

УДК 622.691.4:629.4.063.2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВЫНОСА СКОПЛЕНИЙ ЖИДКОСТИ ИЗ МНОГОНИТОЧНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПОТОКОМ ПЕРЕКАЧИВАЕМОГО ГАЗА

Коршак А.А., Усольцев М.Е.¹, Пшенин В.В.

*Санкт-Петербургский государственный горный университет,
г. Санкт-Петербург
e-mail: ¹ mikhail.us@gmail.com*

***Аннотация.** В статье проводится оценка возможности выноса скоплений жидкости потоком транспортируемого газа без применения механических устройств. Рассматривается возможность применения методики выноса скоплений, как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации многониточных систем транспорта газа.*

***Ключевые слова:** газопровод, скопления жидкости, пониженные участки, вынос скоплений, теоретические исследования*

Недостаточно качественная подготовка газа на промыслах, неполное удаление воды после гидроиспытаний и невыполнение работ по осушке приводит к накоплению жидкости в полости магистральных газопроводов. Основным методом борьбы со скоплениями жидкости является пропуск очистных устройств (ОУ). Однако их пропуск по магистральным газопроводам требует дополнительных капитальных вложений (в ОУ) и эксплуатационных затрат (на транспортировку ОУ к месту запуска, их восстановление т.д.). Авторами предлагается достаточно просто осуществимый метод выноса скоплений жидкости потоком перекачиваемого газа, основанный на отключении части параллельных «ниток» между перемычками с тем, чтобы увеличить расход газа в «нитках», оставшихся в работе.

В данной статье рассмотрены вопросы реализации предлагаемого метода как на уже эксплуатируемых многониточных системах транспорта газа, так и на вновь проектируемых газопроводах.

Пусть имеется многониточная система (принципиальная схема представлена на рис. 1) из n газопроводов длиной l , соединенных перемычками, находящихся друг от друга на расстоянии $l_{п}$. Начальное и конечное давление на рассматриваемом участке соответственно равны P_{H_0} и P_{K_0} , а пропускная способность системы составляет Q .

Предположим, что для выноса скоплений жидкости на участке, где они имеются, произвели отключение p ниток ($p < n$). Одновременно, для того, чтобы не произошло снижение пропускной способности системы магистральных газопроводов, начальное и конечное давление на рассматриваемом участке изменили соответственно до P_{H_1} и P_{K_1} .

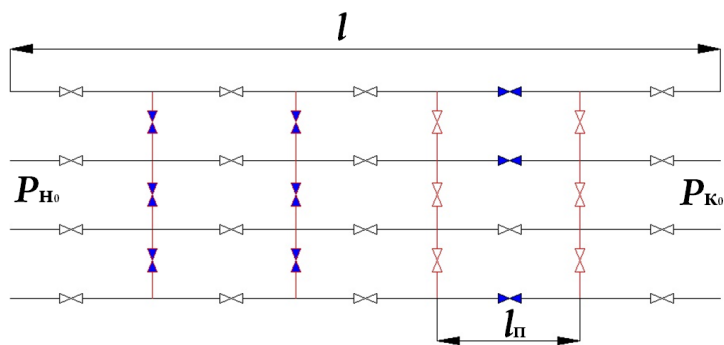


Рис. 1. Расчётная схема к задаче о выносе скоплений жидкости из газопровода

Увеличение расхода газа в «нитках», оставшихся в работе, составит

$$\chi = \frac{\frac{Q_0}{(n-p)}}{\frac{Q_0}{n}} = \frac{n}{n-p} = \frac{1}{1-\frac{p}{n}}, \quad (1)$$

результаты расчётов по формуле (1) приведены в табл. 1.

Таблица 1 Ожидаемый коэффициент увеличения производительности «ниток», оставшихся в работе

| p | Значение χ при n равном: | | | | |
|-----|---------------------------------|-----|------|------|-----|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 1,5 | 1,33 | 1,25 | 1,2 |
| 2 | - | 3 | 2 | 1,66 | 1,5 |
| 3 | - | - | 4 | 2,5 | 2 |
| 4 | - | - | - | 5 | 3 |
| 5 | - | - | - | - | 6 |

Из таблицы следует, что, если не учитывать технические ограничения на изменение давлений в начале и в конце участка многониточной системы газопроводов, то отключением части работающих ниток можно увеличить расход газа в трубопроводах, оставшихся в работе, в несколько раз. При этом величина коэффициента увеличения производительности пропорциональна отношению p/n .

Произведем оценку условий, при которых подобное увеличение производительности возможно.

До отключения части перемычек коммерческий расход многониточной системы газопроводов с идентичными параметрами перекачки составлял [1]

$$Q_0 = n \cdot K \cdot \sqrt{\frac{(P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2) \cdot D^5}{\lambda_0 \cdot Z_{cp_0} \cdot \Delta \cdot T_{cp_0} \cdot l}}, \quad (2)$$

где n – число ниток в многониточном газопроводе; K – коэффициент, зависящий

от размерности величин входящих в данное выражение, равный

$$K = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_{cp}}{P_{cp}} \sqrt{R_{возд}}. \quad (3)$$

При использовании смешанной системы единиц D (м), T (К), P (МПа), L (км), и Q (млн м³/сут) значение коэффициента K составляет $K = 105,087$;

P_H, P_K – соответственно давление в начале и конце участка газопровода;

D – внутренний диаметр газопровода;

Z_{cp} – среднее значение коэффициента сжимаемости газа;

Δ – относительная плотность по воздуху;

T_{cp} – среднее значение температуры газа в магистральном газопроводе;

l – длина участка газопровода между компрессорными станциями;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Если отключить p «ниток», изменив начальное и конечное давление до P_{H_1} и P_{K_1} , пропускная способность многониточной системы составит

$$Q_1 = K \cdot \sqrt{\frac{(P_{H_1}^2 - P_{K_1}^2) \cdot D^5}{\lambda_1 \cdot Z_{cp_1} \cdot \Delta \cdot T_{cp_1} \cdot l} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1 - \bar{l}_{II}}{n^2} + \frac{\bar{l}_{II}}{(n-p)^2} \right]}}, \quad (4)$$

где \bar{l}_{II} – относительное расстояние между переключками, $\bar{l}_{II} = l_{II} / l$.

Так как пропускная способность системы в целом после отключения p «ниток» не должна измениться, то $Q = Q_1$ и можем записать уравнение

$$n \cdot K \cdot \sqrt{\frac{(P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2) \cdot D^5}{\lambda_0 \cdot Z_{cp_0} \cdot \Delta \cdot T_{cp_0} \cdot l}} = K \cdot \sqrt{\frac{(P_{H_1}^2 - P_{K_1}^2) \cdot D^5}{\lambda_1 \cdot Z_{cp_1} \cdot \Delta \cdot T_{cp_1} \cdot l} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1 - \bar{l}_{II}}{n^2} + \frac{\bar{l}_{II}}{(n-p)^2} \right]}}, \quad (5)$$

откуда после сокращения одинаковых множителей и возведение обеих частей в квадрат получаем

$$n^2 \cdot \frac{P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2}{\lambda_0 \cdot Z_{cp_0} \cdot T_{cp_0}} = \frac{P_{H_1}^2 - P_{K_1}^2}{\lambda_1 \cdot Z_{cp_1} \cdot T_{cp_1}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1 - \bar{l}_{II}}{n^2} + \frac{\bar{l}_{II}}{(n-p)^2} \right]}. \quad (6)$$

На этапе эксплуатации системы магистральных газопроводов уравнение (6) решается относительно допустимого числа отключаемых «ниток»:

$$\frac{[p]}{n} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{l_{II}} \cdot \left[\frac{[P_H]^2 - P_{K_0}^2}{A \cdot (P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2)} - 1 \right]}}, \quad (7)$$

где A – безразмерный коэффициент:

$$A = \frac{Z_{cp_1} \cdot T_{cp_1} \cdot \lambda_1}{Z_{cp_0} \cdot T_{cp_0} \cdot \lambda_0}. \quad (8)$$

Поскольку в магистральных газопроводах режим течения газа обычно квадратичный, то изменением коэффициента гидравлического сопротивления можно пренебречь, и тогда формула для безразмерного коэффициента A запишется следующим образом:

$$A = \frac{Z_{cp_1} \cdot T_{cp_1}}{Z_{cp_0} \cdot T_{cp_0}}. \quad (9)$$

На этапе проектирования системы магистральных газопроводов уравнение (6) решается относительно допустимого относительного расстояния между перемычками, что дает

$$\bar{l}_{II} = \frac{1}{\left[\left(\frac{n}{n-p} \right)^2 - 1 \right]} \cdot \left[\frac{[P_H]^2 - P_{K_0}^2}{A \cdot (P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2)} - 1 \right]. \quad (10)$$

Прежде, чем выполнить расчеты по формулам (7), (10), необходимо установить характер изменения безразмерного коэффициента A , описываемого формулой (8). Однако аналитический путь его определения наталкивается на значительные сложности.

Проанализируем отношения параметров, которые входят в безразмерный коэффициент A . Начнем с определения отношения средних температур до и после отключения «ниток». Рассмотрим изменение температуры по длине многониточного газопровода с отключенными «нитками».

Известно [2], что распределение температуры по длине магистрального газопровода описывается формулой

$$T(x) = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-ax} - A_{cp} (1 - e^{-ax}), \quad (11)$$

где T_0 – температура окружающей среды; T_H – температура в начальной точке; a – расчётный коэффициент

$$a = \frac{K_{cp} \cdot \pi D}{G \cdot c_p}; \quad (12)$$

K_{cp} – средний на участке полный коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду; G – массовый расход газа; c_p – средняя изобарная теплоёмкость газа; x – координата сечения, в котором определяется температура; A_{cp} – расчётный коэффициент равный

$$A_{cp} = D_i \cdot \frac{P_H^2 - P_K^2}{2 \cdot a \cdot l \cdot P_{cp}}; \quad (13)$$

D_i – коэффициент Джоуля-Томсона; P_{cp} – среднее значение давления.

Обозначим расстояние от начала участка до первой перемычки на отключенных «нитках» через l_1 , а коэффициент увеличения расхода газа в «нитках», оставшихся в работе через χ . Тогда температура газа в данной перемычке составит

$$T(l_1) = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-a \cdot l_1} - A_{cp} (1 - e^{-a \cdot l_1}). \quad (14)$$

Температура газа в конце участка с отключенными «нитками» в соответствии с (11) равна

$$T(l_1+l_{II})=T_0+[T(l_1)-T_0]\cdot e^{-\frac{a}{\chi}\cdot l_{II}}-A_{cp}\left(1-e^{-\frac{a}{\chi}\cdot l_{II}}\right), \quad (15)$$

подставляя (14) в (15), после ряда алгебраических преобразований получаем

$$T(l_1+l_{II})=T_0+[T_H-T_0]\cdot e^{-a\left(l_1+\frac{l_{II}}{\chi}\right)}-A_{cp}\left[1-e^{-a\left(l_1+\frac{l_{II}}{\chi}\right)}\right]. \quad (16)$$

Величина $l_1+\frac{l_{II}}{\chi}$ в формуле (16) является приведённым (с учётом увеличения расхода газа) расстоянием от начала до конца участка с отключёнными пере-
мычками.

Для участка с отключенными перемычками, по аналогии, можно записать

$$T(l)=T_0+[T(l_1+l_{II})-T_0]\cdot e^{-a(l-l_1-l_{II})}-A_{cp}\left[1-e^{-a(l-l_1-l_{II})}\right]. \quad (17)$$

С учётом (16) эта формула может быть представлена в виде

$$T(l)=T_0+(T_H-T_0)\cdot e^{-a\left[l-l_{II}\left(1-\frac{1}{x}\right)\right]}-A_{cp}\left\{1-e^{-a\left[l-l_{II}\left(1-\frac{1}{x}\right)\right]}\right\}, \quad (18)$$

или

$$T(l)=T_0+(T_H-T_0)\cdot e^{-Шу\left[1-\bar{l}_{II}\left(1-\frac{1}{x}\right)\right]}-A_{cp}\left\{1-e^{-Шу\left[1-\bar{l}_{II}\left(1-\frac{1}{x}\right)\right]}\right\}, \quad (19)$$

где $Шу$ – число Шухова для одной «нитки» многониточной системы газопроводов без перемычек.

Из формулы (19) видно, что место размещения отключённых перемычек на конечную температуру газа не влияет.

Средняя температура газа в участке газопровода со всеми работающими «нитками» описывается формулой [2]:

$$T_{cp_0}=T_0+(T_H-T_0)\cdot \frac{1-e^{-Шу_0}}{Шу_0}-A_{cp_0}\left(1-\frac{1-e^{-Шу_0}}{Шу_0}\right), \quad (20)$$

где A_{cp_0} – величина коэффициента A_{cp} до отключения «ниток»:

$$A_{cp_0}=D_{i_0}\frac{P_{H_0}^2-P_{K_0}^2}{2\cdot Шу_0\cdot P_{cp_0}}. \quad (21)$$

По аналогии для участка газопровода с отключёнными «нитками»

$$T_{cp_1}=T_0+(T_H-T_0)\cdot \frac{1-e^{-Шу_1}}{Шу_1}-A_{cp_1}\left(1-\frac{1-e^{-Шу_1}}{Шу_1}\right), \quad (22)$$

где $Шу_1$ – число Шухова для газопровода с отключенными «нитками»:

$$Шу_1=Шу_0\left[1-\bar{l}_{II}\left(1-\frac{1}{x}\right)\right] \quad (23)$$

A_{cp_1} – величина коэффициента A_{cp} в этом же случае

$$A_{cp_1}=D_{i_1}\frac{P_{H_1}^2-P_{K_1}^2}{2\cdot Шу_1\cdot P_{cp_1}}. \quad (24)$$

Выражаем отношение средних на участке температур до и после отключения «ниток», получаем

$$\frac{T_{cp_1}}{T_{cp_0}} = \frac{T_0 + (T_H - T_0) \cdot \frac{1 - e^{-\text{Ш}y_1}}{\text{Ш}y_1} - A_{cp_1} \left(1 - \frac{1 - e^{-\text{Ш}y_1}}{\text{Ш}y_1} \right)}{T_0 + (T_H - T_0) \cdot \frac{1 - e^{-\text{Ш}y_0}}{\text{Ш}y_0} - A_{cp_0} \left(1 - \frac{1 - e^{-\text{Ш}y_0}}{\text{Ш}y_0} \right)} \quad (25)$$

Коэффициент сжимаемости природных газов Z , псевдокритические давление $P_{нк}$ и температуру $T_{нк}$, коэффициент гидравлического сопротивления λ вычисляют по известным формулам [3].

К сожалению, теоретический анализ величины безразмерного коэффициента A сильно затруднён. Соответственно нельзя сделать однозначные выводы о характере его изменения, т.к. его величина сложным образом зависит от средней температуры перекачки и среднего давления на участке. Поэтому единственно возможным методом обоснования допущений об изменении величины коэффициента A остаётся прямой расчёт на основе вычислительного эксперимента.

С учётом формул (4), (19) математическая модель участка многониточного газопровода с частично отключёнными «нитками», между перемычками, может быть описана системой уравнений:

$$\begin{cases} P_k = \sqrt{P_H^2 - Z_{cp_1} \cdot \Delta \cdot T_{cp_1} \cdot l \cdot \frac{Q^2}{\lambda \cdot K^2 \cdot D^{5,2}} \cdot \left[\frac{1 - \bar{T}_\Pi}{n^2} + \frac{\bar{T}_\Pi}{(n-p)^2} \right]}, \\ T_{cp} = T_0 + (T_H - T_0) \cdot \frac{1 - e^{-\text{Ш}y_1}}{\text{Ш}y_1} - A_{cp_1} \left(1 - \frac{1 - e^{-\text{Ш}y_1}}{\text{Ш}y_1} \right) \end{cases}, \quad (26)$$

которая замыкается формулами, описывающими изменение параметров Z_{cp_1} , K , D_i , и $\text{Ш}y_1$. В данной системе 13 независимых переменных:

$$P_H, \Delta, P_{нк}, T_{нк}, l, Q, D, \bar{T}_\Pi, n, p, T_H, T_0, \text{Ш}y_0.$$

Для проведения вычислительного эксперимента по численной оценке безразмерного параметра A авторами предложен алгоритм, составленный на основе встроенного программного кода математического пакета «Maple 14». Кроме того, основная его часть пригодна для теплогидравлического расчета многониточных газопроводов в полном соответствии с имеющейся нормативно-технической документацией.

Работу алгоритма можно описать следующим образом:

1. Открывается цикл, рассчитанный на большое количество шагов (1 тысяча). Большое количество шагов циклов продиктовано тем, что чем больше данных будет получено, тем точнее будет результат их последующей статистической обработки. Из практики применения расчетного алгоритма видно, что начиная с тысячи шагов результаты статистической обработки почти полностью совпадают, поэтому нет нужды в увеличении количества повторений цикла.

2. В определенных пределах генерируются случайным образом начальные данные для газопровода, такие как $P_H, \Delta, P_{ПК}, T_{ПК}, l, Q, D, \bar{l}_П, n, p, T_H, T_0, Шу_0$. Значения этих параметров приведены в табл. 2. Здесь важно заметить следующее – случайными задаются все начальные параметры, участвующие в построении математической модели, даже такие, как компонентный состав газа, таким образом достигается всесторонняя оценка воздействия всех величин на безразмерный параметр A во всех возможных случаях.

Таблица 2. Пределы изменения параметров

| Параметр | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Начальное давление P_H , МПа | 1,2 – 10 |
| Относительная плотность газа по воздуху Δ | 0,55 – 0,6 |
| Псевдокритическое давление $P_{ПК}$, МПа | 4,54 |
| Псевдокритическая температура $T_{ПК}$, К | 193 |
| Длина газопровода l , км | 80 – 140 |
| Коммерческий расход газа Q , млн м ³ /сут | 12 – 91 |
| Диаметр газопровода D , мм | 720 – 1420 |
| Относительное расстояние между перемычками $\bar{l}_П$ | 0,05 – 0,25 |
| Число «ниток» магистрального газопровода, n | 2 – 6 |
| Число отключаемых «ниток», p | 1 – 5 |
| Начальная температура T_H , К | 303 – 313 |
| Температура окружающей среды T_0 , К | 270 – 280 |
| Число Шухова, $Шу_0$ | 0,1 – 1 |

3. Проверяется корректность полученных случайных данных, происходит отсев заведомо несуществующих на практике вариантов (очевидно, например, что на практике по газопроводу большого диаметра не может перекачиваться газ с низких расходом или что малому перепаду давлений будет соответствовать высокий расход газа).

4. Последовательно выполняются теплогидравлические расчеты для случая со всеми работающими «нитками» и для случая с отключенными «нитками». Теплогидравлический расчет основан на численном решении системы нелинейных уравнений.

5. После выполнения теплогидравлического расчета, исходя из двух полученных решений, вычисляются значения параметров входящих в безразмерный коэффициент A для случаев – до и после отключения «ниток».

6. Вычисляется искомый коэффициент A . Значение коэффициента A , а также начальные параметры, при которых он был получен, записываются в файл базы данных для последующей статистической обработки.

7. Происходит возврат программы к началу и запуск следующего шага цикла. При этом все параметры обнуляются, чтобы не вызвать случайной записи старых данных поверх новых.

Статистический анализ данных был произведен в программе Statistica 8.0. В нашем случае, при анализе данных по безразмерному коэффициенту A , были подсчитаны такие статистические характеристики как максимальное значение, минимальное значение, среднее значение, среднеквадратичное отклонение и др.

Были визуализированы гистограммы значений (рис. 2) и графики нормального распределения (рис. 3), а также график отклонения имеющихся значений от нормального распределения (рис. 4).

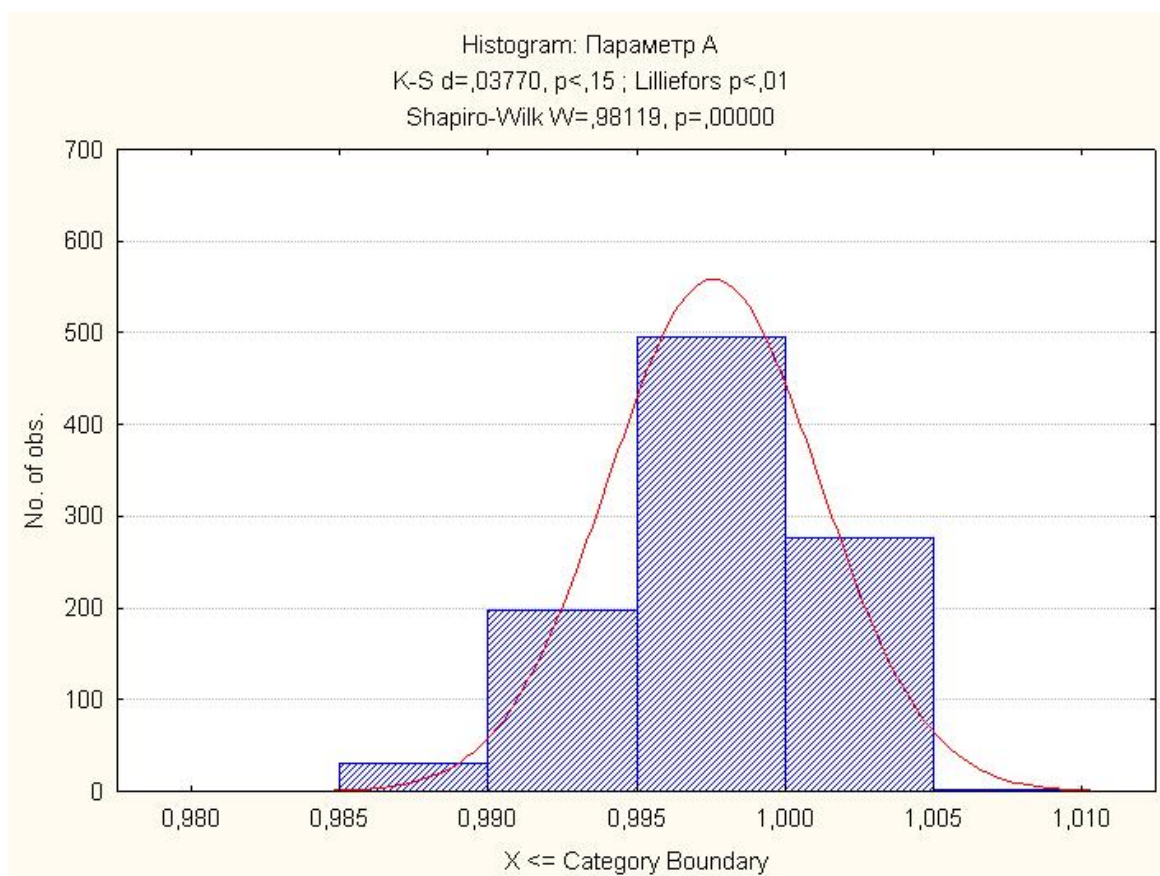


Рис. 2. Гистограмма результатов и нормальное распределение (для сравнения)

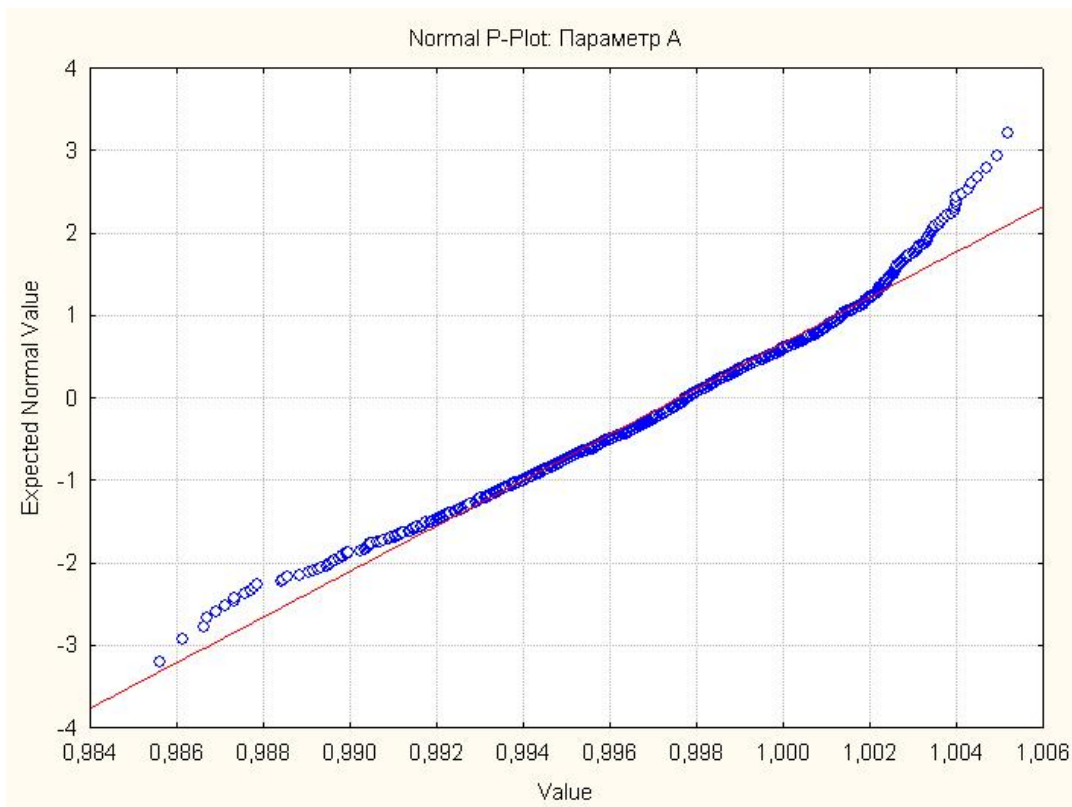


Рис. 3. Сравнение с нормальным распределением с помощью прямой

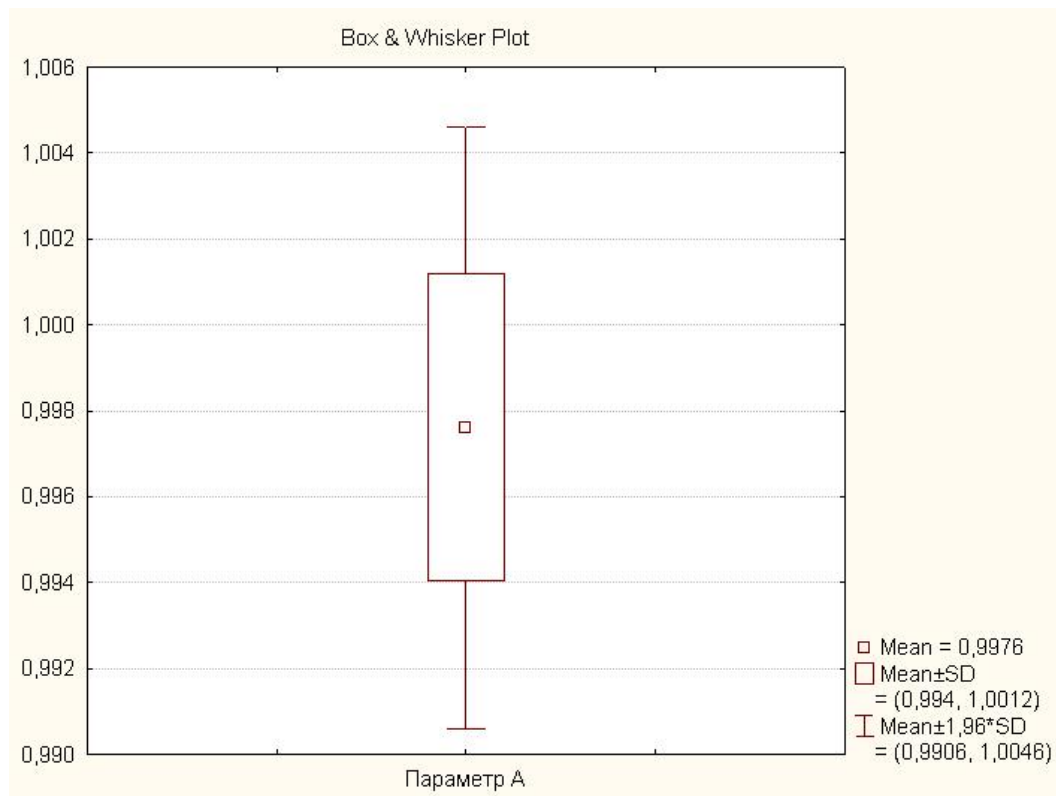


Рис. 4. Диаграмма размаха

Статистический анализ данных показал, что коэффициент A чрезвычайно близок к 1 и его среднее значение составляет 0,9976. Отсюда можно заключить, что с пренебрежимо малой для инженерных расчетов погрешностью можно принять коэффициент A равным 1 или что тоже самое:

$$Z_{cp_0} \cdot T_{cp_0} \cdot \lambda_0 \approx Z_{cp_1} \cdot T_{cp_1} \cdot \lambda_1. \quad (27)$$

Если предположить что режим течения в магистральном газопроводе квадратичный, то:

$$Z_{cp_0} \cdot T_{cp_0} \approx Z_{cp_1} \cdot T_{cp_1}. \quad (28)$$

Необходимо отметить тот факт, что подобные соображения относительно изменения значения произведения среднего коэффициента сжимаемости на среднюю температуру перекачки можно использовать в других схожих задачах, например, в задаче об увеличении производительности путем увеличения числа компрессорных станций и др. Ранее подобные рассуждения не имели под собой достаточного обоснования.

Приняв коэффициент A равным 1, вернувшись к формулам (7) и (10), можно записать их в следующем виде.

На этапе эксплуатации системы магистральных газопроводов уравнение решается относительно допустимого числа отключаемых «ниток»:

$$\frac{[p]}{n} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{l_{II}} \cdot \left[\frac{[P_H]^2 - P_{K_0}^2}{(P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2)} - 1 \right]}}. \quad (29)$$

На этапе проектирования системы магистральных газопроводов уравнение решается относительно допустимого относительного расстояния между перемычками, что дает:

$$\bar{l}_{II} = \frac{1}{\left[\left(\frac{n}{n-p} \right)^2 - 1 \right]} \cdot \left[\frac{[P_H]^2 - P_{K_0}^2}{(P_{H_0}^2 - P_{K_0}^2)} - 1 \right]. \quad (30)$$

Данные формулы удобно применять на практике, для решения соответствующих задач. Итогом работы стало то, что безразмерный коэффициент A из них исключен, что существенно упрощает их использование, при этом не приводя к потере точности. Также стоит заметить, что расчеты по приведенным выше формулам носят оценочный характер, поэтому усреднение коэффициента A оправдано.

Применение предлагаемой методики на многониточных системах транспорта газа, не оснащенных камерами запуска и приёма ОУ, позволит решить проблему удаления жидкостных скоплений без использования механических методов. Учёт методики при проектировании позволит существенно снизить затраты на очистку газопроводов в последующем.

Литература

1. Коршак А.А., Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: Учебник для вузов. СПб: Недра, 2008. 488 с.
2. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных-газопроводов: утв. ОАО «Газпром» 30.12.2005: введ. в действие с 30.12.2005. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2006. 196 с.
3. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.

THEORETICAL PRINCIPLES OF THE FLUID ACCUMULATIONS REMOVAL BY GAS FLOW METHOD IN MULTI GAS PIPELINE

A.A. Korshak, M.E. Usoltsev¹, V.V. Pshenin

Saint-Petersburg State Mining University, Saint-Petersburg, Russia

e-mail: ¹mikhail.us@gmail.com

Abstract. *Based on analyzes of dynamic accumulation process liquid removal possibility without using of any mechanical devices is proposed. A calculation method of the gas flow mode providing removal of liquid from the lower areas of pipeline is suggested. Possibility of using this method in designing and exploitation of pipelines is proved.*

Keywords: *gas pipelines, liquid accumulation, lower area, removal accumulations, theoretical investigation*

References

1. Korshak A.A., Nechval' A.M. Proektirovanie i ekspluatatsiya gazonefteprovodov: Uchebnik dlya vuzov (Design and operation of oil and gas pipelines. Textbook). SPb., Nedra, 2008. 488 p.
2. STO Gazprom 2-3.5-051-2006 Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya magistral'nykh gazoprovodov (Technological design standards of main gas pipelines). Approv. by Gazprom 30.12.2005. Moscow, "IRC Gazprom", 2006. 196 p.
3. GOST 30319.1-96. Gaz prirodnyi. Metody rascheta fizicheskikh svoistv. Opredelenie fizicheskikh svoistv prirodnogo gaza, ego komponentov i produktov ego pererabotki (Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Definition of physical properties of natural gas, its components and processing products).