

О ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

М.В. Лурье, О.А. Пятакова

(РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина)

Газопровод, компрессорные станции, волны гидравлического удара
Gas pipeline, compressor stations, hydraulics blow waves, equations system

About possible occurrence of hydraulic blows in the main gas pipelines of high pressure. Lurie M.V., Pyatukova O.A.

The paper reviews the gas pipelines transporting natural gas under pressure above 15 MPa, for example gas pipelines laid on the bottom of deep-water seas. The gas transported in such pipelines has a high density and increased velocity of pressure waves propagation. A combination of these factors causes a risk of occurrence of hydraulic blow waves in a gas pipeline. Fig.2, ref.2.

Поскольку в газопроводах, прокладываемых по дну морей или преодолевающих горные перевалы, установка промежуточных компрессорных станций невозможна, а протяженность эксплуатационных участков достигает нескольких сотен километров, то давление в начале участка может составлять 15-25 МПа и оставаться таким на значительном протяжении линейной части. Как правило, гидравлические удары в газопроводах среднего давления не представляют существенной угрозы трубопроводу, поскольку транспортируемый газ относительно легкий, а скорость звука мала, поэтому амплитуда волн гидравлического удара не превышает 0,01-0,05 МПа. Иное дело газопроводы с аномально высоким давлением. Плотность газа в таких газопроводах может составлять 150-200 кг/м³, изменение скорости достигать 10 м/с, а скорость волн давления, обычно составляющая 360-400 м/с, увеличиваться до 500-600 м/с. Вследствие этих факторов амплитуда волн гидравлического удара может достигать 1,0-1,5 МПа.

Уравнения нестационарного течения газа в газопроводе. Система уравнений, описывающая нестационарное течение газа в газопроводе имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 + p) = -\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho u^2}{2} - \rho g \cdot \sin \alpha(x), \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho u^2}{2} + \rho \varepsilon \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \cdot \left(\frac{u^2}{2} + J \right) \right] = \frac{4}{d} \cdot q_T - \rho u g \cdot \sin \alpha(x), \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho(x,t), p(x,t), u(x,t)$ – соответственно плотность, давление и скорость газа; x – координата вдоль оси газопровода; t – время. Кроме того, λ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\varepsilon(T)$ – внутренняя энергия единицы массы газа; $J(p,T) = \varepsilon(T) + p/\rho$ – энтальпия газа; q_T – поток тепла от поверхности газопровода в окружающую среду; $\alpha(x)$ – угол наклона оси газопровода к горизонту; $\sin \alpha = dz/dx$; $z(x)$ – профиль газопровода; d – внутренний диаметр газопровода; g – ускорение силы тяжести. Первое из этих уравнений – это уравнение неразрывности (сохранения массы), второе – уравнение движения газа (баланса импульсов), третье – уравнение энергии.

Анализ этой системы уравнений показывает, что в неизотермическом потоке газа в трубе существует три системы волн – две быстрые и одна медленная. Быстрые волны имеют скорости $u \pm v_{\text{зв}}$, где $v_{\text{зв}}$ – так называемая скорость звука; медленная волна как бы «вморожена» в поток – ее скорость равна u . На каждой волне выполняется определенное соотношение между давлением, температурой и скоростью газа, что служит основой для использования математического метода характеристик при расчете нестационарных течений газа в газопроводе [1,2].

Для дозвуковых течений газа изменения давлений и расходов газа регулируются, главным образом, быстрыми волнами. Их скорость определяется скоростью звука $v_{\text{зв}}$. В монографии [1] показано, что для реальных газов эта скорость выражается формулой

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T}, \quad (2)$$

где $C_v, C_p(p,T)$ – теплоемкости газа при постоянном объеме и давлении соответственно, причем если $C_v \approx \text{const.}$, то C_p зависит от давления и температуры и представляется более сложно, нежели по известной формуле Майера

$$C_p = \left(\frac{\partial J}{\partial T} \right)_p = C_v - \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p. \quad (3)$$

Если уравнение состояния реального газа записать в форме $p = Z \cdot \rho R T$, где $Z(\bar{p}, \bar{T})$ – коэффициент сжимаемости газа, зависящий от приведенного давления $\bar{p} = p/p_*$ и приведенной температуры ($\bar{T} = T/T_*$, а p_*, T_* – критические параметры газа), то имеют место следующие соотношения:

$$-\frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = p \cdot \left(\frac{\partial 1/\rho}{\partial T} \right)_p = RT \left(\frac{\partial Z}{\partial T} + \frac{Z}{T} \right);$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = RT \left(Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \right).$$

Из последнего равенства находим

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \cdot \left(1 - \rho RT \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right) = ZRT.$$

Подставляя сюда $\rho RT = p/Z$, получаем

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = ZRT \cdot \frac{Z/p}{Z/p - \partial Z / \partial p}.$$

Таким образом, выражения (2) и (3) для теплоемкости и скорости звука в потоке реального газа в трубопроводе представляются следующими формулами:

$$C_p = C_v + RT \left(\frac{\partial Z}{\partial T} + \frac{Z}{T} \right); \quad (4)$$

$$\nu_{36} = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T} = \sqrt{\left(1 + \frac{R}{C_v} \cdot \left(Z + \bar{T} \frac{\partial Z}{\partial \bar{T}} \right) \right) \cdot ZRT \cdot \frac{Z/\bar{p}}{Z/\bar{p} - \partial Z / \partial \bar{p}}}. \quad (5)$$

Для совершенного газа $Z \equiv 1$, поэтому данные формулы переходят в хорошо известные выражения: $C_p = C_v + R$; $(\nu_{36})_0 = \sqrt{\gamma \cdot RT}$, где $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты. Однако в случае реального газа оба параметра зависят от давления и температуры, а через коэффициент Z и от его производных по p и T .

Представлены графики зависимости $Z(\bar{p}, \bar{T})$ от приведенных давления и температуры, причем последняя взята в диапазоне $1,4 \leq \bar{T} \leq 1,5$, включающем температуры $0-10^0 \text{ C}$, характерные для условий пролегания глубоководных газопроводов (рис.1).

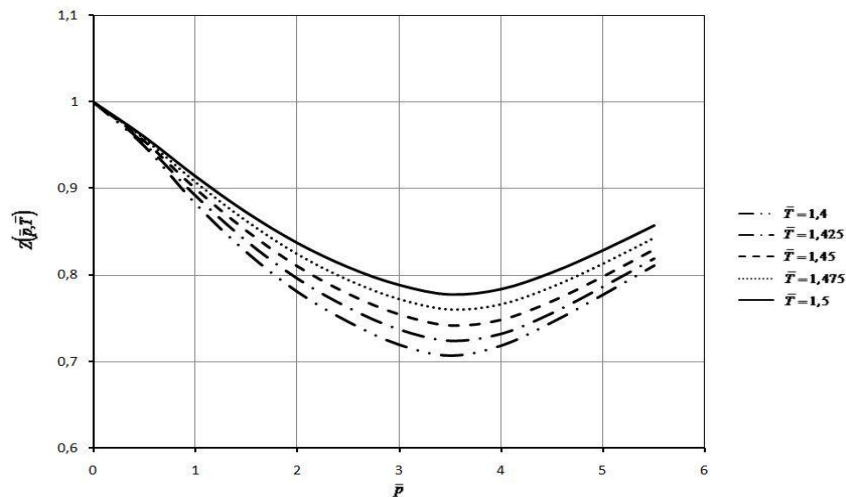


Рис.1. Зависимости коэффициента сжимаемости $Z(\bar{p}, \bar{T})$ реального газа от приведенных значений давления и температуры

Формула (5) показывает, что скорость звука в реальном газе изменяется при изменениях давления и температуры.

Представлены зависимости безразмерной скорости звука $k(\bar{p}, \bar{T}) = \nu_{36} / (\nu_{36})_0$ от приведенного давления \bar{p} для различных значений приведенной температуры \bar{T} (рис.2).

В реальном газе зависимость скорости звука от давления носит немонокотный характер (см. рис. 2). Если давление в газопроводе меньше $\approx 15,0 \text{ МПа}$ ($0,02 < \bar{p} < 3,1 \div 3,2$), то с увеличением давления скорость звука уменьшается примерно на 20% по сравнению со скоростью звука в совершенном газе; если же давление превышает 15,0 МПа, то скорость звука

начинает возрастать и при давлении 22,0 - 25,0 МПа превышает скорость звука в совершенном газе на 25%. Несмотря на то, что эта скорость по-прежнему остается меньше скорости звука в жидкости, ее значения становятся соизмеримыми с последней.

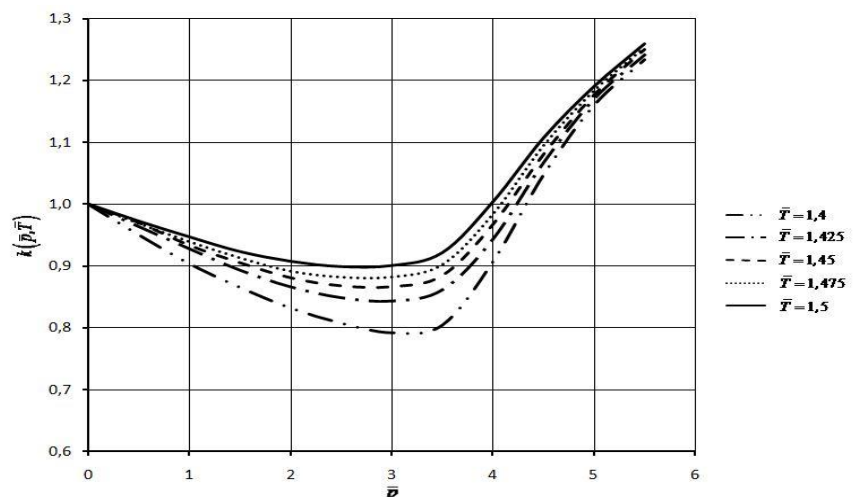


Рис. 2. Зависимости безразмерной скорости звука $k(\bar{p}, \bar{T}) = v_{зв} / (v_{зв})_0$ от приведенного давления для различных значений приведенной температуры

Гидравлический удар в газопроводе. Под гидравлическим ударом в трубопроводах обычно понимают скачкообразное возрастание давления при торможении потока транспортируемой среды. Возникший скачок распространяется по трубопроводу с некоторой скоростью, которая для сжимаемого газа в слабо деформируемом трубопроводе, весьма близка к адиабатической скорости звука $v_{зв}$.

Если отношение скорости газа к местной скорости звука мало (мало число Маха), то на фронте разрыва параметров газового потока выполняется известное соотношение Н.Е. Жуковского:

$$[p] = [\rho u] \cdot v_{зв}, \quad (6)$$

где символом $[]$ обозначен «скачок» параметра, заключенного в скобках, то есть разность значений этого параметра за и перед фронтом волны.

Дадим простейшие оценки возможного ударного повышения давления на фронте волны в потоке газа в условиях высоких и сверхвысоких давлений. Взяв, например, $p \approx 22$ МПа, $u \approx 10$ м/с, $\rho \approx 200$ кг/м³ и $v_{зв} \approx 500$ м/с, получим $[\rho u] \cdot v_{зв} = \rho u \cdot v_{зв} - 0 = 200 \cdot 10 \cdot 500 = 1,0 \cdot 10^6$ Па. Иными словами, скачок давления на фронте волны гидравлического удара составляет $\approx 1,0$ МПа, то есть больше 10 атм. Этот результат показывает, что при проектировании и эксплуатации газопроводов с высоким давлением следует считаться с возможностью возникновения волн гидравлического удара, способных привести к разрыву трубопровода.

Выводы

- Скорость звука в потоке реального газа в трубопроводе в зависимости от давления имеет немонотонный характер: сначала при увеличении давления она уменьшается; при давлениях ≈ 13 -17 МПа достигает минимума, а затем начинает увеличиваться и может на 15-25% превысить скорость звука в совершенном газе при равной температуре.
- Торможение потока сжатого газа, транспортируемого в газопроводе при давлениях выше 15 МПа, приводит к значительному увеличению давления на фронте образующейся волны гидравлического удара. С этим обстоятельством необходимо считаться при проектировании запорной арматуры и эксплуатации подобных газопроводов.

Список литературы

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Нефть и газ, 2003. – 335 с.
2. Лурье М.В., Полянская Л.В. Компьютерный расчет потерь газа при разгерметизации газопровода// Газовая промышленность. – 2002. – № 11. – С. 42-44.

Сведения об авторах

Лурье М.В., д.т.н., профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина тел. (499)233-95-02, e-mail: Lurie254@gubkin.ru

Пятакова О.А., аспирантка кафедры «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, тел.: (499)233-95-02

Lurie M.V., PhD, professor of Department «Design and operation of oil and gas pipelines» RSU of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, Moscow, phone.: (499) 233-95-02

Pyatakova O.A., postgraduate student of Department «Design and operation of oil and gas pipelines» RSU of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, Moscow, phone.: (499) 233-95-02), mail: piatakova@list.ru