

## АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГАЗОПРОВОДА ПРИ РАЗВИТОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

Р.И. Хуррамов, доцент

Ташкентский фармацевтический институт  
(Узбекистан, г. Ташкент)

DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11014

**Аннотация.** В статье рассматриваются изучению газодинамического состояния линейного участка газопровода и разработке алгоритма расчета статического режима функционирования гидравлической сети. Данное решение учитывает все силовые факторы при постоянном уклоне трассы газопровода. Вычислительными экспериментами установлены три режима течения газа по трубе с подъемом вверх, с малым уклоном вниз и с большим уклоном также вниз. Граница между последними двумя режимами течения в гидравлике несжимаемой жидкости известна под названием “перевальной точки”.

**Ключевые слова:** газопровод, статический режим, силовые факторы, уклон, трассы, с подъемом вверх, с малым уклоном вниз, перевальной точки.

Для гидравлического расчета магистральных газопроводов разными авторами [1-13] предложены различные формулы, которые получены на основе приведенных выше уравнений при изотермическом режиме движения газа по линейным участкам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{\rho dx} + g \frac{dy}{dx} + \frac{\lambda w^2}{2D} + a \frac{d w^2}{dx} = 0 \\ M = \rho w S, \quad P = Z \rho R T \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь в развитом турбулентном режиме течения  $\lambda = 0,11(k/D)^{0,25}$ ;  $a$  – постоянные и ( $a = 1,1$ ).

Значение плотности, определенное из уравнения состояния реального газа (из третьего уравнения системы), вставляется в первое и второе уравнения (1.10). Из вновь полученного второго уравнения определяется значение скорости и вставляется во вновь полученное первое уравнение. Таким образом, получается обыкновенное дифференциальное уравнение [14].

$$\frac{dP}{dx} (P^2 - A) + GP^3 + \Lambda P = 0, \quad (2)$$

где  $A = \frac{aZRTM^2}{S^2}$ ,  $G = \frac{g}{ZRT} \frac{dy}{dx}$ ;  $\Lambda = \frac{\lambda ZRTM^2}{2DS^2}$  – постоянные.

Перепишав уравнение (2) в разделенном по переменным виде, получим

$$\frac{P^2 - A}{GP^3 + \Lambda P} dP = dx. \quad (3)$$

Интегрируем левую сторону по  $P$ , а правую сторону по  $X$ . Для интегрирования левой стороны используем метод неизвестных коэффициентов и получим решение

$$\frac{AG}{\Lambda} \ln \frac{P}{P_0} - \frac{AG + \Lambda}{2G\Lambda} \ln \frac{GP^2 + \Lambda}{GP_0^2 + \Lambda} = x, \quad (4)$$

где  $P_0$  – значение давления на входе в рассчитываемый участок.

Подобное, но относительно  $w^2$ , решение системы (2) приведено в [3]. Общим недостатком обоих решений является то, что она не позволяют получить явную зависимость давления от координаты  $X$  в целом виде (кроме отдельных случаев нулевых значений коэффициентов) и проследить за изменением давления в зависимости от каждого коэффициента из списка  $A, G$  и  $\Lambda$ .

Вернемся к уравнению (3) и интегрируем его численным методом.

Интегрирование проведем по методу трапеций с постоянным шагом  $\Delta P$  по формуле

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1} = \frac{\Delta P}{2}(f_i + f_{i-1}),$$

где 
$$f_i = \frac{A - P_i^2}{GP_i^3 + \Lambda P_i}.$$

После того как вычислено значение  $\Delta x_i$ , вычислялись значения отдельных членов уравнения движения из (1).

Вычислительные эксперименты проводились при следующих данных:  $P_0 = 5,6 \cdot 10^6, 4,0 \cdot 10^6, 2,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ,  $dy/dx = 0; 0,1; -0,01$ ; и при постоянных  $D = 1,02 \text{ м}$ ,  $ZRT = 150000 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ,  $w_0 = 10 \text{ м/с}$  и  $\lambda = 0,018$  до достижения  $P = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Результаты вычислительных экспериментов и их анализ при различных условиях функционирования магистрального газопровода подробно изложены в работах [11, 14].

Изменения давления и среднерасходной скорости в горизонтальном газопроводе типичны, которые приведены в учебниках. Вниз по потоку становятся более интенсивными увеличение скорости и уменьшение давления. При положительном уклоне трассы часть энергии теряется на подъем газа, в связи с чем давление падает быстрее; и наоборот, при спуске трассы благодаря силе тяжести уменьшается перепад давления.

Характер изменения абсолютного значения первого члена уравнения движения аналогичен характеру изменения среднерасходной скорости. В зависимости от значения параметра  $dy/dx$  распределение энергии перестраивается.

Для случая  $dy/dx = 0,1$  на начальном участке доля силы тяжести больше на 4% чем доля силы сопротивления. Увеличение абсолютной величины члена  $\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}$  вниз

по потоку обусловлено увеличением среднерасходной скорости  $W$ . Доля силы тяжести снижается от 52% в начале до 4% на расстоянии 54 км, хотя значение слагаемого  $\rho dy/dx$  остается постоянным вниз по течению. Удивительно также, что доля слагаемого  $a \frac{d w^2}{dx 2}$  растет вниз по течению. Но несмотря на увеличение среднерасходной скорости более чем в 5,6 раза

доля этого слагаемого не превышает 3-4% от энергии перепада давления.

При  $dy/dx = -0,01$  на начальном участке 12% энергии, затраченной на преодоление силы сопротивления, компенсируется силой тяжести. В дальнейшем этот показатель уменьшается до 2% при достижении давлением значения  $10^6 \text{ Па}$ .

В этом случае также доля изменения скорости растет вниз по потоку, но не превышает 2,5% от энергии, затраченной на потери напора.

Расчеты велись, как уже заметили, до достижения давлением значения  $10^6 \text{ Па}$ . Соответствующие этому расстояния составляли при  $dy/dx = 0,1$  - 54 км, при  $dy/dx = 0$  - 82 км, а при  $dy/dx = -0,01$  - 87 км.

Попытка определить постоянное значение  $dy/dx$ , при котором обеспечивается течение с постоянной скоростью газа без участия нагнетателя, не увенчалась успехом.

Разработанная программа была также использована при изучении закономерностей потока и доли слагающих уравнения движения при постоянном линейном (массовом) отборе газа из МГ. При этом в уравнениях и обозначениях (кроме решения (4)) следует принять

$$M(x) = M_0 - mx = M_0(1 - \beta x).$$

Здесь  $M_0$  - значение массового расхода в начале участка;  $m, \beta$  - действительная ( $\text{кг м}^{-1}\text{с}^{-1}$ ) и приведенная ( $\text{м}^{-1}$ ) относительно  $M_0$  интенсивность линейного отбора газа. Это значит, что если длина участка составляет  $\beta^{-1}$ , то рассматривается тупиковый участок, а если она меньше чем  $\beta^{-1}$ , то транзитный расход газа через участок составляет  $M_i = M_0 - mx$ .

В случае путевого отбора коэффициенты  $A$  и  $\Lambda$ , использованные в уравнении (4), становятся переменными. Расчеты показали, что при  $dy/dx = 0$  и

$\beta = 1/20000\text{м}^{-1}$  имеет место практически линейное падение среднерасходной скорости. Интенсивность падения давления на тупиковом участке меньше, чем в случае постоянного расхода. То есть с уменьшением массы переносимой среды сила сопротивления падает (до нуля), притом кривая более пологая в конце участка. Доля изменения скорости не превышает 1%. Изменения основных показателей потока и слагающих уравнения движения при  $dy/dx = -0,01$  и  $\beta = 1/20000\text{м}^{-1}$  приведены на рис 1.1.-1.3.

В отличие от кривых скорости для горизонтальных МГ, в обсуждаемом

случае среднерасходная скорость сначала (до 10км) растет (до 2%) и далее

убывает. Сила сопротивления и доля первого члена монотонно падают, а доля силы тяжести растет. Кривая давления в этом случае вогнутая, в то время как в обычных расчетах (при  $dy/dx = 0$  и  $\beta = 0\text{м}^{-1}$ ) она выпуклая.

Общей чертой численных результатов, полученных для тупиковых МГ, является немонотонное изменение результатов в конечной части пути. Причиной тому является неучет изменения режима течения и температуры газа. Известно, что при изменении среднерасходной скорости значение коэффициента сопротивления, в целом, становится переменным, а при замет-

ном изменении температуры следует учитывать эффект Джоуля-Томсона.

Таким образом, изучение факторов уравнения движения сжимаемой среды в газопроводах при развитом турбулентном режиме обтекания шероховатости показало, что:

– при отсутствии путевого отбора и малых значениях параметра  $dy/dx$  основная энергия нагнетателей тратится на преодоление силы трения, которая растет вниз по течению;

– несмотря на постоянное значение  $\rho dy/dx$  в случаях постоянного расхода доля силы тяжести убывает вниз по потоку, а при путевого отборе доля силы тяжести растет;

– вниз по течению доля изменения скорости в энергетическом балансе растет и в рамках проведенных расчетов не превышает 3-4%, что является основанием для пренебрежения этим фактором при проведении гидравлических расчетов (при постоянном расходе по пути из решения (4) следуют известные для расчета магистральных газопроводов формулы [3, 10];

– при путевого отборе газа из МГ среднерасходная скорость и давление вниз по потоку уменьшаются: при большем отборе падение их значений более интенсивно;

– кривая давления при путевого отборе может иметь вогнутую форму.

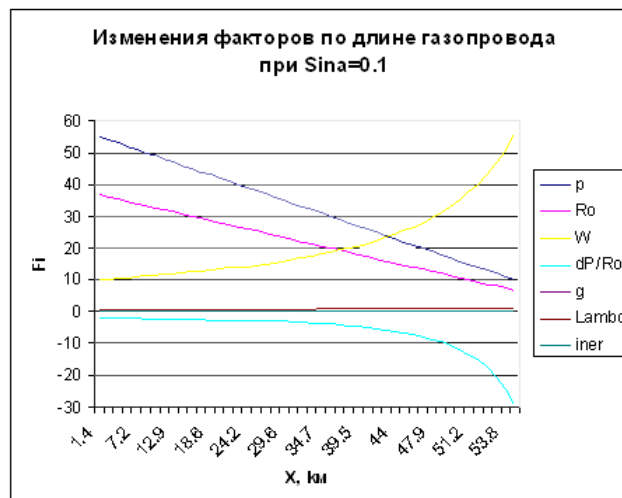


Рис 1.1.

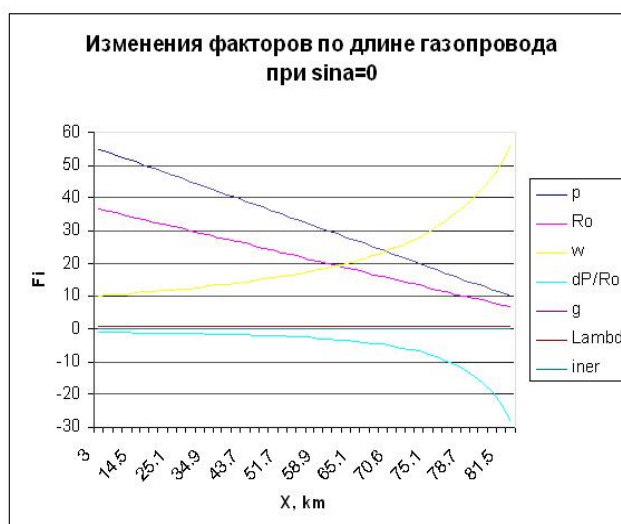


Рис 1.2.

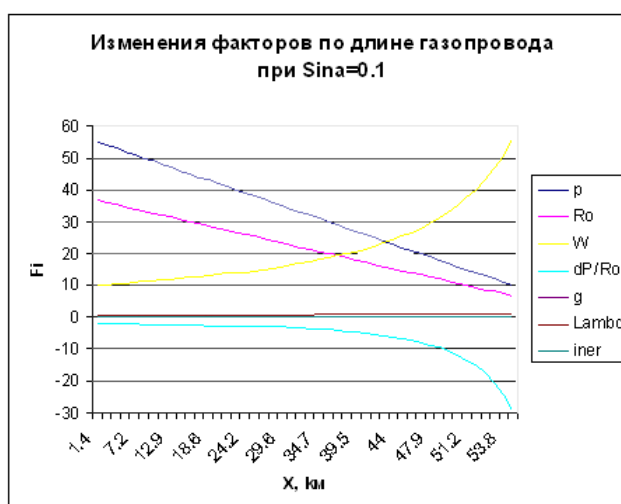


Рис 1.3.

### Библиографический список

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. – М.: Наука. 1976. – 888 с.
2. *Бобровский С.А., Щербаков С.В., Гусейн-заде М.А.* Движение газа в газопроводах с путевым отбором. – М.: Наука. 1972. – 193 с.
3. *Бобровский С.А., Яковлев Е.И., Гарляускас А.И., Грачев В.В.* Трубопроводный транспорт газа. – М.: Наука. 1976. – 496 с.
4. *Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.Е.* Динамика трубопроводных систем. – М.: Наука. 1987. – 638 с.
5. *Гусейнзаде М.А., Никольская Н.С., Стайн А.М.* Распространение волны давления в трубопроводе при изменении количества попутной сосредоточенной подкачки. Сб. науч. тр. Инс. Нефти и газа. – 1991. – № 229. – С. 143-146.
6. *Дидкин И.И., Попова О.М.* Применение метода внутренних точек при расчете потокораспределения в гидравлической системе с регуляторами // Кибернетика и системный анализ. – 2000. – №4. – С. 173-178.
7. *Зайниев Н.З., Садуллаев Р., Хужаев И.К., Хуррамова Р.И.* Обобщенная методика расчета сложного трубопровода при концентрированном отборе и подкачке с учетом рельефа местности // Узбекский журнал Neft va Gaz. – 2003. – №1. – С. 34-36.
8. *Коротаев Ю.П., Ширковский А.И.* Добыча, транспорт и хранения газа. – М.: Недра. 1984. – 486 с.

9. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлические сопротивления. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 367 с.

10. Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов. Учебное пособие для вузов. – М.: Недра. 1982. – 136 с.

11. Хужаев И.К., Хуррамова Р.И. Новые формулы для гидравлического расчёта газопровода с учётом переменности плотности газа и нивелирной высоты трассы //Алгоритмы: Сб. науч. Тр. ИК АН РУз. Вып. 90. 24-28 с.

12. Hujayev I.K., Sadullaev R., Bozorov O.S. Carrying and heat-sink abilities of the linear site of the gas main in the stationary mode of functioning //Proceeding of the 1st seminar among KALM, Tashkent State Technical University, and Ustoz Republican Foundation, Tashkent, july 3-5, 2003. – PP. 157-160.

13. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра. 1975. – 296 с.

14. Садуллаев Р., Вагапов И.Х., Зайниев Н.З., Хужаев И.К., Хуррамова Р.И. Расчёт магистрального газопровода с учётом рельефа местности // Ж. Газовая промышленность. – М, 2003. – №8. – С. 58-59.

## ANALYSIS OF EQUATIONS OF HYDRAULIC CALCULATION OF GAS PIPELINE UNDER DEVELOPED FLOW MODE

**R.I. Khurramov**, *associate professor*  
**Tashkent pharmaceutical institute**  
**(Uzbekistan, Tashkent)**

**Abstract.** *The article discusses the study of the gas-dynamic state of a linear gas pipeline section and the development of an algorithm for calculating the static mode of operation of a hydraulic network. This decision takes into account all the power factors with a constant slope of the pipeline. Computational experiments established three modes of gas flow through a pipe with a rise upward, with a slight downward slope and a large downhill also downward. The boundary between the last two flow regimes in an incompressible fluid hydraulics is known as the “pass point”.*

**Keywords:** *gas pipeline, static mode, power factors, slope, slopes, with a rise up, with a small slope down, a pass point.*