения) и сил сегрегации (например, вследствие кинетических энергий и вязкостного трения).

Получается, что текущее состояние элементов выраженное, в альфа и бета факторах будет влиять на новое состояние, т.к. «прочность» элементов зависит от их текущей геометрии и степени воздействия на них извне.

На основе эмпирического опыта движения жидкостей и газов в цилиндрических каналах согласно Дарси-Вейсбаха для межфазного трения мож-

но записать в виде функции перепада давления на взаимное трение, вызванное трением компонента j о компонент i

$$\Delta p_{i,j} = \lambda_{i,j} L \frac{|\rho_i - \rho_j| |\omega_i - \omega_j| (\omega_i - \omega_j)}{2D_i}, \quad (17)$$

и действующее на каждый элемент потока i

$$\Delta p_{i,j}^e = \lambda_{i,j} L \frac{|\rho_i - \rho_j| |\omega_i - \omega_j| (\omega_i - \omega_j)}{n2D_i}, \quad (18)$$

$$\text{Скорость компонента} - \omega_i = \frac{m_i}{S_i^T \rho_i},$$

где D_i – условный гидравлический диаметр, показывающий суммарный средний диаметр элементов потока i -го компонента;

n – количество элементов потока, рассчитываемое по указанным выше факторам;

L – длина участка течения в контрольном объеме;

m_i – текущий массовый расход компонента вдоль рассматриваемой оси;

S_i^T – суммарная площадь поперечного сечения потока i -ого компонента.

Последнюю можно вычислять по-разному, исходя из табл.1.

Весьма приближенно, для сферических капель или струй

$$S_i^T = S^T \sigma_i, \quad (19)$$

где S^T – площадь поперечного сечения контрольного объема.

Важным параметром здесь является D_i , который должен включать ранее введенные факторы структуры потока компонента i .

В первом приближении определяем для компонента – D_i

$$D_i = \frac{4\sigma_i V}{\sum S_i^e} = \frac{4\sigma_i V}{\sigma_i \frac{\beta_i S}{\alpha_i}} = \frac{4V}{S} \frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{4V}{S} \psi \quad (20)$$

Ранее введенные настроечные эмпирические функции вероятности взаимодействия компонентов $g_{i,j}(\sigma_i, \sigma_j)$ будут оказывать влияние на коэффициент сопротивления $\lambda_{i,j}$

$$\lambda_{i,j} = |\omega_i - \omega_j| \frac{g_{i,j}(\sigma_i, \sigma_j) D_i}{\sqrt{V_i V_j}} \quad (21)$$

Для расчета изменений в структуре потока элемента примем допущение, что форма и размер элементов сдерживается молекулярными силами, сжимающими каплю (элемент потока), а сила, вызванная межфазным трением, разрушает каплю.

Вместо упрощенной формы применения функции вероятности взаимодействия можно использовать n -мерную через все введенные факторы – $g_{i,j}(\sigma_i, \sigma_j, \alpha_i, \alpha_j, \beta_i, \beta_j, S, V)$. Применение данной функции при численном моделировании возможно заданием облака характерных точек с последующей аппроксимацией на основе теории образов.

Для расчета капиллярного давления требуется знание характерного размера r элемента потока. Это можно сделать из соотношения трех величин:

1. Боковая площадь элемента

$$S_i^e = S\beta \quad (22)$$

2. Объем элемента

$$V_i^e = \alpha_i V \quad (23)$$

3. Площадь поперечного сечения элемента

$$S_i^{e-T} = \frac{S^T}{n_i} = \alpha_i \frac{S^T}{\sigma_i} \quad (24)$$

Весьма приближенно, т.к. в будущем потребуется методика вычисления с учетом всех типов элементов потока

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{V_i^e}{S_i^e} + \frac{V_i^e}{S_i^{e-T}} = \frac{V_i^e}{S\beta_i} + \frac{V_i^e}{S^T \frac{\alpha_i}{\beta_i}} = \frac{V\alpha_i}{S\beta_i} + \frac{\beta_i V\alpha_i}{S^T \alpha_i} = \\ &= \frac{1}{2} V \left(\frac{\alpha_i}{S\beta_i} + \frac{\beta_i}{S^T} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

Совсем примитивный вариант рассчитать средний радиус элементов, как

$$r_i = \sqrt[3]{V\alpha_i}. \quad (26)$$

Далее для расчета задаются функции давления агрегации от радиуса кривизны в виде $p_i^c = \gamma_i(r)$. Логично предположить, что для жидкостей функция будет близкой к гиперболе.

Для расчета изменения факторов альфа и бета введем последние эмпирические зависимости в виде относительного изменения критерия объема и формы элемента:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \alpha_i \varepsilon_i \left(dt \left(p_i^c - |\Delta p_{i,j}^e| \right), r_i \right), \\ \beta_i &= \beta_i \phi_i \left(dt \left(p_i^c - |\Delta p_{i,j}^e| \right), r_i \right). \end{aligned} \quad (27)$$

В качестве аргументов к функциям выступают: разность давления агрегации элементов и перепада давления на трение между фазами, умноженное на время, а также текущий характерный размер элемента.

Первый аргумент есть импульс силы, вызывающей изменение объема и формы элемента потока.

При перепаде давления на трение меньше давления агрегации функция $\varepsilon_{i,j}(p,r)$ должна быть более либо равна 1.0. В противном случае менее или равна 1,0, т.е. происходит дробление объема – разрушение элементов потока. Если функции единичны на всей области определения, тогда начальные значения этих факторов изменяться не будут.

Для расчета многофазного течения такие функции задаются для каждого компонента. При этом важно отметить, что для расчета изменений данных факторов требуется рассчитать все перепады давления на трение со всеми соседними фазами, т.е. как в рекурсивной формуле ниже

$$\alpha_i = \prod_{j=1}^N \alpha_i \varepsilon_i \left(dt \left(p_i^c - |\Delta p_{i,j}^e| \right), r_i \right). \quad (28)$$

Аналогичным образом для бета-фактора.

Модуль для перепада давления взят, так как не имеет значения, что происходит: торможение или разгон потока со стороны соседнего компонента. Здесь важен скаляр – сила воздействия.

Выводы

В результате представленной работы показана теоретическая основа и алгоритм по определению режима течения многофазной системы. Применение данной методики возможно для выполнения динамических расчетов, программирования расчетных модулей многофазных расходомеров, построения номограмм, позволяющих учесть режим течения при аналитических расчетах.

Список используемых источников

- 1 Мамаев В.А., Одишария Г.Э. Движение газожидкостных смесей в трубах. М. «Недра», 1973. 270с.
- 2 Ли Д., Никенс Г.В. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин. М. ООО «Премиум Инжиниринг», 2008. 384с.

3 Одишария Г.Э., Точигин А.А. Прикладная гидродинамика газожидкостных смесей. М.: Всерос. науч.-исслед.ин-т природных газов и газовых технологий, 1998. 400с.

4 Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Л.: «Химия», 1966. 536с.

5 Гриценко А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. М.: Недра, 1994. 238с.

6 Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 374с.

7 Барилевич В.А. Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение. СПб.: Политехн. ун-т, 2009. 425с.

8 Brill J.P., Beggs H.D. Two-phase flow in pipe. 1991, 638с.

References

1 Mamaev V.A., Odisharija G.Je. Dvizhenie gazozhidkostnyh smesej v trubah. M. «Nedra», 1973. 270s. [in Russian].

2 Li D., Nikens G.V. Jekspluatacija obvodnjajushhihsja gazovyh skvazhin. M. ООО «Premium Inzhiniring», 2008. 384s. [in Russian].

3 Odisharija G.Je., Tochigin A.A. Prikladnaja gidrodinamika gazozhidkostnyh smesej. M.: Vseros. nauch.-issled.in-t prirodnyh gazov i gazovyh tehnologij, 1998. 400s. [in Russian].

4 Bretshnajder S. Svojtstva gazov i zhidkostej. Inzhenernye metody rascheta. L.: «Himija», 1966. 536s. [in Russian].

5 Gricenko A.I. Gidrodinamika gazozhidkostnyh smesej v skvazhinah i truboprovodah. M.: Nedra, 1994. 238s. [in Russian].

6 Labuncov D.A. Mehanika dvuhfaznyh sistem. M.: MJeI, 2000. 374s. [in Russian].

7 Barilovich V.A. Osnovy termogazodinamiki dvuhfaznyh potokov i ih chislennoe reshenie. SPb.: Politehn. un-t, 2009. 425s. [in Russian].

8 Brill J.P., Beggs H.D. Two-phase flow in pipe. 1991, 638с.

Сведения об авторах

About the authors

Стрекалов А.В., д-р техн. наук, проф. кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВО ТИУ, г. Тюмень, Российская Федерация

A.V. Strekalov, Doctor Engineering Sciences, Professor of the Chair «Development and Exploitation of Oil and Gas Fields», FSBEI HE TIU, Tyumen, the Russian Federation

email: darlex77@mail.ru

Глумов Д. Н., аспирант, ФГБОУ ВО ТИУ, г. Тюмень, Российская Федерация

D. N. Glumov, Post Graduate, FSBEI HE TIU, Tyumen, the Russian Federation

email: Glumov@mail.ru