

УДК 621.644.073

Братах М.И., Топоров В.Г., Варавина Е.П., Кутя М.М.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЛПОВОГО ВЫБРОСА ЖИДКОСТИ ИЗ ПОЛОСТИ ГАЗОПРОВОДА

Предметом исследований было качество газа, добытого в Украине, который транспортируется системой промысловых и магистральных газопроводов. С одной стороны, качество газа ухудшает несовершенная очистка газа на промыслах, связанная с неудовлетворительной работой сепарационного оборудования (механическое вынесение жидкости), с другой стороны – конденсация жидкости из газового потока под влиянием благоприятных термодинамических и скоростных условий эксплуатации газопровода. Действующий ГОСТ 5542 не регламентирует ни влияние этих условий на формирование масс жидкости на участках газопровода, ни качество газа на входе в газораспределительную станцию (ГРС). Перераспределение масс жидкости по участкам газопровода, вследствие достижения величины критического объема загрязнений на одном из них или изменения режима эксплуатации газопровода, приводит к залповым выбросам жидкости из полости газопровода на технологическое оборудование ГРС, компрессорной станции (КС), и, как следствие, к аварийным отказам оборудования, загрязнению окружающей среды, прекращению подачи газа потребителям.

Вопрос вынесения жидкости из колена газопровода потоком более легкой жидкости или газовым потоком довольно тщательно рассматривался в аспекте геометрии потоков жидкости, газа, легкой нефти и т.д. Чарным И.А., Гусейновым Ч.С. и другими исследователями в трудах [1–3]. Но следует заметить, что исследование, в основном, проведено только для геометрии газового и жидкостных потоков с целью увеличения пропускной способности газопроводов, продуктопроводов и т.д. Вследствие этого результаты данных работ являются оторванными от практики эксплуатации газопроводов системы сбора и добычи газа газоконденсатных месторождений (ГКМ) Украины и системы магистральных газопроводов (МГ), по которым газ, добытый в Украине, подают потребителям.

Целью разработки математической модели залпового выброса жидкости из пониженного участка газопровода является предотвращение аварийных отказов газоперекачивающего оборудования на КС, ГРС и т.п. вследствие поступления значительных масс жидкости из полости газопроводов, транспортирующих газ ГКМ Украины (газ, добытый в Украине). Это достигается путем прогнозирования динамики объема жидкости в полости исследуемого участка газопровода, сравнением его величины со значением критического объема загрязнений на участке газопровода для текущего режима работы и определением периода активации залпового выброса жидкости из газопровода.

Разработка заключается в нахождении соотношения между факторами, влияющими на процесс формирования определенного объема загрязнений в полости газопровода, и построении моделей для разных диаметральных рядов и разных режимов работы рельефного газопровода. Следовательно, модели будут связывать влияние таких факторов:

- режим работы газопровода (скоростной режим работы и среднее давление газа на участке газопровода);
- техническая характеристика газопровода;
- рельеф трассы прокладки газопровода (угол наклона восходящего участка газопровода к горизонтальной поверхности);

– характеристика жидкости в пониженном участке газопровода (конденсат, вода конденсационная, пластовая).

Теоретическое исследование прогнозирования залпового выброса жидкости из колена газопровода проведено на основании теории И.А. Чарного в части динамического равновесия воды в напорных трубопроводах при действиях движущей силы на слои воды и удерживающей силы тяжести.

В результате исследования геометрии жидкого формирования, под действием движущей силы, получены уравнения, характеризующие геометрию жидкостной пробки в застойной зоне газопровода:

– критической глубины залегания зеркала жидкости, отвечающей условию залпового выброса:

$$H_{кр} \geq \frac{\lambda \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \omega^2 \cdot \gamma_2}{4\Delta\gamma \cdot \sin \alpha \cdot g}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления газопровода;  $\varphi$  – центральный угол поверхности зеркала жидкости, рад;  $\omega$  – скорость газа в газопровode, м/с;  $\gamma_2$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta\gamma$  – разность между плотностью жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – угол наклона участка газопровода к горизонтальной поверхности;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

– длины зеркала жидкости:

$$S = \eta \cdot 2R, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус газопровода, м;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий режим эксплуатации участка рельефного газопровода

$$\eta = \frac{\psi}{\varphi} \left\{ \left[ \xi - \xi_0 - 0,5 \sqrt{\frac{m_1}{\varphi}} \ln \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{m_1}{\varphi}} + \xi \right) \left( \sqrt{\frac{m_1}{\varphi}} - \xi_0 \right)}{\left( \sqrt{\frac{m_1}{\varphi}} - \xi \right) \left( \sqrt{\frac{m_1}{\varphi}} + \xi_0 \right)} \right) \right] \right\} + \frac{n_1 \varphi^6}{m_1^7} \left[ \ln \left( \frac{\xi}{\xi_0} \cdot \sqrt{\frac{m_1 - \varphi \xi_0^2}{m_1 - \varphi \xi^2}} \right) + \sum_{k=1}^6 \frac{m_1^k}{\varphi^k 2k (\xi_0^{2k} - \xi^{2k})} \right], \quad (3)$$

где

$$\varphi = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_2} \sin \alpha, \psi = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_2}, m_1 = 0,0244 \cdot \lambda \cdot Fr_{np}, n_1 = 2 \cdot (0,7021)^{1,5} Fr_{np} \cdot \beta,$$

где  $\beta = 1,045-1,1$  – коэффициент Кориолиса (поправочный коэффициент на неравномерность распределения скоростей);  $\xi_0, \xi$  – соотношения глубины залегания жидкостной пробки к ее гидравлическому радиусу для абсолютно чистого газопровода и газопровода с наличием жидкостной пробки соответственно;  $Fr_{np}$  – приведенное число Фруда.

Угол  $\varphi_{кр}$ , отвечающий критической глубине залегания зеркала жидкости  $H_{кр}$ , предложено определять из условия геометрии формирования жидкости в застойной зоне газопровода по формуле 4, что в графическом виде отвечает кривой на рис. 1.

$$\Phi_1(\varphi_{кр}) = \frac{\left(\pi - \varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi\right)^3}{\sin \varphi}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – половина центрального угла поверхности зеркала жидкости, рад.

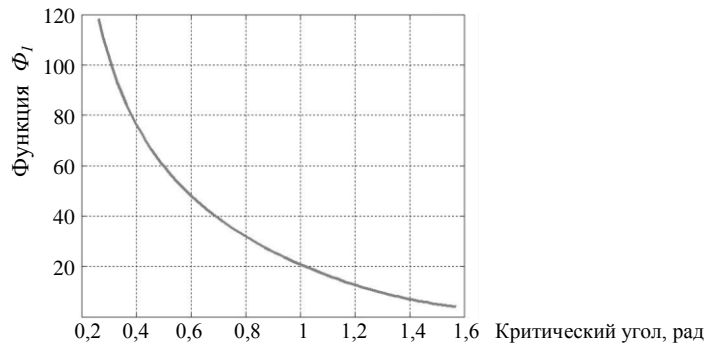


Рисунок 1– Зависимость функционального условия  $\Phi_1(\varphi_{кр})$  от половины центрального угла поверхности зеркала жидкости

Получены математические модели зависимости функционального условия  $\Phi_1(\varphi_{кр})$  от следующих факторов: скоростного режима работы газопровода, его технической характеристики, качественной характеристики жидкостных загрязнений в полости газопровода, рельефа местности, трассой, которой проложено газопровод, и среднего давления газа на участке газопровода

$$\Phi_1(\varphi_{кр}) = \frac{4\pi^2 \beta \omega^2 P}{zRTDg \cos \alpha \left( \gamma_p - \frac{P}{zRT} \right)}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – линейная скорость газа, м/с;  $P$  – среднее давление газа на участке газопровода, Па;  $Z$  – коэффициент сжимаемости газа для некомпримируемого газа ГКМ и газовых месторождений (ГМ) Украины – 0,96;  $R$  – газовая постоянная, Дж/кг·К;  $T$  – средняя температура газового потока на участке газопровода, К;  $D$  – внутренний диаметр газопровода, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона участка газопровода к горизонтальной поверхности, рад;  $\gamma_p$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Математическую модель реализовано в программном обеспечении в виде 3-D моделей  $\Phi_1(\varphi_{кр})$  для условий, учитывающих скоростной режим работы газопровода от 1,0 до 15,0 м/с, рельеф трассы прокладывания газопровода, диаметральный ряд (от шлейфов условного диаметра DN100 до МГ DN1400); режим работы газопроводов, качественный состав загрязнений в полости газопровода (вода пластовая, конденсационная, конденсат) (рис. 2).

Поскольку в каждом конкретном случае длина участка газопровода, занятого загрязнениями (длина зеркала жидкости), будет разной, учитывая геометрию жидкостной

пробки в застойной зоне газопровода, построено зависимость удельного критического объема загрязнений от диаметра газопровода  $D$  и критического значения половины центрального угла поверхности зеркала жидкости  $\varphi$  (рис. 3).

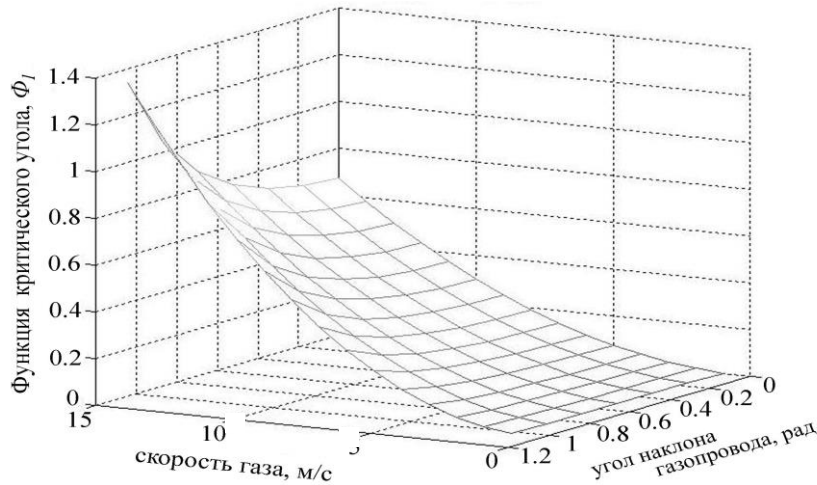


Рисунок 2 – Пример реализации в программном обеспечении математической модели зависимости  $\Phi_1(\varphi_{кр})$  для рельефных газопроводов

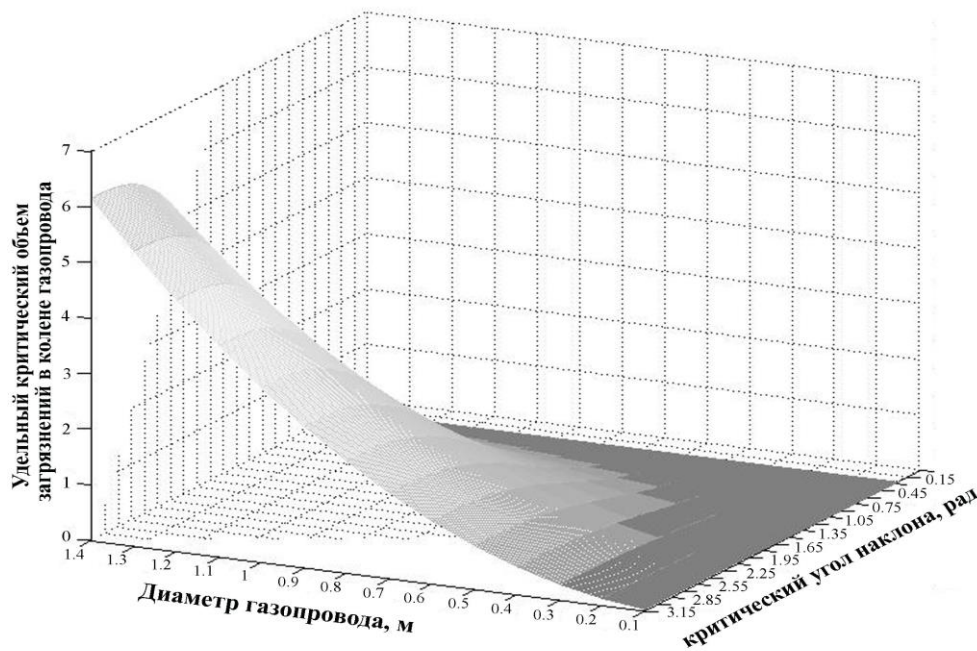


Рисунок 3 – Зависимость удельного критического объема  $V_{кр}$  загрязнений от критического угла  $\varphi$  и диаметра газопровода

Следовательно, условием залпового выброса жидкости при прогнозировании возможности возникновения процесса залпового выброса жидкости из участка газопровода для промышленных газопроводов Украины и МГ, транспортирующих газ, добытый в Украине, будет превышение величины критического объема загрязнений, определяемого по методике данной разработки, величиной объема загрязнений в определенный период года, зависящего от режима работы газопровода.

Поскольку объем загрязнений рельефного газопровода является функцией фактора режима работы участков газопровода, то целью экспериментальных исследований является определение объема загрязнений в полости газопроводов соответствующего режиму их работы и рельефу местности, по которой проложено трассу газопровода, то есть получение эмпирической регрессионной модели, описывающей зависимость степени заполнения жидкостью полости участка газопровода от ее режима работы, характеризующегося определенным значением коэффициента гидравлической эффективности, и угла наклона исследуемого участка газопровода.

Расчетный объем жидкостных загрязнений в полости газопровода определяют по формуле:

$$V_{загр} = a \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot L, \quad (6)$$

где  $D$ ,  $L$  – геометрические параметры газопровода: внутренний диаметр и длина соответственно, м;  $a$  – коэффициент, характеризующий степень заполнения геометрического объема газопровода жидкостью.

Результаты исследования регрессионной эмпирической модели зависимости степени заполнения участка газопровода жидкостью от его режима работы и геодезического наклона подтверждают:

- пригодность линейного уравнения регрессии для решения задачи поиска области оптимума – совокупности благоприятных условий;
- значимость коэффициентов уравнения, причем расчетная погрешность эксперимента составляет 3,86 %.

Определение динамики объема загрязнений на протяжении года вследствие активации процесса конденсации жидкости из газового потока (конденсация тяжелых углеводородов, влаги) при благоприятных термодинамических условиях даст возможность оценить  $V_{дин}$  и сравнить его со значением критического объема загрязнений для текущего режима работы газопровода. В случае выполнения условия

$$V_{дин} \geq V_{кр} \quad (7)$$

констатируется факт прохождения процесса залпового выброса жидкости из колена исследуемого газопровода.

Выводы:

1. Проведены теоретические исследования прогнозирования залпового выброса жидкости из колена газопровода на основании теории И.А. Чарного в части динамического равновесия жидкости в напорных трубопроводах при действиях движущей силы на слои воды и удерживающей силы тяжести.

2. Получено уравнение, характеризующее изменение глубины залегания зеркала жидкости в застойной зоне газопровода по ее длине, на основании которого определена критическая глубина, отвечающая условию залпового выброса жидкости из полости газопровода, и длина участка газопровода, занятого жидкостными загрязнениями.

3. Сформулировано условие залпового выброса и прогнозирования возникновения процесса залпового выброса жидкости из колена газопровода, транспортирующего газ ГКМ Украины, которое заключается в превышении величины критического объема

загрязнений, предложенного по данной методике, величиной объема загрязнений в определенный период года, определяющийся по режиму работы газопровода.

4. Уравнение критического объема загрязнений в полости газопровода, отвечающее условию залпового выброса жидкости, устанавливает взаимосвязь между технической характеристикой газопровода, геометрией жидкостной пробки, ее качественной характеристикой, режимом работы газопровода, включая скоростной.

5. Результаты проведенных научных исследований (разработанные способы оценки гидравлического состояния газопроводов, математические модели залпового выброса жидкости и процесса формирования жидкостной пробки в полости газопровода) могут использовать научно-исследовательские и проектные институты нефтегазового профиля при проведении проектных и научных работ, предприятия НАК «Нефтегаз Украины» в процессах постоянного мониторинга гидравлического состояния потенциально-опасных участков газопровода с целью разработки мероприятий по уменьшению потерь давления газа во время транспортировки системой газопроводов, уменьшения вероятности выбросов жидкости в технологическое оборудование КС, ГРС и в окружающую среду.

#### Литература

1. Чарный И.А. Влияние рельефа местности и неподвижных включений жидкости или газа на пропускную способность трубопроводов / И.А. Чарный // Нефтяное хозяйство – 1965: № 6. – С. 51–55.
2. Чертоусов М.Д. Гидравлика.– М.: Госэнергоиздат, 1962. – 462 с.
3. Гусейнов Ч.С. Влияние конденсата на производительность газопровода / Ч.С. Гусейнов // Трубопроводный транспорт нефти и газа.– М.: Труды МИНХиГП им. Губкина. вып. 45. Гостоптехиздат, 1963. – С. 12–15.

УДК 621.644.073

Братах М.І., Топоров В.Г., Варавіна О.П., Кутя М.М.

#### **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛПОВОГО ВИКИДУ РІДИНИ З ПОРОЖНИНИ ГАЗОПРОВОДУ**

Представлена математична модель залпового викиду рідини з порожнини промислового газопроводу, яка базується на теорії газової динаміки І.А. Чарного та ряді проведених експериментальних досліджень в лабораторних і польових умовах.

Bratakh M.I., Toporov V.G., Varavina E.P., Kutya M.M.

#### **MATHEMATIC MODEL OF VOLLEY LIQUID EMISSION FROM GAS PIPELINE**

The mathematical model of volley liquid emission from working gas pipeline based on the gas dynamic theory of L.A. Tcharny and on series of laboratory and field researches is presented.