

© А.Б. ШАБАРОВ, А.А. ВАКУЛИН, А.А. ЗАХАРОВ, Л.П. СЕМИХИНА,
Н.В. САРАНЧИН, А.А. ВАКУЛИН С.Н. САРАНЧИН

avakulin@utmn.ru

УДК 532.575.2

**ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА
МНОГОФАЗНОЙ СМЕСИ В СКВАЖИНАХ И ТРУБОПРОВОДАХ**

АННОТАЦИЯ. В работе предложена методика прогнозирования структуры течения и теплофизических параметров многофазного потока при его движении в скважине. Решение такого рода задач имеет важное практическое значение в различных хозяйственных отраслях.

АННОТАЦИЯ. This paper proposed a method for forecasting of fluxion structure and thermophysical parameters of a multiphase flow at its motion in a well. The solution of such problems has the important practical value in various economic branches.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Многофазные потоки, теплофизические параметры, измерительно-вычислительные системы, физико-математическое моделирование, газовый конденсат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Multiphase flow, thermophysical parameters, the MCS, physical and mathematical modeling, gas condensate.

Моделирование течения газожидкостных сред в скважинах представляет собой важную и востребованную в нефтегазовой отрасли проблему. Хотя этой проблеме в настоящее время посвящено достаточно большое количество публикаций [1], она по-прежнему далека от окончательного решения. Актуальность решения такого рода задач объясняется и неизбежным истощением природных залежей газа, нефти, газового конденсата по мере эксплуатации месторождений. При этом происходит падение давления углеводородных смесей, переход однофазных флюидов в двухфазное состояние, изменение характерных значений газового фактора и т.д. Очевидно также, что разработка и использование при проектировании и эксплуатации добывающих скважин удобных и понятных инженерам методов расчета течения и тепломассопереноса газожидкостных углеводородных сред в скважинах и в промысловых трубопроводах необходимо для решения множества технических задач.

Основой созданного в [2] алгоритма расчета течения и тепломассопереноса газожидкостных углеводородных сред в скважинах является система уравнений квазиодномерного течения отдельной фазы в многофазной многокомпонентной углеводородной среде, полученной интегрированием вдоль оси канала уравнений в форме, предложенной академиком Р.И. Нигматулиным [3]. Имеющийся в настоящее время экспериментальный материал позволяет замкнуть эту систему уравнений.

Цель настоящей работы состоит в адаптации алгоритма расчета и программного комплекса для проведения расчетов при различных режимах многофазного течения газоконденсатной смеси.

Для расчета используется метод контрольных объемов [4]. Внутренний объем скважины или трубопровода разбивается на конечное число малых участков — контрольных объемов V , ограниченных внутренней поверхностью трубопровода и поперечными сечениями S_1 и S_2 , расположенными на расстоянии ΔZ друг от друга. Применительно к контрольному объему используются балансовые уравнения: массы, количества движения, а также баланса полной энергии. Основные балансовые уравнения для контрольного объема — это уравнения сохранения массы, импульса и энергии.

Законы сохранения массы фаз при квазиодномерном подходе имеют вид ($i=1,2,\dots,N$) [4]:

$$\rho_{2i}v_{2i}S_{2i} = \rho_{1i}v_{1i}S_{1i} - \rho'_i v'_{ni} S'_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N J_{ji} V - \frac{\partial \rho_i}{\partial t} V,$$

где $\rho_{2i}v_{2i}S_{2i} - \rho_{1i}v_{1i}S_{1i} = d(\rho_i v_i S_i)$.

Это уравнение учитывает расход $\rho'_i v'_{ni} S'_i$ через боковую поверхность, что характерно при расчетах утечек, расходы при контролируемых подводах и отводах массы в измерительных устройствах и разветвленных системах промышленных трубопроводов. При течениях в скважинах обычно $G' = 0$, за исключением перфорированных участков.

Уравнение баланса механической энергии записывается в форме обобщенного уравнения Бернулли [4]. Для модели с общим давлением фаз:

$$\alpha_{kg} \frac{v_{2g}^2}{2} + \frac{\alpha_g P_{2g}}{\rho_g} + gz_2 = \alpha_{kg} \frac{v_{1g}^2}{2} + \frac{\alpha_g P_{1g}}{\rho_g} + gz_1 + l_{гнг}^* - l_{mpg} + \tilde{l}_g + l'_g + l_{\phi g},$$

$$\alpha_{ki} \frac{v_{2i}^2}{2} + \frac{\alpha_i P_{2i}}{\rho_i} + gz_2 = \alpha_{ki} \frac{v_{1i}^2}{2} + \frac{\alpha_i P_{1i}}{\rho_i} + gz_1 + l_{гни}^* - l_{mpi} + \tilde{l}_i + l'_i + l_{\phi i},$$

где $l_{гни}^* = l_{гн} - gz_1 + gz_2$, $l_{гни}^* = \int_{ix}^{dx}$ — удельная работа внешних сил, за вычетом работы по преодолению сил тяжести, Дж/кг; $l_{mpi} = \left(\lambda_{mpi} \frac{dx}{D} + \xi_{mi} \right) \frac{v_i^2}{2}$ — работа, затрачиваемая при движении каждой из фаз на преодоление сил трения о соответствующие части стенки и местные сопротивления; $\tilde{l}_i = -\frac{\partial v_i}{\partial t} dx$ — удель-

ная работа сил инерции; $l'_i = -v_{ni} \frac{\rho'_i S'_i}{\rho_i S_i} (v_{xi} - v_i)$ — работа сил, связанная с обменом импульсом при подводе или отводе массы через боковую поверхность;

$$l_{\phi i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{1}{\rho_i} (P_{jix} - v_i J_{ji}) dx \quad \text{— удельная работа межфазных сил, которая при}$$

малых J_{ji} сводится к работе касательных напряжений на границе фаз;

a_{ki} — коэффициенты Кориолиса, учитывающие неравномерность распределения скорости фазы по радиусу трубы;

$$\rho_i \approx \frac{2\rho_{1i}\rho_{2i}}{\rho_{1i} + \rho_{2i}} \quad \text{— средняя на участке 1-2 плотность.}$$

В схеме с общим давлением фаз $P_i = P$.

Работа касательных напряжений на границе фаз P_{jix} может быть представлена в виде $P_{jix} = \tau_{ep} \cdot S_g$, где τ_{ep} — касательное напряжение на границе жидкости и газа, S_g — площадь межфазной поверхности выделенного объема.

Интеграл сохранения внутренней энергии для однотемпературной смеси ($T_i = T$) представлен в виде:

$$\sum_{i=1}^N G_{2i} (c_i T_2 + v_{g0}) = \sum_{i=1}^N G_{1i} (c_i T_1 + v_{g0}) + \sum_{i=1}^N G'_i (c_i T' + v_{g0}) + \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^N \rho_i v_i \right)}{\partial t} V + Q_{\text{вн}} + N_{\text{тр}},$$

где $G'_i = -\rho_i v_i^{(n)} S'$ — расход, подводимый через боковую поверхность;

$Q_{\text{вн}}$ — внешняя тепловая мощность;

$N_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} G$ — мощность трения;

$v_{g0} = l_{gl} + (c_l - c_{vg})(T - T_0) + \frac{P_0}{\rho_l^{(0)}} - \frac{P_0}{\rho_g^{(0)}}$ — константа, находящаяся из условий норми-

ровки при фазовых переходах $l \leftrightarrow g$ [3].

Замыкающие соотношения для расчета газожидкостных течений в скважинах и трубопроводах включают в себя: расчет фазового состояния углеводородной смеси, определение количественного соотношения равновесных концентраций паровой и жидкой фаз каждого из компонентов, расчет давления начала конденсации, расчет давления насыщения для различных фаз.

Для обеспечения необходимой точности расчета дебитов газоконденсатных скважин существенное значение имеет выбор адекватного уравнения состояния. В качестве уравнений состояния фаз использовались единые кубические уравнения состояния Соава-Редлиха-Квонга (SRK), Пенга-Робинсона (PR) и Брусилковского [1]. Данные уравнения состояния являются уравнениями состояния Ван-дер-Ваальсового типа и широко используются в задачах проектирования разработки и эксплуатации месторождений природных углеводородов. Эти уравнения являются частными формами четырехкоэффициентного уравнения состояния вида:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{(v + c)(v + d)},$$

где b, c, d — коэффициенты, постоянные для данного вещества. Коэффициент a зависит от температуры $a = a_c \varphi(T)$, где a_c — константа, φ — температурная функция, равная единице при критической температуре.

Структура коэффициентов уравнения состояния приведена в [1].

Использование уравнений состояния Ван-дер-Ваальсового типа для смесей основано на применении принципа соответственных состояний. При этом уравнения состояния смесей имеют тот же вид, что и для чистых веществ. Но если коэффициенты уравнения состояния чистого вещества определяются свойствами этого вещества, то коэффициенты уравнения состояния многокомпонентной системы определяются свойствами смеси, т.е. свойствами компонентов, образующих смесь, и долей каждого из них в смеси.

Для расчета фазового равновесия использовалось термодинамическое соотношение равенства летучести компонентов смеси. В теплофизических замыкающих соотношениях были использованы современные обобщенные опытные данные о коэффициентах вязкости, удельной теплоемкости и теплопроводности. Замыкающие соотношения для расчета газоконденсатной смеси применяются в виде [2].

При использовании уравнений состояния для многокомпонентных систем важнейшим моментом является то, по каким правилам вычисляются коэффициенты уравнения состояния. Для N — компонентной углеводородной смеси, согласно рекомендациям из [1], нами были приняты следующие правила для вычисления коэффициентов уравнения состояния:

$$a_{sm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j a_{ij}, \quad b_{sm} = \sum_{i=1}^N x_i b_i,$$

$$c_{sm} = \sum_{i=1}^N x_i c_i, \quad d_{sm} = \sum_{i=1}^N x_i d_i,$$

где a_{ij} — перекрестные коэффициенты для смеси, которые рассчитываются способом, предложенным Зудкевичем и Иоффе $a_{ij} = (1 - c_{ij})(a_i a_j)^{0.5}$.

Введение коэффициентов c_{ij} существенно повышает точность расчета парожидкостного равновесия с применением уравнения состояния. Значения коэффициентов c_{ij} для использованных нами уравнений состояния приведены в [1].

Описанная выше модель предусматривает вычисление параметров потока и критериальных параметров, характеризующих структуру газожидкостного потока (дисперсно-кольцевой / эмульсионный, переходный, пробковый, пузырьковый режим) в каждом расчетном сечении по высоте скважины. При этом подробно моделируются потери давления и теплообмен при дисперсно-кольцевом режиме течения, который характерен для течения газоконденсатного флюида по скважине.

На основе данной модели был разработан и реализован в среде MathCad алгоритм расчета течения газожидкостной смеси в газоконденсатной скважине. Алгоритм предусматривает автоматизированное определение структуры двухфазного потока, учитывает изменение соотношения отдельных компонентов

в фазах, диссипации энергии, теплообмена, изменение давления и температуры вдоль оси скважины, определение массового и объемного расходов газоконденсатной смеси на основе измерения давления и температуры на забое и давления и температуры на устье скважины с использованием программного блока расчета течения в скважине.

Блок данного программного комплекса, предназначенный для расчета плотности по уравнению Брусиловского [1], можно использовать в относительно простой по конструкции измерительно-вычислительной системе [5].

Блок-схема измерительно-вычислительной системы (ИВС) приведена на рисунке 1.

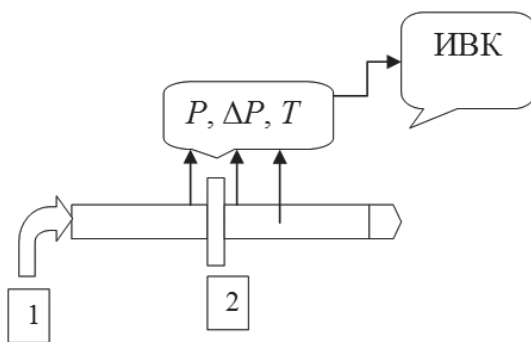


Рис. 1. Принципиальная схема измерительно-вычислительной системы (ИВС) [5] определения расхода газожидкостной смеси

Она состоит из штуцера (1), предназначенного для установления практически постоянного расхода в реальном диапазоне параметров; стандартной диафрагмы (2), с датчиками давления (P), перепада давления (ΔP) и температуры (T); ИВК — измерительно-вычислительный комплекс на базе компонентов фирмы «National Instruments» [6] и среды графического программирования LabVIEW 8.2. — для сбора показаний первичных датчиков, расчета плотности по уравнению состояния и обработки полученных данных. Неотъемлемым компонентом ИВС является программный комплекс, основанный на приведенной выше физико-математической модели течения и теплообмена в скважинах и трубопроводах.

Основные формулы, лежащие в основе измерения расхода при малых дозвуковых скоростях методом переменного перепада давления, имеют вид [5], [7]:

$$q_m = const * \sqrt{2\rho\Delta P}, \quad (1)$$

$$q_0 = const * \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (2)$$

где q_m и q_0 — массовый и объемный расходы соответственно, $const$ — практически постоянная величина в некотором диапазоне чисел Рейнольдса. Она зависит, в основном, от геометрических размеров стандартной диафрагмы. Величина $\Delta P = (P_2 - P_1)$ — перепад давления при прохождении потока через стандартную диафрагму; ρ — плотность смеси, рассчитанная по уравнению состояния [1], с учетом рассчитанного изменения давления и температуры смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брилл Дж. П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 384 с.
2. Саранчин Н.В. Тепломассоперенос при течении газожидкостных углеводородных сред в трубопроводных системах. Автореф. дисс. ... к. ф.-м. н. Тюмень, 2010. 21 с.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч I, II. М.: Наука, 1987. 824 с.
4. Антипов В.Н., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. и др. Техническая и параметрическая диагностика в трубопроводных системах. Тюмень: Вектор Бук, 2002. С. 432.
5. Вакулин А.А., Шабаров А.Б. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях. Новосибирск: Наука. Сиб. Издательская фирма РАН, 1998.
6. Вакулин А.А., Хамов Е.А. Экспериментальный стенд для изучения течения многофазных потоков при различных температурах. Вестник ТюмГУ. 2010. №6. С. 75-79.
7. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. Кн. 2. 5-е изд. перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004.