

УДК 622.692.4.058

С.Е.Кутуков, Бахтизин Р.Н., Шаммазов А.М.  
*Уфимский государственный нефтяной технический  
университет*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО СКОПЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ТРУБОПРОВОДА**

### **АННОТАЦИЯ**

Газовоздушные скопления – одно из характерных осложнений технологических режимов перекачки нефтей и нефтепродуктов, снижающих пропускную способность трубопроводных систем в среднем на 30...60%. Разработка мероприятий поддержания пропускной способности трубопроводов на проектном уровне упирается в проблему диагностики осложнений технологических режимов, одним из которых являются газовые скопления.

Предложена методика количественной оценки возможного снижения пропускной способности участка трубопровода с газовыми скоплениями. Мониторинг распределения давлений по длине трубопровода позволяет своевременно выявлять и отслеживать их образование и миграцию.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вопросы влияния газовых скоплений на пропускную способность трубопровода – популярная тема исследований технологических режимов магистральных и промысловых трубопроводов. Достаточно перечислить наиболее известные работы сотрудников МИНХ и ГП им. Губкина В.К.Касперовича [1], Донца К.Г. [2], Гольдберга В.Л. [3], Грозненского нефтяного института – А.И. Гужова и В.Ф.Медведева [4], Уфимского нефтяного института - Г.Е.Коробкова [5], А.К.Галлямова [6], М.И.Мердуха [7], А.М.Нечваля [8]. Зарубежом исследованию безнапорных и двухфазных потоков традиционно уделяется большое внимание. В США в Университете Тулзы (Tulsa University) с 1972 г. проводится целевая программа изучения двухфазных потоков Fluid Flow Projects

(TUFFP) с годовым бюджетом 500...1000 тыс. долларов США. Каждое полугодие на конкурсной основе приглашаются ведущие ученые мира для экспериментальной проверки своих изысканий. Наиболее авторитетными и часто цитируемыми являются Neima Brauner [9], D. Barnea [10], Y. Teitel, A.E. Dukler [11] (Israel), H. Furukawa, M. Ihara, K. Kohda [12] (Japan), G.F. Hewitt [13] (UK) и др.

## **ПРОЯВЛЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СКОПЛЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ УДАЛЕНИЯ**

Специалистам, обслуживающим системы трубопроводов хорошо известны характерные черты феномена:

- Снижение пропускной способности трубопровода;
- Срывы в работе насосов при прохождении газовой пробки через его проточную часть;
- Уменьшение амплитуды гидроудара;
- Пульсации давления и расхода в периоды миграции крупных пузырей;

а также в мерах по ликвидации газовых скоплений [2,8,14]:

- Пропуск очистных устройств и «мягких» разделителей;
- Увеличение производительности перекачки до значений, превышающих «выносную» скорость;
- Продолжительное повышение давления в трубе до полного растворения скопления;
- Обустройство автоматических вантузов для сброса газа в сателлитную линию.

Первый - самый эффективный способ, который отмечается всеми авторами как приоритетный, но в отсутствии средств оперативной диагностики и достаточно обоснованной модели динамики скопления газа предполагает большие и не всегда оправданные дополнительные эксплуатационные расходы.

Второй – наиболее обоснованный с научной точки зрения. Редкий исследователь внутритрубных газовых скоплений не внес своего вклада в обоснование «выносной» скорости [1,2,3,4,5]. Технологически выполнить их

рекомендации на недогруженных трубопроводах, имеющих 60% износа, весьма проблематично.

Третий имеет те же недостатки, что и предыдущий.

Четвертый предполагает значительные капитальные вложения и реализуется только на промыслах с двухтрубной системой сбора, что встречается весьма редко.

Обобщая представления исследователей различных школ можно обрисовать следующую физическую картину явления:

Газовые скопления образуются из пузырьков газа, всплывающих на восходящем участке трубопровода, и занимают повышенные участки трассы. Объем такого скопления со временем меняется: с увеличением производительности или при зачистке внутренней полости трубы скрепками – сокращается за счет выноса части газа или его частичного растворения; а при снижении давления и скорости движения нефти – увеличивается из-за сепарации растворенных или диспергированных в нефти газов, а так же переноса газозоудной смеси пузырями при размыве аналогичного скопления выше по течению. Таким образом, помимо движения нефти в любом недогруженном участке трубопровода наблюдается миграция газозоудных пузырей, которые в повышенных участках трассы образуют устойчивые скопления, вытянутые межфазными силами трения вдоль нисходящих участков трубопровода. Накопление газа ограничено аккумулярующей способностью нисходящего участка. Излишки газа могут, перевалив наинизшую точку трассы, крупными пузырями всплывать по восходящему участку, пополняя газозоудное скопление ниже по течению. Однако, подобный механизм переноса больше характерен для промысловых коллекторов. В магистральных трубопроводах рост скопления чередуется с периодами частичного размыва и растворения, поэтому характерные для первого механизма переноса ярко выраженные пульсации давления и скорости потока наблюдаются редко.

Для оценки влияния этого фактора на пропускную способность МНП рассмотрим необходимые условия существования газозоудных скоплений.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФНОГО ТРУБОПРОВОДА

Газовые скопления не однозначно изменяют эксплуатационные характеристики участка трубопровода. В широком диапазоне заполнения трубы газоздушные скопления препятствуют течению жидкости, создавая дополнительные гидравлические сопротивления. Однако, в диапазоне  $\frac{\varpi}{\varpi_0} \in [0,87...0,97]$  гидравлическое сопротивление самотечного участка меньше сопротивления аналогичного участка в напорном режиме. В этом диапазоне уменьшение площади живого сечения меньше, чем сокращение смоченного периметра. Работа участка трубопровода при таких степенях заполнения возможно лишь при условиях, препятствующих свободному выносу скопления из трубопровода (например, увеличение уклона трассы по направлению движения жидкости). В противном случае, любое возмущение приведет к выносу скопления и заполнению участка.

Для анализа феномена на профиле трассы выделим нисходящие участки (плети) от «перевальной» точки -  $\Pi_j$  до «седла» -  $C_j$  (рис.1).

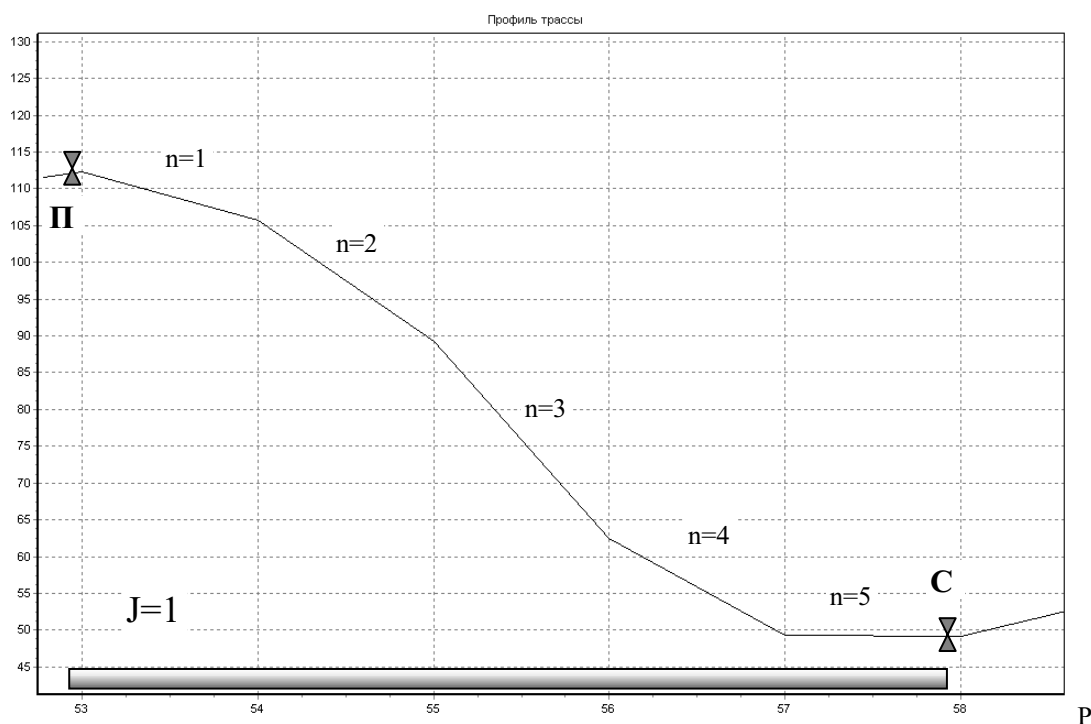


Рис.1 – Профиль трассы участка трубопровода

Реальный профиль аппроксимируется ломаной линией, имеющей звенья постоянного наклона оси к горизонту. Вычислив максимально возможный самотечный расход для каждого такого участка, выделим удовлетворяющие соотношению  $Q < Q_{\max}$ . Анализ возможности существования газового скопления начнем с последних участков плети. Миграции газа по ним ничего не препятствует, поэтому можно воспользоваться рекомендациями [4,5,6,8,15,16], полученными в экспериментальных исследованиях на лабораторных стендах.

Определим минимальный уклон нисходящего участка трассы, при котором возможно существование газового скопления в трубопроводе. Известна зависимость И.А.Чарного [17] скорости потока для выноса газового скопления от угла наклона трубопровода

$$v = k_r \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot D \cdot \sin \alpha}{\lambda}}. \quad (1)$$

По рекомендациям А.К.Галлямова [6] поправочный коэффициент можно выразить через отношение вязкостей нефти и газовой смеси:

$$k_r = 0.225 \cdot \sin^{-0.36} \alpha \cdot \left( \frac{v_f}{v_g} \right)^{0.39}, \quad (2)$$

где  $v_f$  – вязкость нефти;

$v_g$  – вязкость газовой смеси.

Подставляя (1, 2) экспериментально зарегистрированную максимальную степень заполнения устойчивого расслоенного течения  $\frac{\bar{\omega}}{\bar{\omega}_0} = 0,82$ , при которой

относительный гидравлический радиус  $\frac{4R_z}{D}$  имеет значение 1,21 и решая его относительно угла  $\alpha$ , получим минимальный уклон трассы, при котором газозаполнение фиксируется в трубопроводе:

$$\sin \alpha_{\min} = 12 \cdot \left( \lambda \frac{Q^2}{D^5} \right)^{3.57} \left( \frac{v_g}{v_f} \right)^{2.79}. \quad (3)$$

Конечное звено плети проверяем на возможность фиксации газа по углу наклона к горизонту:

$$\alpha > \alpha_{\min}. \quad (4)$$

Для оценки максимально возможного объема газа, защемленного в плети рассчитаем коэффициенты заполнения каждого ее звена, удовлетворяющего условию ( $Q < Q_{\max}$ ):

$$\frac{\varpi}{\varpi_0} = \frac{\frac{Q}{Q_f}}{\sqrt{\frac{\lambda_f 4R_z}{\lambda D}}} \quad (5)$$

Суммируя объемы газа по длине плети, получаем оценку максимально возможного объема газа, защемленного в плети:

$$V_r = \frac{\pi D^2}{4} \sum_n \left(1 - \frac{\varpi_n}{\varpi_0}\right) \cdot l_n, \quad (6)$$

где  $n$  – индекс звена в нисходящей плети;

$l_n$  – длина звена.

Изменение максимально возможного объема газа, защемленного в МНП «Куйбышев-Лисичанск» на участке ПК53...ПК58 в зависимости от производительности изображено на рис.2.

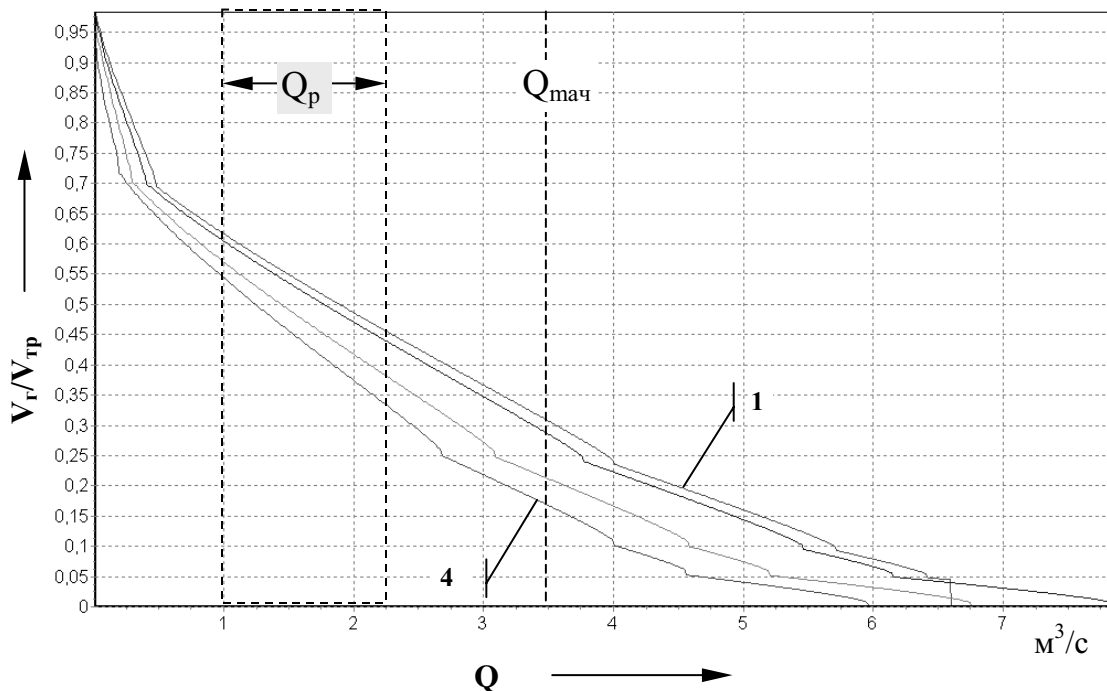


Рис.2 - Оценка максимально возможного объема газа в МНП «Куйбышев-Лисичанск» на участке ПК53...ПК58

1 -  $\nu = 1$  сСт; 2 -  $\nu = 10$  сСт; 3 -  $\nu = 100$  сСт; 4 -  $\nu = 300$  сСт.

На кривых хорошо видны точки излома, соответствующие выносу газовоздушного скопления из очередного звена нисходящей плети.

Гидравлические потери при наличии самотечных участков рассчитываются по формуле [18]:

$$h = 0.0826 \cdot \lambda \frac{Q^2}{D^5} \left( l_{\text{ЭКВ}} - \sum_n l_n \right) + \sum_n l_n \sin \alpha_n, \quad (7)$$

где  $l_n$ ,  $\alpha_n$  – длина и угол наклона n-ого самотечного участка в нисходящей плети;

$$l_{\text{ЭКВ}} - \text{эквивалентная длина трубопровода: } l_{\text{ЭКВ}} = \frac{D \cdot \sum \zeta}{\lambda} + L;$$

$L$  – длина участка трубопровода;

$\sum \zeta$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Зависимость гидравлической характеристики МНП «Куйбышев-Лисичанск» на участке ПК53...ПК58 от объема газа, защемленного в нем, показана на рис.3.

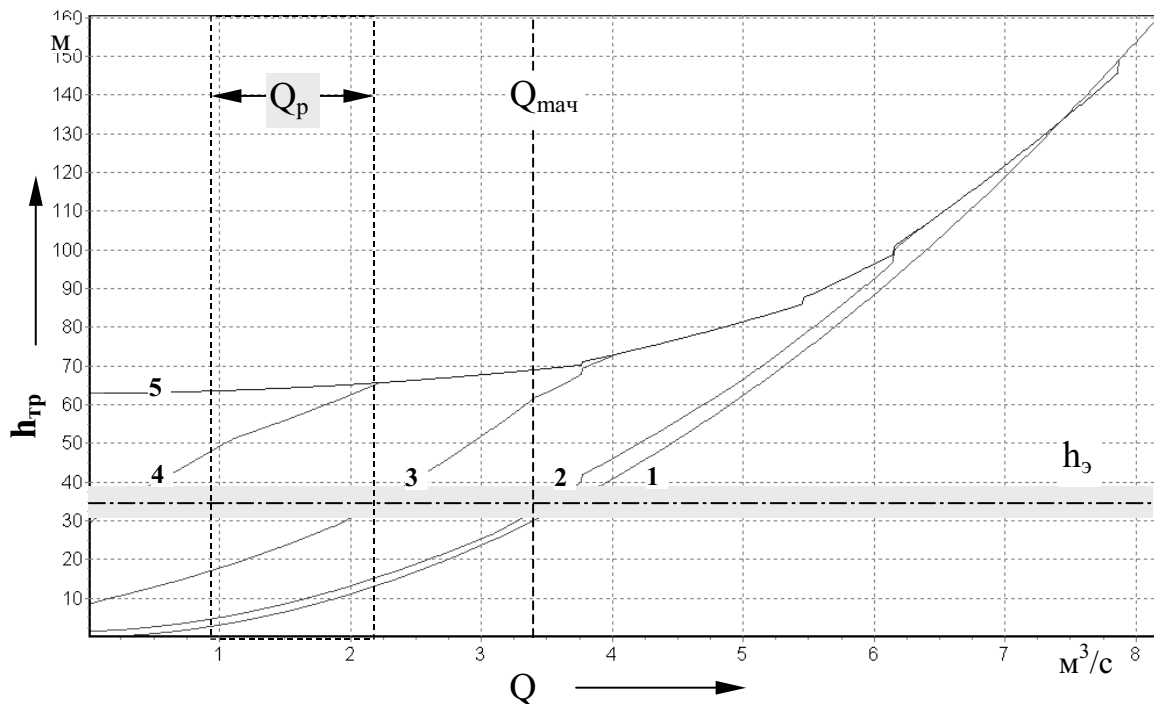


Рис.3 - Характеристика трубопровода с газовыми скоплениями

1 –  $V_r = 0$ ; 2 –  $V_r = 250 \text{ м}^3$ ; 3 –  $V_r = 1250 \text{ м}^3$ ; 4 –  $V_r = 2500 \text{ м}^3$ ; 5 –  $V_r = V_{\text{max}}$ .

В отсутствие газа ( $V_r = 0$ , кривая 1) характеристика трубопровода описывается уравнением Дарси, исходит из начала координат. Кривая 5

описывает характеристику трубопровода при максимальном содержании в нем газа. Характеристика в этом случае начинается со значения перепада нивелирных отметок начала и конца нисходящего участка. Промежуточные значения объемов газа дают характеристики, лежащие в данных пределах. По мере увеличения расхода коэффициент заполнения растет, а излишки газа выносятся потоком жидкости. Они пересекают ось  $Y$  на значениях перепадов нивелирных отметок начала и конца самотечных участков. На них видны отрезки миграции газового пузыря по звеньям нисходящей плети с последующим его выносом при больших расходах.

Регламент эксплуатации участка трубопровода «Куйбышев-Лисичанск» предполагает рабочий диапазон расходов  $Q_p = 3600 \dots 8000 \text{ м}^3/\text{час}$ , или  $1 \dots 2.2 \text{ м}^3/\text{с}$ . В этом диапазоне расходов для участка ПК53..58 возможно защемление  $3500 \dots 2600 \text{ м}^3$  газа при перекачке маловязкой нефти ( $V_r/V_{тр} = 0.46 \dots 0.62$  на рис.2). Однако, данные мониторинга давлений по длине этого участка показывают величину эксплуатационных потерь энергии  $h_s \cong 35 \pm 5 \text{ м}$ , что дает оценку объема газового скопления  $1000 \dots 1250 \text{ м}^3$  (рис.3). Регистрируемая приборами величина перепада давлений на рассматриваемом участке в  $1,5 \dots 3$  раза превышает расчетные гидравлические потери. На восходящих участках трассы эта разница значительно меньше -  $10 \dots 70\%$ . Это приводит к снижению пропускной способности трубопровода в целом до  $60\%$ . Принимая во внимание возможность существования других осложнения эксплуатационных режимов (водные скопления, парафиновые отложения, гофры, грат и пр.), можно оценить дифференциальное влияние газовых скоплений на снижение пропускной способности трубопровода величиной в  $30 \dots 60\%$ .

Максимальная производительность  $Q_{max}$ , обеспечиваемая насосами НМ 10000-210, которыми оборудован МНП «Куйбышев-Лисичанск», составляет  $12500 \text{ м}^3/\text{час} \approx 3,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Рис. 2 иллюстрирует, что при максимальной производительности выносных скоростей достичь невозможно. В этом режиме возможно существование газового скопления  $\approx 0,3 V_{тр}$ . Полностью весь газ из рассматриваемого участка может быть вынесен на производительности  $7.8 \text{ м}^3/\text{с}$  или  $28000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что не может обеспечить ни установленное на трубопроводе насосное оборудование ни прочностные характеристики трубы.



Самую грубую оценку влияния газового скопления на характеристику трубопровода можно получить, суммируя гидравлические потери на восходящих (горизонтальных) участках, посчитанные по формуле Дарси и сумму перепадов высотных отметок на нисходящих участках:

$$O(h_{\Sigma}) = h_{\text{Дарси}} + \Sigma \Delta z_j \quad (8)$$

Если потери превышают оценочное значение, значит газоздушные скопления – не единственный фактор, снижающий пропускную способность участка трубопровода.

Линия распределения давлений вдоль МНП «Куйбышев-Лисичанск» при различных объемах газового скопления на участке ПК53...ПК58 приведены на рис.4.

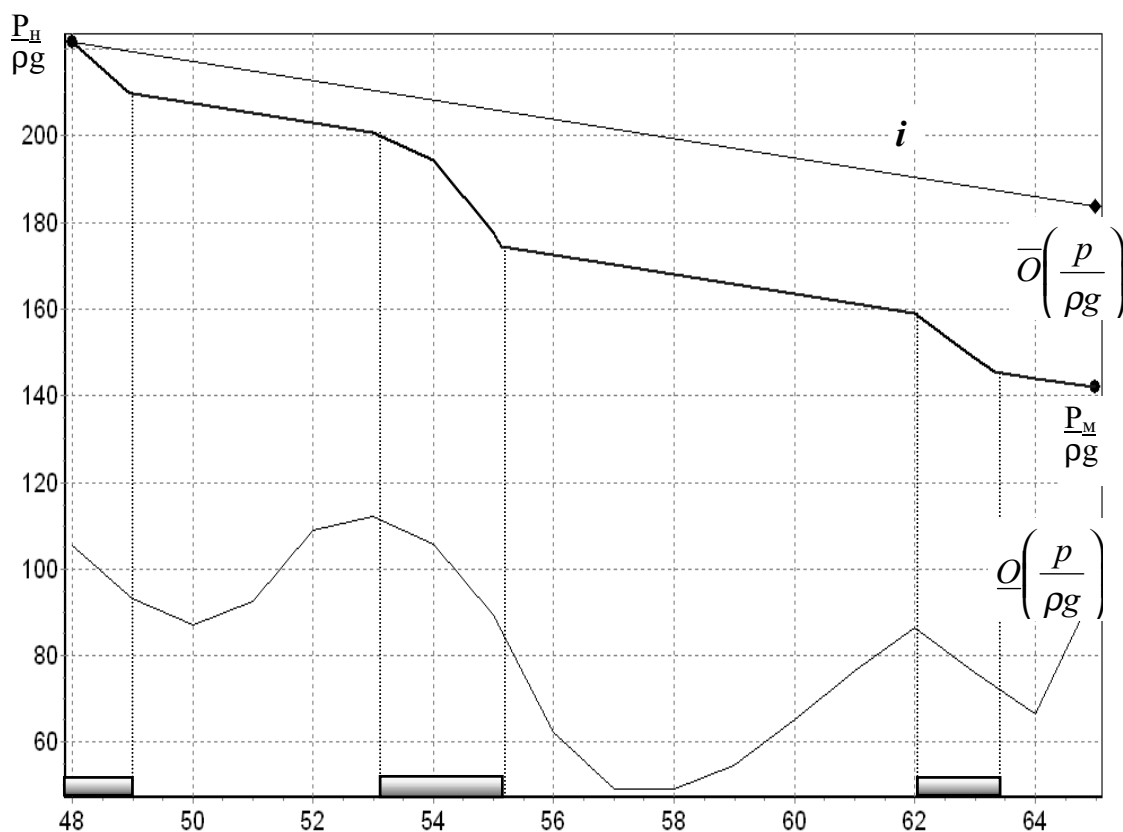



Рис.4 – Распределение давления на участке ПК48...ПК65 МНП «Куйбышев-Лисичанск»

Положение газовых скоплений на трассе показано символом  . Символами  $\bar{O}\left(\frac{p}{\rho g}\right)$ ,  $O\left(\frac{p}{\rho g}\right)$  - отмечены оценки сверху и снизу давления в конце участка трубопровода с газовыми скоплениями.

## ВЫВОДЫ

1. Газовоздушные скопления – одно из характерных осложнений технологических режимов перекачки нефтей и нефтепродуктов, снижающих пропускную способность трубопроводных систем в среднем на 30...60%.
2. Показано, что в современных трубопроводах существуют все условия для образования газовых скоплений. Технологические параметры режимов выноса газовых скоплений из трубопроводов значительно превышают возможности системы, поэтому в регламентах необходимо предусматривать специальные мероприятия и средства по их удалению.
3. Обоснована необходимость мониторинга распределения давлений по длине трубопровода, который позволяет оперативно выявлять газовые скопления для своевременного удаления их из трубы.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Касперович В.К. Экспериментальное исследование условий удаления воды и воздуха из нефтепродуктопроводов. (канд.дисс.) – М.:МИНХ и ГП, 1965.
2. Донец К.Г. Исследование работы нефтепродуктопроводов в период разрыва сплошности потока у перевала. (канд.дисс.) - М.:МИНХ и ГП, 1965.
3. Гольдберг В.Л. Исследование вопросов совместного движения жидкости и газа в горизонтальных и наклонных трубах. (канд.дисс.) - М.:МИНХ и ГП, 1968.
4. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1973. – 280 с.
5. Коробков Г.Е. Движение нефтей и нефтепродуктов в трубопроводах незаполненным сечением. (дисс.канд.техн.наук) – Уфа, 1971. – 167 с.
6. Галлямов А.К. Исследования по повышению эффективности эксплуатации газонефтепроводов. – (дисс.д-ра техн.наук) – Уфа, 1973. – 388 с
7. Мердух М.И. Исследование режимов работы магистральных нефтепроводов, проложенных по резко пересеченной местности. (канд.дисс.) – Уфа, 1976. – 190 с.
8. Нечваль А.М. Динамика образования газовых скоплений в трубопроводах и их удаления потоком перекачиваемой жидкости. (дисс.канд.техн.наук) – Уфа, 1991. – 206 с.
9. Brauner N. Role of Interfacial Shear Modeling in Predicting Stability of Stratified Two-Phase Flow. INVITED Chapter / Encyclopedia of Fluid Mechanics, edited by N.P.Chermisinoff, Vol. 5, “Advances in Engineering Fluid Mechanics: Boundary Conditions Required for CFD Simulation”, 1996. – p. 317-378.
10. Barnea D. A Unified Model for Predicting Flow Pattern Transitions for the Whole Range of Pipe Inclinations. //Int.J.Multiphase Flow.-vol.13,1987.- pp.1-12.

11. Teitel Y., Dukler A.E., Barnea D. Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. //AIChE J., Vol. 26,1980. – pp.345-354.
12. Furukawa H., Ihara M., Takao S., Kohda K. Design of Large-Scale Experimental Facilities for Multiphase Production Systems. //BHRG 6-th International Conference on Multiphase Production. (Cannes, France), 1993.
13. Hewitt G.F. Annular Two Phase Flow. – London: Pergamon Press, 1970.
14. Маслов Л.С. Удаление воды и воздуха из трубопроводов в пусковой период //Строительство трубопроводов. – 1965, № 9.
15. Гигиберия Г.Я. Вопросы гидравлики воздушных включений. /Труды института Энергетики АН Гр.ССР, 1948.
16. Дикаревский В.С. Исследование условий удаления воздушных скоплений из напорных водоводов текущей жидкостью и расстановка приборов для выпуска воздуха на трубопроводах. (Дисс.канд.техн.наук), ЛИИЖТ, 1956 г.
17. Чарный И.А., Иванова Е.Л. Сб. «Транспорт и хранение нефти», №7, ЦНИИТЭнефтегаз, 1963.
18. Тугунов П.И., Новоселов В.Ф. Транспортирование вязких нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам. - М.: Недра, 1973.-88 с.