

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ

В.Е. ВЕРШИНИН, Р.М. ГАНОПОЛЬСКИЙ, А.И. ВАРАВВА, В.О. ПОЛЯКОВ

*Центр высокопроизводительных и инфокоммуникационных технологий;
ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень*

Ключевые слова и фразы: OpenFoam; карта режимов течения; многофазное течение; численное моделирование.

Аннотация: В работе приведены результаты численного моделирования двухфазного течения газа и жидкости в горизонтальных каналах с целью определения условий возникновения различных структур течения. Границы режимов сопоставлялись с полуэмпирической картой режимов Тейтла и Даклера. Показано, что численное моделирование потока показывает соответствие карте Тейтла и Даклера лишь в некоторых узких областях на плоскости скорость–газонасыщенность.

Введение

При создании многофазных расходомеров для учета добываемой на промыслах нефти достаточно часто встает вопрос о структуре исследуемого потока. В зависимости от соотношения объемных долей фаз, скорости смеси, ориентации и геометрии канала, направления течения (опускное, подъемное, горизонтальное), а также свойств жидкости и газа (в первую очередь поверхностного натяжения, плотности, вязкости) в канале устанавливаются различные структуры двухфазного потока. Это, в свою очередь, определяет вид конструктивных решений установки и метод измерения объемных долей фаз. Аналогичные ситуации возникают и при работе эталонных стендов, моделирующих многофазные потоки с заданным соотношением фаз и скоростей. Таким образом, уже на стадии проектирования прибора необходимо определить ожидаемый тип многофазного течения в его конструктивных элементах. Знание структуры (режима течения) для двухфазных систем сопоставимо по важности с установлением границы ламинарного и турбулентного режимов течения однофазной жидкости. Но, к сожалению, классификация режимов течения двухфазной смеси не опирается ни на столь же убедительные эксперименты, как знаменитый опыт Рейнольдса, ни на внушительные теоретические результаты теории гидродинамической устойчивости, на которых

зиждется определение условий перехода к турбулентному течению однофазной жидкости. Классификация структуры двухфазных течений основана главным образом на визуальных (оптических) наблюдениях и во многом отражает субъективные представления исследователя. Развитие вычислительной техники и математических методов численного анализа позволяет решить задачу расчета характеристик многофазных потоков в установках без проведения натуральных экспериментов. Это позволяет ускорить процесс поиска оптимальных конструктивных решений и спрогнозировать поведение установки до ее фактического создания. В этих условиях представляется важным проведение сравнительного анализа результатов численного моделирования многофазных течений с известными результатами экспериментальных наблюдений за различными типами течений

Целью работы являлось определение границ существования различных режимов двухфазных (газожидкостных) течений в горизонтальных трубах с помощью численного моделирования. Результаты численного моделирования сравнивались с картой Тейтла-Даклера. Исследование осуществлялось при государственной поддержке в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 проекта «Разработка и серийный выпуск измерительной установки для учета добываемых нефти и газа на месторождениях, находящихся на стадии завершающей добычи». Расчеты выполнялись на

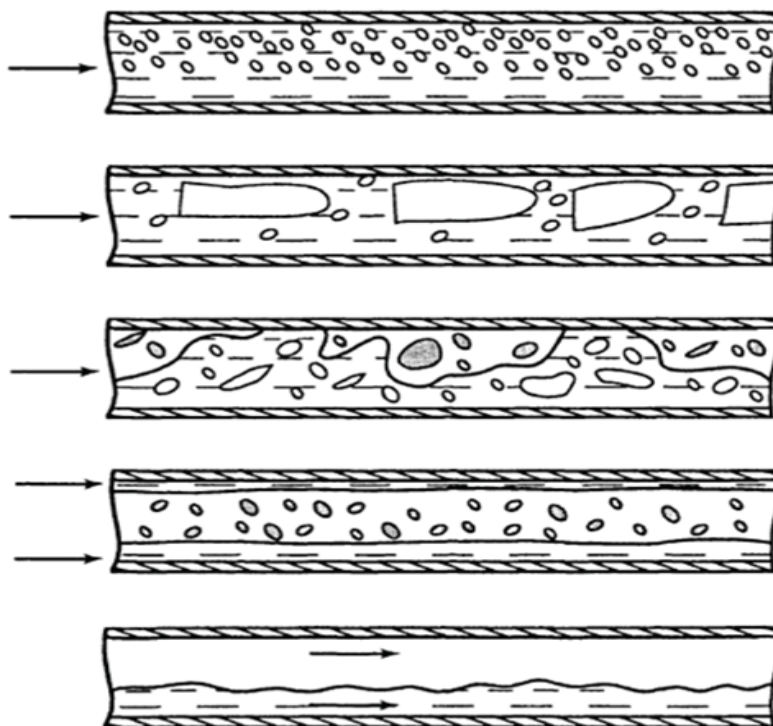


Рис. 1. Структуры газожидкостного течения в горизонтальных трубах:
а) – пузырьковая; б) – снарядная; в) – эмульсионная; г) – дисперсно-кольцевая; д) – расслоенная

суперкомпьютере «Менделеев» в ЦКП в ГВЦ ТюмГУ.

Типы двухфазных течений

Экспериментальными исследованиями установлено большое количество структур газожидкостных течений, отличающихся формой межфазной поверхности [1]. Учитывая многообразие наблюдаемых режимов течения, а также неоднозначность в использовании конкретных терминов, ограничимся рассмотрением основных структур, при этом остальные могут рассматриваться как частный случай или комбинация основных.

Для горизонтальных труб основными структурами являются пузырьковая, снарядная, эмульсионная, дисперсно-кольцевая (рис. 1). Малому расходу газа при высокой скорости потока соответствует пузырьковая структура (рис. 1а). В данном случае несущей фазой является доминирующая по объему жидкость, а газ представлен пузырьками, размеры которых намного меньше диаметра трубы.

Рассматриваемая структура часто встречается в пароводяных потоках и наблюдается

сразу после начала вскипания воды [2]. Для продвижения газа с той же, что и жидкость, скоростью требуется меньший градиент давления. Поскольку пузырьки газа находятся внутри движущейся жидкости с характерным для нее градиентом давления, скорость газовой фазы оказывается выше. Пузырек, попав в след предшествующего пузырька, испытывает меньшее гидравлическое сопротивление и увеличивает скорость движения, при этом большее сопротивление со стороны относительно невозмущенной жидкости обуславливает наличие сил, стремящихся удержать пузырек в указанном следе. Стремление пузырьков догнать друг друга способствует их слиянию по мере движения. Поэтому пузырьковое течение является развивающимся в том смысле, что при одних и тех же давлениях, расходах газа и жидкости размеры и скорости движения пузырьков могут существенно отличаться в зависимости от длины предшествующего участка течения. Также отмечается существенное влияние условий ввода или образования газовой фазы на параметры течения.

При более низкой скорости потока, если объемная концентрация газовой фазы достаточ-

но велика и имеются соответствующие условия вверх по потоку (длина предшествующего участка течения, технология ввода или образования газовой фазы), то пузырьки, сливаясь, занимают большую часть сечения трубы и устанавливается снарядная структура течения (рис. 1б). Данная структура характеризуется наличием газовых снарядов, пленки жидкости между снарядом и стенками канала, жидкой перемычки между снарядами, содержащей, как правило, пузырьки газа. Снарядное течение является развивающимся в том же смысле, что и пузырьковое, т.е. параметры структуры (скорости снаряда и перемычки, длина снаряда и т.д.) зависят от условий вверх по потоку.

Увеличение расхода газа обуславливает рост скоростей снаряда и перемычки. Отмечено, что при высоких скоростях нарушается упорядоченная структура снарядного течения и наблюдается эмульсионная структура, иногда называемая также пенной (рис. 1в). Эмульсионная структура отличается крайней неупорядоченностью. При высоких скоростях пузырьковое течение может сразу перейти в эмульсионное, минуя стадию снарядной структуры.

Увеличение расхода газа при высокой скорости потока и, следовательно, газосодержания приводит к слиянию газовых фракций. При этом вблизи стенок трубы формируется пленка жидкости, поэтому соответствующая структура называется пленочной. Данный термин является общим для каналов любой геометрии. Применительно к трубам круглого сечения обычно используется термин «дисперсно-кольцевая структура». Кроме жидкой пленки структура этого течения содержит дисперсное ядро, в котором в качестве несущей фазы выступает газ, а жидкость содержится в виде мелких капель (рис. 1г). При отсутствии в ядре капель используется термин «кольцевая структура».

В пузырьковой, снарядной, эмульсионной и дисперсно-кольцевой структурах в горизонтальных каналах возможна существенная неравномерность распределения фаз по сечению, связанная с действием гравитации. При значительных объемных концентрациях газовой фазы и малых скоростях в потоке динамическое воздействие газа на жидкость недостаточно велико для формирования пленки – жидкость концентрируется в нижней части трубы. Такая структура называется расслоенной (рис. 1д).

Из качественного описания характерных

структур двухфазных потоков ясно, насколько важно правильно идентифицировать эти структуры при расчете гидравлического сопротивления и теплообмена. Представляется очевидным, например, что при расчетах пузырькового и дисперсно-кольцевого режимов невозможно исходить из одинаковой модели. До настоящего времени механизм смены структур течения изучен слабо. Вместе с тем, особенности структур течения часто требуют использования специфических методов и формул при расчете параметров газожидкостного потока. В настоящее время разработано множество методов определения границ существования режимов двухфазных течений, что само по себе свидетельствует об отсутствии общепринятой методики расчета.

Для определения структур (режимов) течения при осуществлении расчетов широкое распространение получили карты, графически обобщающие экспериментальные данные и дающие наглядное представление об областях существования структур в зависимости от легко контролируемых параметров потока, откладываемых по координатным осям. Зная параметры потока, с помощью таких карт можно прогнозировать структуру течения. Однако едва ли можно надеяться, что с помощью всего двух параметров удастся точно описать условия всех переходов от одной структуры к другой. Следует также иметь в виду, что границы режимов течения зависят не только от режимных параметров и свойств фаз, но и от условий на входе в канал. При этом, установление определенной структуры двухфазного течения происходит на больших длинах, нередко превышающих 100 диаметров канала. Таким образом, карты режимов двухфазных потоков следует рассматривать как достаточно грубый инструмент для приближенной оценки.

Для горизонтальных каналов рекомендуется карта режимов Тейтла и Даклера (рис. 2). При этом снарядная и эмульсионная структуры объединены в перемежающийся режим, а расслоенную структуру подразделяют на собственно расслоенный, без волн на межфазной поверхности и волновой режимы. Граница между волновым и остальными режимами определяется числом Фруда и параметром Локкарта-Мартинелли:

$$F = w_{\Gamma} \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma})gD}}; \quad (1)$$

$$X = \sqrt{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{ж}} / \left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где F – число Фруда; X – параметр Локкарта-Мартинелли; $\rho_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – плотности газа и жидкости; g – модуль ускорения свободного падения; D – диаметр канала; $w_{\text{г}}$ – приведенная скорость течения газа (рассчитывается по расходу газа); $(dp/dz)_{\text{ж}}$ и $(dp/dz)_{\text{г}}$ – градиенты давления в рассматриваемом канале при течении в нем только жидкой или только газовой фазы с их действительными расходами.

Границы A и B определяются переменными X и F , граница C – X и T .

Для границы пузырькового или перемежающегося режимов с кольцевым параметр X постоянен и равен 1,6. При $X > 1,6$ режим течения переходит в перемежающийся, при $X < 1,6$ – в кольцевой. Граница пузырькового и перемежающегося режимов определяется параметром X и числом T , которое можно рассматривать как модификацию числа Фруда, определяемого по скорости жидкой фазы:

$$T = \sqrt{\frac{(dp/dz)_{\text{ж}}}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})g}}. \quad (3)$$

Таким образом, одно из важных отличий карты режимов Тейтла и Даклера от прочих карт – наличие взаимозависимости не двух, а трех безразмерных комплексов. При этом, гра-

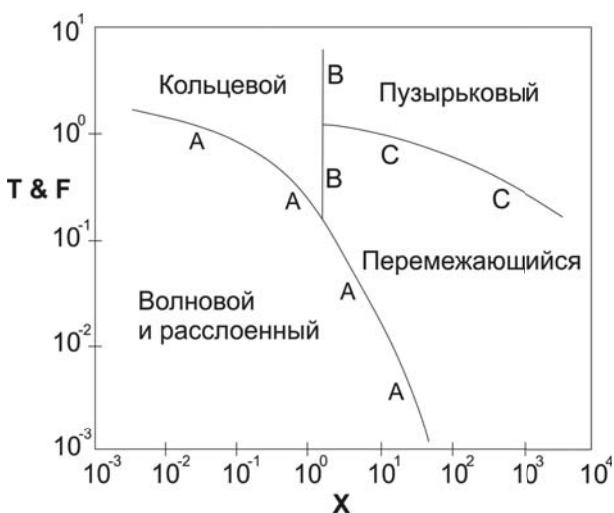


Рис. 2. Карта режимов течения Тейтла и Даклера для горизонтальных каналов

ницы режимов рассчитаны на основе простых физических моделей с привлечением некоторой опытной информации, а не являются прямым обобщением опытных данных. Согласие расчетных карт режимов с результатами экспериментов можно считать вполне удовлетворительным, если принять во внимание сказанное ранее о практической невозможности учесть влияние на режим течения специфики входных условий.

Для течения в горизонтальных и слабонаклонных трубах приближенная методика расчета условий взаимных переходов между различными структурами потока рассматривает в качестве базового расслоенный режим течения. Для этой структуры одномерные уравнения сохранения импульса записываются отдельно для потоков жидкости и газа. При известном (или постулируемом) законе трения на межфазной границе такой подход позволяет рассчитать доли сечения, приходящиеся на каждую из фаз в рассмотренном режиме течения, и градиент давления в трубе. Если бы жидкость и газ двигались в трубе со своим массовым расходом в отсутствие другой фазы, то соответствующие градиенты давления за счет трения выражались бы известным законом Дарси-Вейсбаха:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right) = \frac{\lambda}{2} \frac{\rho w}{D}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; D – гидравлический диаметр; ρ – плотность фазы; w – скорость фазы. Параметр Локкарта-Мартинелли (2), использующий отношение градиентов давления фаз в трубе, показывает, насколько поведение двухфазной смеси ближе к жидкости, чем к газу.

Приведенная скорость фазы есть отношение объемного расхода фазы к площади сечения трубы. Таким образом, приведенная скорость фазы может быть определена скоростью потока на входе v и газосодержанием α :

$$w_{\text{ж}} = \frac{q_{\text{ж}}}{S} = \frac{q_{\text{смеси}}}{S} (1 - \alpha) = v(1 - \alpha); \quad (5)$$

$$w_{\text{г}} = \frac{q_{\text{г}}}{S} = \frac{q_{\text{смеси}}}{S} \alpha = v\alpha. \quad (6)$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления рассчитываются по хорошо известным из механики однофазных систем соотношениям как функции числа Рейнольдса [1].

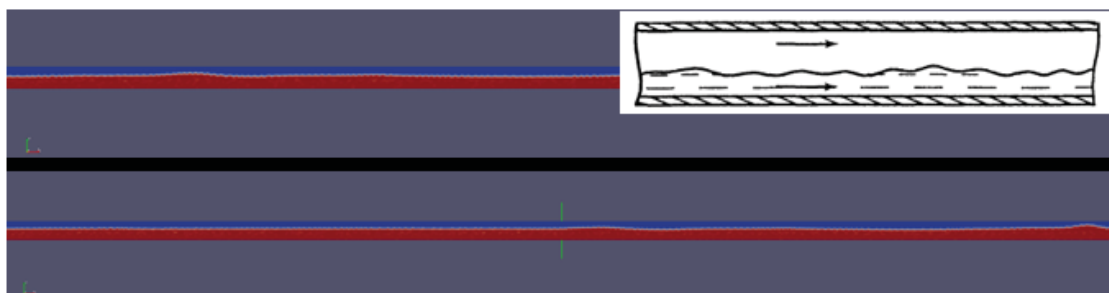


Рис. 3. Расслоенный режим течения

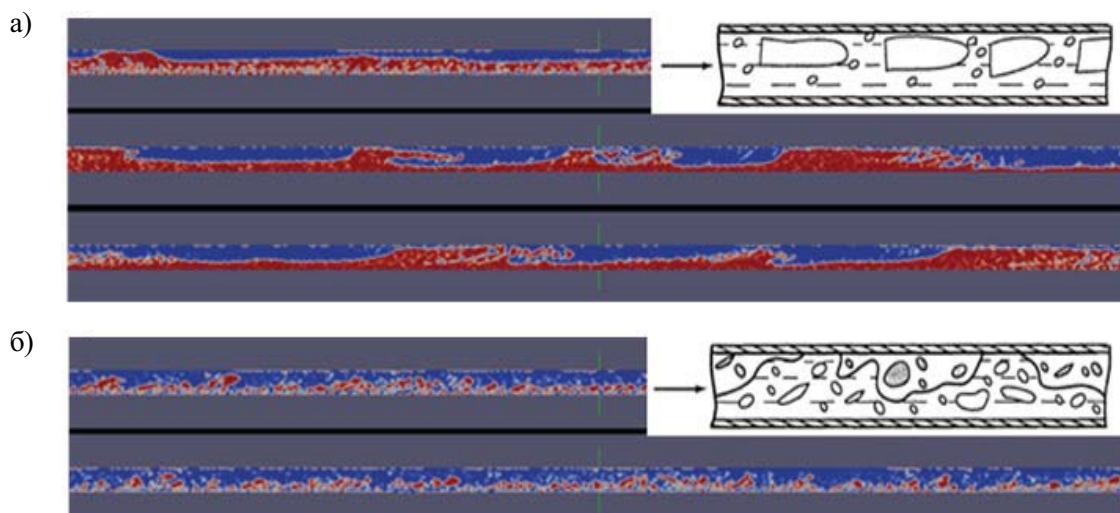


Рис. 4. Перемежающийся режим течения:

а) – режим течения близок к пробковому или снарядному; б) – режим течения близок к эмульсионному

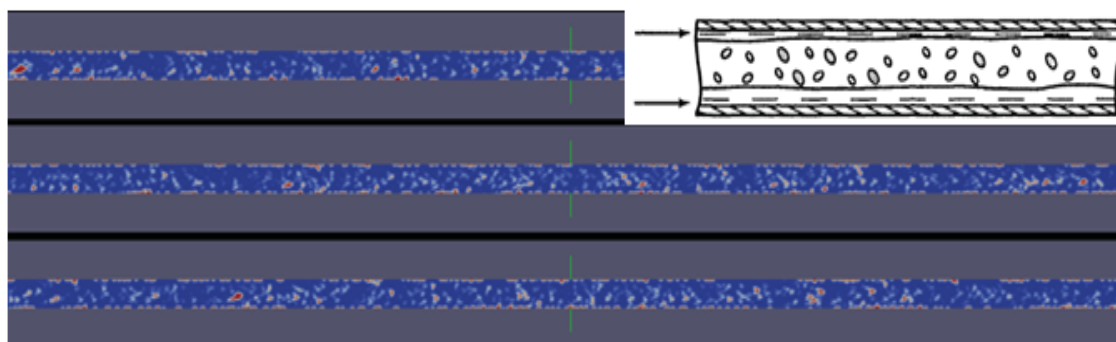


Рис. 5. Кольцевой режим течения

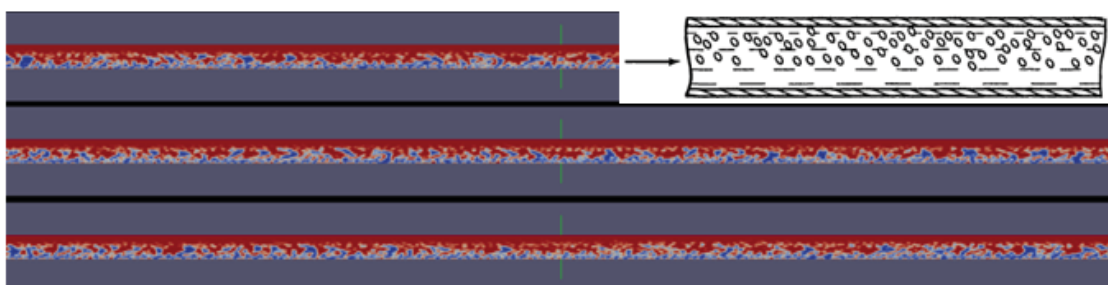


Рис. 6. Пузырьковый режим течения

Таблица 1. Соответствия карты режимов потока Тейтла и Даклера с результатами симулятора *OpenFOAM*

Скорость, м/с	Газосодержание					
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
0,1	<i>X</i>	40,7696	20,7589	13,5899	8,8967	4,5300
	<i>F</i>	0,0014	0,0041	0,0069	0,0096	0,0124
	<i>T</i>	0,0432	0,0381	0,0322	0,0249	0,0144
	<i>T&D:</i>	Волновой*	Волновой*	Волновой*	Волновой*	Волновой
	<i>OF:</i>	Волновой	Волновой	Волновой	Волновой	Волновой
0,5	<i>X</i>	40,7696	20,7589	13,5899	8,8967	4,2363
	<i>F</i>	0,0069	0,0206	0,0344	0,0481	0,0619
	<i>T</i>	0,0965	0,0851	0,0719	0,0557	0,0322
	<i>T&D:</i>	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Волновой*
	<i>OF:</i>		Волновой	Волновой	Волновой	Волновой
1	<i>X</i>	40,7696	20,7589	11,2613	5,8524	2,6748
	<i>F</i>	0,0138	0,0413	0,0688	0,0963	0,1238
	<i>T</i>	0,1365	0,1203	0,1017	0,0788	0,0455
	<i>T&D:</i>	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся*
	<i>OF:</i>		Волновой	Волновой	Волновой	Волновой
2	<i>X</i>	60,4345	18,5640	7,7034	4,4422	2,0584
	<i>F</i>	0,0275	0,0825	0,1376	0,1926	0,2476
	<i>T</i>	0,2861	0,2124	0,1438	0,1114	0,0643
	<i>T&D:</i>	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся*
	<i>OF:</i>	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Волновой	Волновой
5	<i>X</i>	72,2072	19,6453	9,3458	4,1632	1,4598
	<i>F</i>	0,0688	0,2063	0,3439	0,4815	0,6190
	<i>T</i>	0,6522	0,5234	0,3893	0,2328	0,1017
	<i>T&D:</i>	Перемежающийся*	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Кольцевой*
	<i>OF:</i>	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Перемежающийся	Волновой
10	<i>X</i>	64,0563	19,6458	9,3603	4,4588	1,1257
	<i>F</i>	0,1376	0,4127	0,6878	0,9629	1,2381
	<i>T</i>	1,1961	0,9600	0,7151	0,4573	0,1438
	<i>T&D:</i>	Пузырьковый	Пузырьковый*	Перемежающийся	Перемежающийся	Кольцевой*
	<i>OF:</i>					Кольцевой
15	<i>X</i>	64,0110	19,6458	9,3603	4,4598	1,2777
	<i>F</i>	0,2063	0,6190	1,0317	1,4444	1,8571
	<i>T</i>	1,7054	1,3688	1,0197	0,6522	0,2328
	<i>T&D:</i>	Пузырьковый	Пузырьковый	Пузырьковый*	Перемежающийся	Кольцевой*
	<i>OF:</i>	Пузырьковый				Кольцевой

В данной работе для определения λ использовались следующие зависимости:

1) при $Re < 2320$ течение считается ламинарным, используется формула Стокса:

$$\lambda = \frac{64}{Re};$$

2) если $Re > 10^4$, течение происходит в развитом турбулентном режиме. В зоне так называемых гидравлически гладких труб используется формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}};$$

3) при режиме течения – переходный турбулентный, для него возможно использование формулы:

$$\lambda = (1 - \gamma) \frac{64}{Re} + \gamma \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}},$$

где $\gamma = 1 - e^{-0,002(Re - 0,3164)}$ – коэффициент перемежаемости.

Числа Рейнольдса $Re_{ж}$ и $Re_{г}$ определяются по следующим формулам:

$$Re_{ж} = \frac{w_{ж} \rho_{ж} D}{\mu_{ж}};$$

$$Re_{г} = \frac{w_{г} \rho_{г} D}{\mu_{г}}.$$

Численная модель двухфазного течения

Для проверки результатов, получаемых при использовании карты режимов Тейтла и Даклера, было проведено моделирование режимов газожидкостных потоков в гидродинамическом симуляторе *OpenFOAM* [3; 4]. Как уже отмечалось выше, устойчивая структура потока формируется постепенно, поэтому для получения корректных результатов необходимо производить расчеты для протяженных участков. При этом количество расчетных ячеек модели может достигать миллиона, а время расчета составить от 10 до 200 часов при использовании суперкомпьютера. Для достижения компромисса между точностью расчетов и затрачиваемым временем расчеты проводились на двумерной модели канала, ограниченного стенками сверху и снизу. При моделировании использовались следующие параметры потока:

– высота канала – 0,04 м, гидравлический

диаметр при этом соответствует диаметру трубы 0,08 м;

– длина канала – от 1 до 100 м в зависимости от скорости потока;

– размер ячеек расчетной сетки – $\sim 0,0018 \times 0,0018$ м;

– диапазон скоростей – от 0,1 до 15 м/с;

– диапазон газосодержания – от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2;

– плотность жидкости – ;

– плотность газа – ;

– кинематическая вязкость жидкости – $4 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

– кинематическая вязкость газа – $1,48 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

По результатам расчетов были построены карты течения, после чего производилась качественная оценка режима потока. Картины основных режимов течений и оценка их типа представлены на рис. 3–6. Чтобы минимизировать влияние начальных и граничных условий, режим потока оценивался на расстоянии, соответствующем 10 с времени жизни смеси. Для сравнения полученных оценок режима с картой Тейтла-Даклера была составлена табл. 1 с параметрами F , X , T , определяемыми по соотношениям (1)–(3). Строки, помеченные как *OF* содержат оценку, полученную исходя из результатов численного моделирования в пакете *OpenFoam*, а символом *T&D* оценку по карте Тейтла-Даклера. Пустые ячейки таблицы говорят о сложности однозначной классификации данного режима потока. Значения, помеченные звездочкой, говорят о том, что данный режим потока расположен вблизи переходной границы.

Результаты моделирования, представленные в табл. 1 показывают, что на плоскости (газосодержание – скорость потока) существуют области хорошего качественного соответствия карты режимов потока с результатами расчета на гидродинамическом симуляторе *OpenFOAM*.

Вместе с этим присутствуют и весьма широкие зоны расхождений, что относится, прежде всего, к переходным областям. Расхождение в интерпретации режима в зонах, далеких от границ (по карте Тейтла-Даклера), возможно, связаны с тем, что подобная карта является недостаточно точным инструментом для определения режима течения, не учитывающим все параметры задачи. Решение этой проблемы требует проведения дополнительных исследований.

Исследовательские работы осуществлялись при государственной поддержке в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г. проекта «Разработка и серийный выпуск измерительной установки для учета добываемых нефти и газа на месторождениях, находящихся на стадии завершающей добычи».

Литература

1. Лабунцов, Д.А. Механика двухфазных систем / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М. : МЭИ, 2000.
2. Чермошенцева, А.А. Математическое моделирование пароводяных течений в элементах оборудования геотермальных промыслов / А.А. Чермошенцева, А.Н. Шулюпин. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2011.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Two-Phase_Flow_Patterns_in_Horizontal_Tubes.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.thermopedia.com/content/2>.

References

1. Labuncov, D.A. Mehanika dvuhfaznyh sistem / D.A. Labuncov, V.V. Jagov. – M. : MJeI, 2000.
2. Chermoshenceva, A.A. Matematicheskoe modelirovanie parovodjanyh techenij v jelementah oborudovaniya geotermal'nyh promyslov / A.A. Chermoshenceva, A.N. Shuljupin. – Petropavlovsk-Kamchatskij : KamchatGTU, 2011.
3. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Two-Phase_Flow_Patterns_in_Horizontal_Tubes.
4. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.thermopedia.com/content/2>.

Numerical Modeling of Structures of Gas-Liquid Current

V.E. Vershinin, R.M. Ganopolskiy, A.I. Varavva, V.O. Polyakov

Center for High-Performance and Infocommunication Technologies, Tyumen State University, Tyumen

Keywords: Multiphase current; numerical modeling; card of modes of a current; OpenFoam.

Abstract: In this work, the results of numerical modeling of a two-phase current of gas and liquid are given in horizontal channels for the purpose of determining the conditions of emergence of various structures of a current. The borders of modes were compared with the semi-empirical card of modes of Teytel and Daklera. It is shown that numerical modeling of a stream shows compliance with Teytel and Daklera's card only in some narrow areas on the plane speed-gas-saturation.

© В.Е. Вершинин, Р.М. Ганопольский, А.И. Варавва, В.О. Поляков, 2013