

УДК 622.279

А.А. Ротов, В.А. Истомина

Адаптация гидродинамических моделей газожидкостных потоков в трубопроводах промышленных газосборных систем

Ключевые слова: газосборная сеть, трубопровод, газожидкостной поток, моделирование, адаптация, гидравлическая эффективность.

Keywords: gas gathering system, pipe, gas-liquid flow, modeling, adjustment, flow efficiency.

В настоящее время математическое моделирование играет важную роль в обеспечении надежной и эффективной эксплуатации промышленных систем сбора продукции газовых и газоконденсатных скважин. Проводимые на основе разрабатываемых моделей прогнозные расчеты широко используются при проектировании разработки, обустройства и реконструкции месторождений и назначении эксплуатационных режимов работы. Надежность прогноза во многом определяется тем, насколько корректно математическая модель воспроизводит реальные эксплуатационные характеристики объекта. Поэтому при создании моделей отдельных промышленных систем (скважин, газосборных сетей, установок комплексной подготовки газа, дожимных компрессорных станций) или месторождения в целом особое внимание следует уделять стадии их адаптации. Адаптация моделей газосборных сетей осуществляется на основе сопоставления промышленной информации о фактических режимах работы трубопроводов с расчетами и последующим введением адаптационных параметров.

Для адаптации гидравлических расчетов к фактическим эксплуатационным характеристикам трубопроводов, транспортирующих однофазный газовый поток, обычно используется безразмерный коэффициент гидравлической эффективности E (*flow efficiency*). Этот коэффициент позволяет в значительной мере скомпенсировать отличие фактического коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода от его расчетного значения [1–3], обусловленное погрешностью определения шероховатости внутренней поверхности трубопровода и наличием дополнительных местных гидравлических сопротивлений различной природы (твердых отложений, очагов коррозии, деформированных участков и др.).

Коэффициент E определяется как отношение фактической производительности трубопровода (Q_ϕ), полученной на основе эксплуатационных данных, к ее расчетному значению при тех же термобарических условиях (Q_p):

$$E = \frac{Q_\phi}{Q_p} = \frac{Q_\phi}{\sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)F^2}{\lambda \frac{L}{d} zRT\rho_0^2}}}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 – давление в начале и в конце трубопровода; ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях; T – температура газа; z – коэффициент сжимаемости; R – газовая постоянная; L – протяженность трубопровода; F – площадь сечения трубопровода; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d – диаметр трубопровода. Коэффициент гидравлического сопротивления λ в (1) определяется на основе существующих корреляций [1, 4]. Иногда в литературе встречаются несколько отличающиеся от соотношения (1) определения коэффициента E , что в рамках данного рассмотрения не принципиально.

При известном значении коэффициента гидравлической эффективности расчет гидравлических потерь в трубопроводе при изотермическом течении газа проводится по формуле

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{1}{E^2} \lambda \frac{L}{d} \frac{zRT\rho_0^2}{F^2} Q^2. \quad (2)$$

Анализируя формулу (2), коэффициент гидравлической эффективности можно интерпретировать как отклонение расчетного гидравлического сопротивления трубопровода λ от его фактического значения λ_{ϕ} , наблюдаемого в процессе эксплуатации:

$$E^2 = \frac{\lambda}{\lambda_{\phi}}. \quad (3)$$

Таким образом, коэффициент E выступает в роли адаптационного параметра для модели стационарного потока газа в трубопроводе (2), учитывающего фактическое состояние трубопровода.

Следует отметить, что рассмотренный подход к адаптации модели хорошо зарекомендовал при описании фактических эксплуатационных режимов трубопроводов, транспортирующих чисто газовые потоки. Часто коэффициент гидравлической эффективности используется в качестве адаптационного параметра и при моделировании трубопроводов газосборных сетей. Однако работа газосборных сетей, как правило, проходит в условиях наличия жидкости (газового конденсата, капельной и конденсационной влаги) в составе транспортируемой продукции. Непосредственное применение данного подхода при моделировании газожидкостных потоков представляется не в полной мере оправданным. Необходима разработка более сложных адаптационных схем, учитывающих особенности гидродинамики двухфазных потоков.

При транспортировке газожидкостного потока, в том числе при малых содержаниях жидкости (на уровне нескольких грамм на кубический метр газа), на подъемных участках трубопровода может происходить ее накопление, приводящее к дополнительным потерям давления, что необходимо учитывать при определении пропускной способности и расчете гидравлических потерь. Объем накопленной жидкости зависит от уровня давления в трубопроводе, скорости потока, содержания жидкости. Следовательно, для газожидкостного потока значение гидравлической эффективности, определяемое по формуле (1), зависит не только от фактических гидравлических характеристик самого трубопровода, но и от термобарических и расходных условий его эксплуатации. Это обстоятельство значительно ограничивает возможности модели при проведении прогнозных расчетов.

В работах [5, 6] по гидравлическому расчету промышленных трубопроводов потери давления, возникающие за счет накопления жидкости в его полости, предлагается также учитывать за счет коэффициента E , но с использованием другой формулы для его определения:

$$E = \left(1 - 45,15 \frac{\beta^{0,32}}{w} \right)^{-1} \quad (4)$$

где β – объемное содержание жидкости в газе; w – средняя скорость течения газа в участке, м/с.

В качестве другого способа учета накопления жидкости при определении пропускной способности и гидравлических расчетах трубопровода в работах [6, 7] предлагается использование уравнений (1) и (2), но с заменой гидравлического сопротивления λ для движения чисто газового потока на $\lambda_{см}$, определяемое многопараметрической функцией

$$\lambda_{см} = \lambda(Re, \epsilon) \psi(\beta, Fr, \bar{\mu}), \quad (5)$$

где $\lambda(Re, \epsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления при движении потока; Re – число Рейнольдса; ϵ – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода; β – расходное содержание газа в потоке; $\bar{\mu}$ – относительная вязкость газовой и жидкостной составляющих потока; Fr – критерий Фруда смеси. Значение функции ψ определяется по номограммам, построенным для различных значений β , $\bar{\mu}$, Fr , или эмпирическим зависимостям.

Предлагаемые в литературе подходы к адаптации модели с использованием соотношений (4) и (5) обладают рядом существенных недостатков. Наличие жидкости в полости трубопровода учитывается только как коррекция коэффициента его гидравлического сопротивления в формуле (2). При движении газожидкостного потока может реализоваться пробковый режим течения, когда жидкость полностью перекрывает сечение трубопровода. В этом случае возникают дополнительные гидростатические потери давления, обусловленные весом накопленной на подъемных участках жидкости, которые не могут быть описаны уравнением (2). Кроме того, заменяя определение гидравлической эффективности по фактическим эксплуатационным данным на расчет по аналитическим зависимостям, мы утрачиваем одну из ее важнейших функций – функцию адаптационного параметра для

гидравлической модели конкретного промышленного трубопровода.

Таким образом, задача адаптации модели к реальным газосборным сетям месторождения, по мнению авторов, требует более полного и детального анализа. Ниже предлагается новый подход, основанный на раздельной адаптации модели гидравлического расчета по потерям на трение и гидростатическим потерям при рассмотрении двухфазных потоков в реальном трубопроводе за счет введения двух адаптационных параметров.

Пренебрегая силами инерции, уравнение движения газожидкостного потока в наклонном трубопроводе согласно [4, 7] может быть записано следующим образом:

$$-\frac{dP}{dl} = g\rho_{см} \sin \theta + \lambda_{см} \frac{\rho_{см} w_{см}^2}{2d}, \quad (6)$$

где P – давление в трубопроводе; l – расстояние вдоль оси трубопровода; g – ускорение свободного падения; θ – угол наклона трубопровода; $\lambda_{см}$ – коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода; d – диаметр трубопровода; $\rho_{см}$ – плотность газожидкостной смеси, определяемая по формуле $\rho_{см} = (\rho_{ж}\phi + \rho_{г}(1 - \phi))$, где ϕ – истинное содержание жидкости на рассматриваемом участке трубопровода. Для использования соотношения (6) необходимы замыкающие соотношения по $\lambda_{см}$ и ϕ от β (расходного содержания жидкости), зависимости по которым и включаются в математическую модель гидравлической системы.

Проанализируем гидравлическую характеристику трубопровода, определяемую уравнением (6). Общие потери давления в трубопроводе ΔP складываются из гидростатических потерь $\Delta P_{см}$ и потерь на трение $\Delta P_{тр}$ (первое и второе слагаемые в правой части уравнения соответственно), причем тенденции их изменения при варьировании расхода газожидкостной смеси противоположны (рис. 1). Так, при увеличении расхода смеси увеличивается скорость потока, и потери на трение возрастают. В то же время увеличение скорости потока способствует интенсификации выноса жидкости из полости трубопровода, уменьшению скоплений жидкости на подъемных участках и, соответственно, снижению гидростатических потерь. При снижении расхода смеси наблюдается обратная ситуация. Уменьшение скорости потока приводит к снижению потерь на трение, при этом ухудшаются условия выноса жидкости и гидростатическая составляющая потерь давления возрастает.

Предположим, имеются фактические данные о режиме работы трубопровода, транспортирующего газожидкостную смесь: состав жидкой и газовой фаз, расход газа, расходное влажосодержание, давление в начале и в конце трубопровода. Тогда на основе (6) и используемых в модели газожидкостного потока корреляций для $\lambda_{см}$ и ϕ можно провести гидравлический расчет трубопровода в аналогичных термобарических и расходных условиях эксплуатации, а затем оценить соотношение потерь на

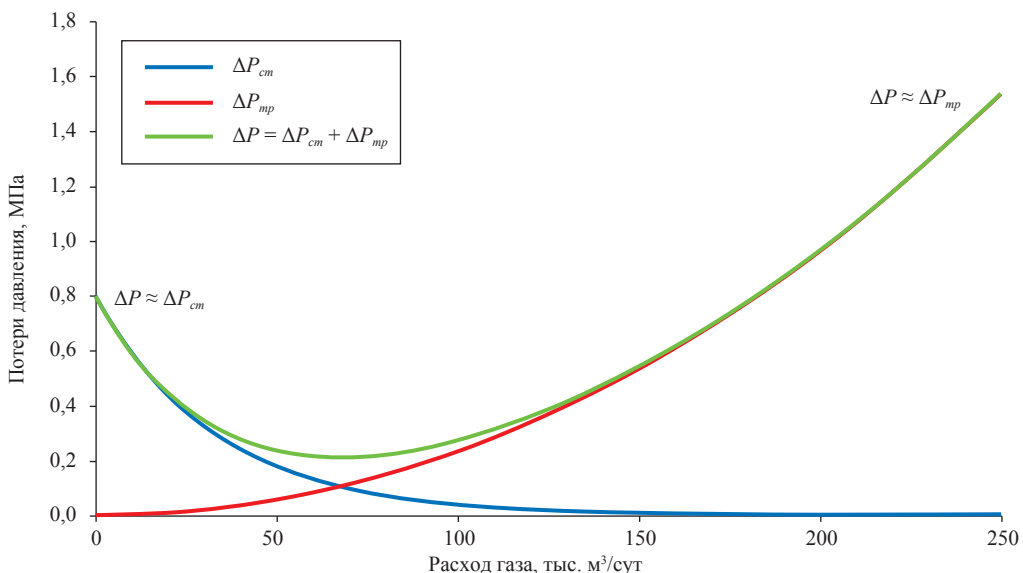


Рис. 1. Гидравлическая характеристика трубопровода при транспорте газожидкостного потока

трение ΔP_{mp} и гидростатических потерь ΔP_{cm} в данном режиме.

Пусть в результате расчета установлено, что в анализируемом режиме работы потери на трение ΔP_{mp} много больше гидростатических потерь ΔP_{cm} , тогда согласно (6):

$$\Delta P \approx \Delta P_{mp},$$

$$-\frac{dP}{dl} \approx \lambda_{cm} \frac{\rho_{cm} w_{cm}^2}{2d}. \quad (7)$$

В данном режиме зависимость потерь давления от скорости потока близка к зависимости, используемой для гидравлического расчета трубопроводов сухого газа. Следовательно, при $\Delta P_{mp} \gg \Delta P_{cm}$ можно на основе адаптационного соотношения (1) определить значение E через фактический и расчетный расходы газожидкостной смеси и затем использовать параметр E в качестве адаптационного для расчета потерь давления на трение (рис. 2).

С учетом проведенной адаптации модели по потерям на трение уравнение движения газожидкостного потока (6) принимает следующий вид:

$$-\frac{dP}{dL} = g\rho_{cm} \sin \theta + \frac{1}{E^2} \lambda_{cm} \frac{\rho_{cm} w_{cm}^2}{2d}. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим предельный случай, когда в анализируемом режиме работы гидравлической системы имеет место соотношение $\Delta P_{mp} \ll \Delta P_{cm}$. Тогда согласно (6) гидравличес-

кие потери в трубопроводе могут быть определены следующим образом:

$$\Delta P \approx \Delta P_{cm},$$

$$-\frac{dP}{dL} \approx g\rho_{cm} \sin \theta. \quad (9)$$

где $\rho_{cm} = (\rho_{ж}\phi + \rho_c(1 - \phi))$; ϕ – истинное содержание жидкости на рассматриваемом участке трубопровода.

Преобладание гидростатических потерь связано с накоплением жидкости на подъемных участках трубопровода. В условиях накопления жидкости плотность смеси будет определяться:

$$\rho_{cm} \approx \rho_{ж}\phi. \quad (10)$$

В общем случае ϕ представляет собой сложную функцию скорости потока, давления, наклона трубопровода и расходного содержания жидкости β . Проведенный анализ различных методик гидравлического расчета показал, что при накоплении жидкости на восходящих участках трубопроводов истинное содержание жидкости может быть аппроксимировано экспоненциальной функцией:

$$\phi = \exp(-B\sqrt{Fr_{cm}}), Fr_{cm} = \frac{w_{cm}^2}{gd}, \quad (11)$$

где B – безразмерный коэффициент, определяемый выбором конкретной методики гидравлического расчета.

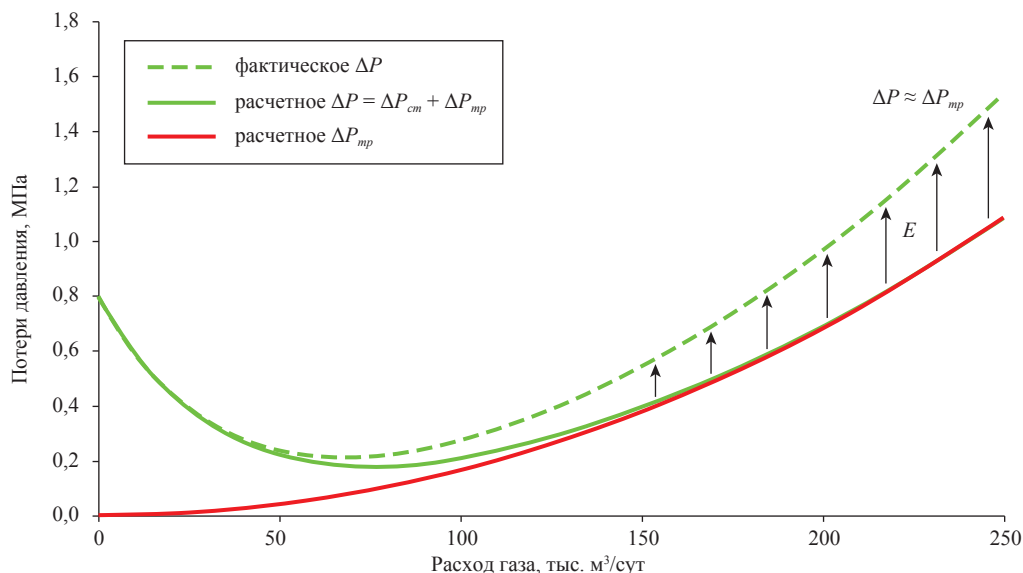


Рис. 2. Использование гидравлической эффективности для адаптации расчета потерь давления на трение

С учетом (10) и (11) гидростатические потери на подъемных участках рельефного трубопровода могут быть представлены в виде:

$$-\frac{dP}{dL} = \rho_{жс} \exp\left(-B \frac{w_{см}}{\sqrt{gd}}\right) g \sin \theta. \quad (12)$$

Интегрируя (12) по длине трубопровода, получаем:

$$\Delta P = \rho_{жс} g \exp\left(-B \frac{\bar{w}_{см}}{\sqrt{gd}}\right) \sum_j h_j, \quad (13)$$

где $\sum_j h_j$ – сумма высот подъемных участков; $\bar{w}_{см}$ – средняя скорость газожидкостного потока по длине трубопровода.

В полученной зависимости коэффициент B отражает специфику определения истинного содержания жидкости для определенной модели расчета гидростатических потерь. Введем второй адаптационный коэффициент K как отношение фактического значения B_ϕ и расчетного значения B_p , определяемого моделью:

$$K = \frac{B_\phi}{B_p}. \quad (14)$$

Таким образом, корректировку коэффициента B можно использовать для адаптации модели к фактическим эксплуатационным режимам при работе трубопровода в зоне преобладающих гидростатических потерь (рис. 3).

Выразив коэффициент B из (13) и переходя от скорости смеси \bar{w} к объемному расходу смеси Q , коэффициент K можно определить через соотношение фактических и расчетных показателей работы трубопровода по следующей формуле:

$$K = \frac{B_\phi}{B_p} = \frac{\frac{\sqrt{gd}}{\bar{w}_\phi} \ln\left(\frac{\rho_{жс} g \sum_j h_j}{\Delta P_\phi}\right)}{\frac{\sqrt{gd}}{\bar{w}_p} \ln\left(\frac{\rho_{жс} g \sum_j h_j}{\Delta P_p}\right)} = \frac{\bar{w}_p \left(\frac{\rho_{жс} g \sum_j h_j}{\Delta P_\phi}\right)}{\bar{w}_\phi \left(\frac{\rho_{жс} g \sum_j h_j}{\Delta P_p}\right)} = \frac{Q_p}{Q_\phi}, \quad (15)$$

где Q_ϕ – фактическая производительность трубопровода, полученная на основе эксплуатационных данных; Q_p – расчетная производительность, полученная при тех же термобарических условиях в результате моделирования.

Следовательно, определение гидростатических потерь давления с учетом адаптации может быть проведено по формуле:

$$-\frac{dP}{dL} = \rho_{жс} \exp\left(-KB \frac{w_{см}}{\sqrt{gd}}\right) g \sin \theta = \frac{\left[\rho_{жс} \exp\left(-B \frac{w_{см}}{\sqrt{gd}}\right)\right]^K}{\rho_{жс}^{K-1}} g \sin \theta = \frac{\rho_{жс}^K}{\rho_{жс}^{K-1}} g \sin \theta. \quad (16)$$

На основе (8) и (16) можно предложить обобщенный алгоритм определения адаптационных коэффициентов E и K для гидравлической модели газожидкостного потока по фактическим эксплуатационным данным о режимах работы трубопровода. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4. Рассмотрим его подробнее.

Пусть имеются фактические эксплуатационные данные о текущем режиме работы трубопровода ($P_1, P_2, Q_\phi, T_1, T_2$), где P_1 и T_1 – давление и температура транспортируемого потока в начале трубопровода, P_2 и T_2 – давление и температура транспортируемого потока в конце трубопровода; Q_ϕ – расход транспортируемой продукции.

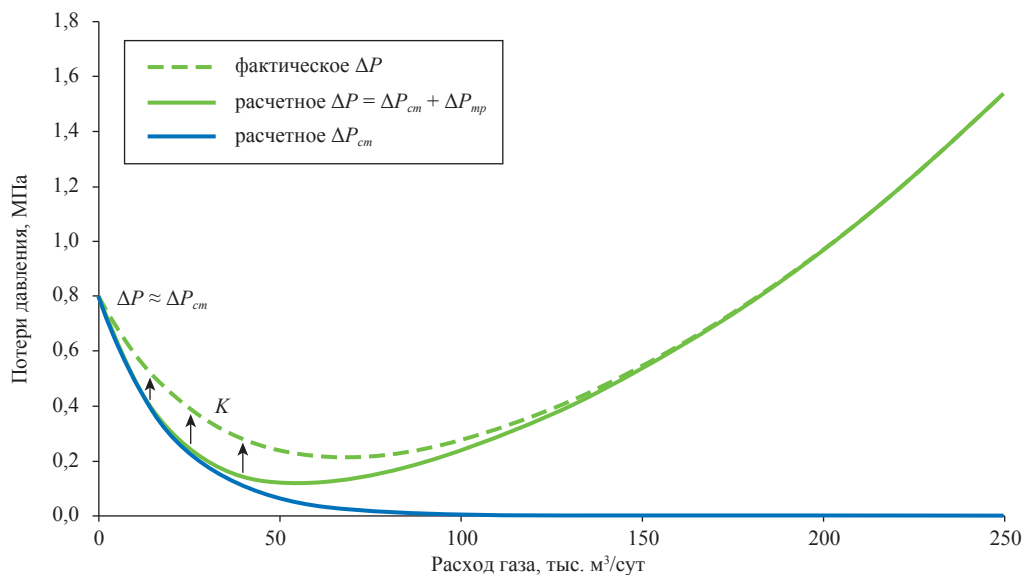


Рис. 3. Использование показателя гидростатических потерь K для адаптации расчета потерь давления на трение

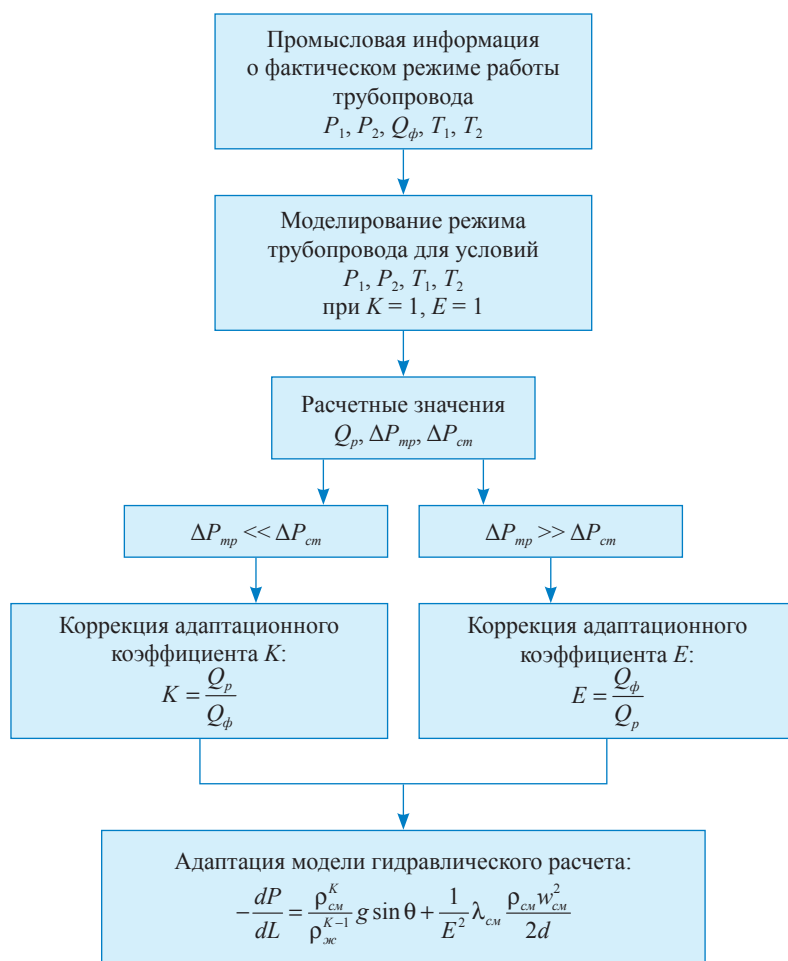


Рис. 4. Алгоритм определения адаптационных коэффициентов на основе фактических эксплуатационных данных для модели газожидкостного потока в трубопроводе

Проведем расчет режима работы трубопровода для фактических термобарических эксплуатационных условий (P_1, P_2, T_1, T_2) на основе имеющейся модели газожидкостного потока в трубопроводе в отсутствии адаптационных поправок ($K = 1, E = 1$). В результате будут определены расчетные потери давления на трение ΔP_{mp} , гидростатические потери ΔP_{cm} и расчетный расход Q_p .

Если на основании расчета установлено, что $\Delta P_{mp} \gg \Delta P_{cm}$, то данный режим позволяет скорректировать значение E по формуле (1). Если наблюдается обратная ситуация ($\Delta P_{mp} \ll \Delta P_{cm}$), то данный режим позволяет скорректировать показатель K по формуле (15).

В процессе эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений в трубопроводах газосборных сетей наблюдаются режимы как выноса, так и накопления жидкости. Как правило, в период постоянной добычи, сопровождающийся высокими отборами, жидкость выносятся из полости трубопроводов, и потери давления на трение являются определяющими. Период падающей добычи характеризуется снижением отборов и скоростей газа с соответствующим увеличением влияния гидростатических потерь. На этой стадии эксплуатации гидростатические потери в трубопроводах часто превосходят потери на трение в 100 и более раз. Аналогичные процессы чередования преобладающих потерь наблюдаются в связи с сезонной неравномерностью отбора газа на месторождениях. Эти особенности эксплуатации газосборных сетей могут быть использованы

для определения адаптационных коэффициентов K и E в моделях гидравлического расчета трубопроводов по предложенному алгоритму.

Для трубопроводов, эксплуатация которых характеризуется сопоставимыми значениями потерь давления на трение и гидростатических потерь, определение значений K и E может быть проведено на основе методов математической статистики [8]. Например, для имеющегося массива эксплуатационных режимов трубопровода при помощи метода наименьших квадратов можно определить такие значения K и E , которые обеспечат минимальное среднеквадратичное отклонение расчетных потерь давления от фактических.

Таким образом, общепринятые подходы, используемые при адаптации гидравлических моделей однофазных газовых потоков в трубопроводах, требуют существенной доработки для моделей газожидкостных потоков. Помимо традиционного коэффициента гидравлической эффективности целесообразно введение второго адаптационного коэффициента, характеризующего отклонение расчетных гидростатических потерь давления в трубопроводах от фактических.

На основе проведенных исследований разработана методика двухпараметрической адаптации математической модели газожидкостного потока и предложен алгоритм определения адаптационных параметров по фактическим эксплуатационным режимам работы трубопровода. Использование данного подхода позволяет расширить возможности адаптации моделей газосборных сетей и повысить достоверность производимых на их основе расчетов.

Список литературы

1. Ходанович И.Е. Транспорт природного газа / И.Е. Ходанович. – М.: Недра, 1967. – 364 с.
2. Маслов В.М. Концепции анализа и совершенствования техники и технологии промысловой подготовки и транспорта газа / В.М. Маслов. – Ташкент: Фан, 1997. – 656 с.
3. Сулейманов В.А. Анализ фактических режимов работы шлейфов газовых месторождений / В.А. Сулейманов, И.А. Гужов, А.В. Трифонов и др. // Разработка месторождений углеводородов: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – 476 с.
4. Марон В.И. Гидродинамика однофазных и многофазных потоков в трубопроводе / В.И. Марон. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 334 с.
5. Зубарев В.Г. Магистральные газонефтепроводы: учеб. пособие / В.Г. Зубарев. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1998. – 80 с.
6. Вяхирев Р.И. Теория и опыт добычи газа / Р.И. Вяхирев, Ю.П. Коротаев, Н.И. Кабанов. – М.: Недра, 1998. – 479 с.
7. Гриценко А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А.И. Гриценко, О.В. Клапчук, Ю.А. Харченко. – М.: Недра, 1994. – 238 с.
8. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 376 с.