

УДК 532.582

**О МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ФИЛЬТРА ГРЯЗЕУЛОВИТЕЛЯ**

**ON THE MONITORING OF THE FILTER UNIT (MUD COLLECTOR)  
STATE**

**Жолобов В.В., Варыбок Д.И., Надежкин О.С.**

**Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта,  
г. Москва, Российская Федерация**

**V.V. Zholobov, D.I. Varybok, O.S. Nadezhkin**

**Transneft Research Institute for Oil and Oil Products Transportation,  
Moscow, Russian Federation**

**e-mail: zholobovvv@niitnn.transneft.ru**

**Аннотация.** Вопросы оценки технического состояния индивидуального фильтрующего элемента, имеющего заданную рабочую зону при нормативных условиях, по информационным данным для блока фильтров-грязеуловителей (ФГУ) в целом затрагиваются в нормативной документации. Однако применяемый при этом критерий не предполагает приведения к условиям, сопоставимым с нормативными условиями, и в силу этого не дает однозначной информации о соответствии состояния фильтрующего элемента нормативным требованиям. Основная трудность приведения к нормативному расходу (при отсутствии измерений) заключается в неопределенности расчетной величины индивидуального расхода потоков жидкости по каждому из двух фильтров, находящихся в работе.

В статье определяется рабочая зона блока ФГУ и сформулированы критерии функционирования индивидуального фильтра блока в рабочей

зоне при перекачке с любой производительностью. Расчетные зависимости, позволяющие сделать это, предполагают наличие высокоточных измерений давления (практически недостижимых для применяемых датчиков) на входе и выходе каждого фильтра, суммарного расхода перекачки и индивидуальных гидравлических сопротивлений элементов обвязки узла ФГУ. В качестве альтернативы предложено использовать контрольные измерения при отключенном контуре одного из двух фильтров, находящихся в работе. Критерием приведения к сравнимым условиям принят гидравлический параметр. Получены соответствующие этим условиям зависимости, характеризующие индивидуальное текущее состояние фильтрующих элементов.

**Abstract.** The issue of technical state assessment of the individual filter unit (mud collector), which has certain operating zone according to information data for a Otherwise used for that criteria doesn't demand the reduction of the conditions to those of the reference data and so, doesn't give accurate information about if the state of the filter unit corresponds with the regulatory requirements. The main difficulty with the reduction to the certain required consumption (without having measurements) lies in uncertainty of measuring of the individual liquid current consumption of both operating filters.

In the article the operating diapason of the mud collector is defined and the criteria for operating of the individual filter unit inside the certain operating zone with every kind of efficiency is formulated. Recalculated dependences letting do it suppose the existence of highly-accurate pressure measurement (practically unavailable with the used sensors) on the entrance and exit of every filter unit, combined consumption of dispensing and individual friction of piping fitting elements of the filter unit (mud collector). Alternately, using of control measurements of the both operating filters while one of them is turned off. Hydraulic parameter is taken as a criterion. We got relevant to the control measurements dependences characterizing the individual state of the filter units.

**Ключевые слова:** местное гидравлическое сопротивление, коэффициент сопротивления, гидравлический параметр, фильтрующий элемент, контур фильтрации, расход, перепад давления, рабочая зона

**Key words:** local hydraulic resistance, coefficient of resistance, hydraulic parameter, filter element, the loop filter, consumption, pressure drop, operating diapason

## Введение

Перепад давления на местном сопротивлении, каковым является и фильтр-грязеуловитель, определяется коэффициентом местного гидравлического сопротивления, который зависит от конструктивных параметров устройства, а также скорости и плотности фильтрующейся среды.

Таким образом, в качестве критерия чистоты фильтрующих элементов предпочтительнее использовать коэффициент местного гидравлического сопротивления, а не перепад давления, который зависит от режима движения и физических свойств перекачиваемой среды. Компонентный состав транспортируемой среды играет основную роль в формировании и характеристиках отложений на внутренней стенке трубопровода по адгезии, толщине, прочности и т.д. Механические свойства отложений являются функцией распределения углеводородов разной молекулярной массы, механической примеси и количества нефти, захваченной в кристаллическую структуру парафина. После образования отложений эти параметры изменяются со временем, и происходит затвердевание [1-5]. На величину и характер отложений, их физические и химические свойства заметное влияние могут оказывать технические характеристики и состояние фильтров грязеуловителей. Этот процесс заслуживает особого внимания, так как тесно связан с вопросом периодичности очистки и выбором средств очистки. Как следствие, возникает проблема подбора

очистного устройства [6, 7] для очистки внутренней полости трубопровода. При этом несомненный интерес представляют и бесконтактные системы удаления парафиновых отложений, предполагающие сбалансированность скорости скребка со скоростью удаления парафина [8]. Помимо качества транспортируемой нефти и нефтепродуктов эксплуатационное состояние фильтрующих элементов фильтров-грязеуловителей оказывает заметное влияние и на величину потребляемой при фильтрации электроэнергии. Поэтому важными обстоятельствами выступают своевременная очистка и замена фильтрующих элементов, эксплуатация которых невозможна в рамках принятых нормативов (ограничений) [9].

Рабочий диапазон перепадов давления определяется максимальным «паспортным» перепадом давления  $\Delta P_{th}^{tab}$  (МПа) при чистом фильтрующем элементе и максимальным (допустимым по паспортным или нормативным документам) перепадом давления  $\Delta P_z^{tab}$  при загрязненном фильтрующем элементе. Зная коэффициент местного гидравлического сопротивления чистого фильтра  $\xi_{th}$  и коэффициент сопротивления фильтра с допустимой (нормативной) степенью загрязненности  $\xi_z$ , можно рассчитать «нормативный» перепад давления при произвольном расходе фильтруемого потока. Для замыкания расчетных соотношений «нормативного» перепада давления (фактического коэффициента местного сопротивления  $\xi$ ) требуется определить расходы потоков жидкости, проходящих через каждый фильтр в отдельности. Фактические коэффициенты местного сопротивления  $i$ -х фильтров приводят к простому критерию их функционирования в рабочей зоне  $\xi_{th} \leq \xi_i \leq \xi_z$ .

Критерии позволяют оценивать реальное техническое состояние индивидуальных фильтрующих элементов в блоке ФГУ и дают потенциальную возможность повышения энергоэффективности

функционирования блока на различных режимах перекачки за счет уточнения его рабочего диапазона.

### Рабочая зона ФГУ

Под нормативным перепадом давления понимается перепад давления на фильтре, имеющем нормативный коэффициент местного гидравлического сопротивления. «Паспортное» значение коэффициента местного гидравлического сопротивления ФГУ определяется следующим образом:

$$\xi_{th} = \frac{2 \Delta P_{th}^{tab}}{(\rho w^2)_{tabl}}, \quad \xi_z = \frac{2 \Delta P_z^{tab}}{(\rho w^2)_{tabl}}, \quad \xi_z = \xi_{th} \frac{\Delta P_z^{tab}}{\Delta P_{th}^{tab}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{tabl}$ ,  $w_{tabl}$  – значения плотности и скорости среды в стандартных («стендовых») условиях определения собственного сопротивления фильтра.

Соотношения (1) получены при нормативном расходе  $Q_{tabl}$  и плотности  $\rho_{tabl}$ . Предполагая, что гидравлический коэффициент сопротивления фильтра остается неизменным при любом расходе  $q$  и плотности  $\rho^q$ , получим связь между перепадами давления:

$$\Delta P_{th}^q = \frac{\rho^q}{\rho_{tabl}} \left( \frac{q}{Q_{tabl}} \right)^2 \Delta P_{th}^{tabl}, \quad \Delta P_z^q = \frac{\rho^q}{\rho_{tabl}} \left( \frac{q}{Q_{tabl}} \right)^2 \Delta P_z^{tabl}. \quad (2)$$

По определению рабочая зона фильтра при нормативном объемном расходе и плотности задается неравенством:

$$\Delta P_{th}^{tabl} \leq \Delta P_{ФГУ}^{tabl} \leq \Delta P_z^{tabl}. \quad (3)$$

Для режима с объемным расходом  $q$  при той же степени загрязненности рабочая зона фильтра (3) будет определяться неравенством:

$$\Delta P_{th}^q \leq \Delta P_{ФГУ}^q \leq \Delta P_z^q. \quad (4)$$

Максимальный перепад давления при чистом и загрязненном фильтрующем элементе горизонтальных фильтров-грязеуловителей задается в конструкторской документации завода-изготовителя, что позволяет конкретизировать критерий (3). Для фильтров-грязеуловителей вертикальных приводятся графические характеристики перепада давления на чистом и загрязненном фильтрующем элементе в зависимости от производительности режима и вязкости продукта [10], что дает возможность конкретизировать критерий (4).

Как альтернатива формулам (3) и (4) рабочая зона фильтра может быть представлена следующим образом:

$$\xi_{th} \leq \xi_{\Phi ГУ} \leq \xi_z, \quad (5)$$

где  $\xi_{\Phi ГУ}$  – фактический коэффициент местного гидравлического сопротивления индивидуального фильтра.

Нормативным документом [11] предписывается рабочая область, определяемая неравенством, являющимся математической формализацией пунктов 11.1.6, 11.1.7 указанного документа:

$$\Delta P_{th}^{\kappa} \leq \Delta P_{izm}^{\kappa} \leq \Delta P_{th}^{\kappa} + 8 \cdot 10^4 \text{ Pa} \quad \Delta P_{izm}^{\kappa} = \Delta P_{izm} (Q_{ih}^{\kappa} / Q_{izm})^2, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{th}^{\kappa}$  – перепад давления на чистом фильтре при контрольном испытании на режиме с производительностью  $Q_{th}^{\kappa}$ ;

$\Delta P_{izm}^{\kappa}$  – текущий перепад давления  $\Delta P_{izm}$  при производительности  $Q_{izm}$ , приведенный к производительности  $Q_{th}^{\kappa}$ .

Однако в нормативном документе [11] не оговорена производительность режима перекачки при контрольном испытании, что оставляет большую степень неопределенности. По сути, руководящим документом [11] неявно санкционируется работа фильтров-грязеуловителей вне рабочей зоны, рекомендуемой в конструкторской документации завода-изготовителя. Это обстоятельство неминуемо приводит к излишнему расходу энергии (аналогично дросселированию) и к опасности возникновения недопустимого перепада давления на

фильтрующих элементах при переходе от пониженных режимов перекачки к повышенным. Кроме этого, не факт, что конструкторские и реальные (исполнительские) параметры ФГУ автоматически удовлетворяют условию (6). Например, допустимые перепады давления горизонтального ФГУ (ФГГ-1000-6,3-ПС-Пр-0-Б-УХЛ1), устанавливаемого на нефтепровод диаметром 1020 мм с рабочим давлением 6,3 МПа, повышенной сейсмостойкости, размещаемого в районе с сейсмичностью 9,5 баллов, с правым расположением патрубка подвода нефти, с осевым отводом нефти, не подлежащим теплоизоляции, блочного исполнения, для климатических районов с умеренным и холодным климатом такому условию не удовлетворяют. Максимально допустимое по конструкторской документации значение перепада давления на чистом и загрязненном фильтрующем элементе соответственно 0,03 и 0,10 МПа (для горизонтального ФГУ) [10].

### **Фактический коэффициент местного сопротивления чистого фильтра**

Фактический коэффициент местного сопротивления чистого фильтра при турбулентном течении жидкости на режиме перекачки, соответствующем индексу  $n$ , может быть определен на основе классической зависимости, предполагающей, что взаимным влиянием местных сопротивлений можно пренебречь:

$$\Delta P_n = 0.5 \rho \left[ \xi_{\text{ФГУ}} w_{\text{ФГУ}_n}^2 + \sum_l \xi_l w_{l_n}^2 \right] \quad w_{\text{ФГУ}_n} = \frac{Q_n}{s}, \quad (7)$$

где  $\Delta P_n$  – фактический перепад давления (Н/м<sup>2</sup>) на режиме  $n$ ;

$\xi_l$  – коэффициенты местных гидравлических сопротивлений, находящихся между датчиками давления (кроме фильтра);

$\rho$  – фактическая плотность нефти (кг/м<sup>3</sup>);

$s$  – площадь проходного сечения отводящего патрубка ФГУ (м<sup>2</sup>);

$w_{\text{ФГУ}_n}$ ,  $w_{ln}$  – фактические скорости нефти на режиме перекачки  $n$  после фильтра и после рассматриваемого местного сопротивления  $l$  соответственно (м/сек).

Предполагается, что коэффициенты местных гидравлических сопротивлений не зависят от режима течения жидкой среды. Согласно (7) для определения коэффициента местного гидравлического сопротивления ФГУ  $\xi_{\text{ФГУ}}$  достаточно определить перепад давления при чистом фильтре и любом режиме движения  $n$ . При этом кроме перепада давления должны также фиксироваться производительность режима и плотность фильтрующейся жидкости.

Представляя уравнение (7) в форме соотношения для определения коэффициента местного сопротивления работоспособного ( $\xi_{\text{ФГУ}_{\min}} \geq \xi_{\text{th}}$ ) чистого фильтра и подставляя полученные при проведении измерений значения (с индексом "izm") на режиме  $n$ , получим минимальную нормативную величину коэффициента местного сопротивления индивидуального ФГУ:

$$\xi_{\text{ФГУ}_{\min}} = \frac{1}{(\tilde{w}_{\text{ФГУ}_n}^2)_{\text{izm}}} \left[ \frac{2 \Delta \tilde{P}_n}{\rho} - \sum_l \xi_l \tilde{w}_{ln}^2 \right] \geq \xi_{\text{th}}, \quad (8)$$

где  $\Delta \tilde{P}_n$  – перепад давления (Н/м<sup>2</sup>) при чистом фильтре на режиме  $n$ ;

$\tilde{w}_{\text{ФГУ}_n}$  – скорость нефти в месте расположения второго (по ходу нефти) датчика давления на режиме перекачки  $n$  с чистым фильтром.

$$\xi_{\text{ФГУ}_{\max}} = \xi_{\text{ФГУ}_{\min}} \frac{\Delta P_{\text{ФГУ}_{\max}}}{\Delta P_{\text{ФГУ}_{\min}}} = \xi_{\text{ФГУ}_{\min}} \frac{\xi_z}{\xi_{\text{th}}}. \quad (9)$$

Соотношения (7)-(9) дают возможность подсчитать нижнее и верхнее значения нормативного перепада давления на ФГУ при любом режиме  $n$  работы нефтепровода (и произвольном расположении датчиков давления при условии, что фильтр находится между двумя датчиками).

Если между датчиками отсутствуют другие местные сопротивления, то граничные значение перепада давления в зависимости от



производительности режимов могут быть представлены следующим образом:

$$(\Delta P_n)_{\max} = \frac{(\rho w_{\Phi \Gamma Y_n}^2)_{izm}}{(\rho w^2)_{\text{tabl}}} \Delta P_z \quad (10)$$

$$(\Delta P_n)_{\min} = \frac{(\rho w_{\Phi \Gamma Y_n}^2)_{izm}}{(\rho w^2)_{\text{tabl}}} \Delta P_{th} . \quad (11)$$

Возникает вопрос: обеспечивает ли текущее состояние фильтрующих элементов функционирование каждого фильтра в рабочем диапазоне и какова фактическая (текущая) величина гидравлического сопротивления каждого индивидуального фильтра?

Исходными параметрами являются показатели качества нефти, объемный расход режима перекачки (суммарный расход через пару (блок) работающих фильтров) и перепад давления на каждом фильтрующем элементе, фиксируемые в системе диспетчерского контроля и управления (СДКУ).

Дальнейшее изложение относится к одному из двух блоков. Блок фильтрации состоит из двух контуров: А, В, на каждом из которых находится фильтрующий элемент (фильтр) и два датчика давления, расположенные непосредственно перед фильтром и за фильтром. Параметры, относящиеся к точке разветвления контуров, обозначаются нижним индексом «н», а к точке слияния – нижним индексом «к».

Суммарные коэффициенты местных гидравлических сопротивлений, находящихся на контуре А до фильтра, в составе фильтра и после фильтра, обозначаются соответственно  $\xi_{нА}, \xi_A, \xi_{кА}$ . Для контура В аналогично  $\xi_{нВ}, \xi_B, \xi_{кВ}$ .

Основной трудностью при установлении индивидуального сопротивления двух параллельных контуров является отсутствие измерений индивидуальных расходов жидкости. При наличии показаний четырех датчиков давления формально задача легко решается. Расчетные соотношения имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_A &= 0.5 \xi_A \rho w_A^2; \quad \Delta P_B = 0.5 \xi_B \rho w_B^2; \\ P_{A3} - 0.5 \xi_{AK} \rho w_A^2 &= P_{B5} - 0.5 \xi_{BK} \rho w_B^2; \\ w_B + w_A &= w_Q, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $w_B$ ,  $w_A$  – расходная скорость жидкости в выходном патрубке фильтра на контурах В и А соответственно;

$\Delta P_A$ ,  $\Delta P_B$  – перепад давления на фильтре в контурах А и В, соответственно.

Следует отметить, что требования к точности измерений, необходимые для корректного решения (12), могут превышать возможности применяемых датчиков.

### Гидравлический параметр

Введем в рассмотрение гидравлический параметр  $\chi$ , который связан с коэффициентом местного гидравлического сопротивления  $\xi$  следующим образом:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{\xi}}. \quad (13)$$

С учетом (13) из соотношений (12) получим:

$$\Delta P_A (\xi_{AK} - \xi_{BK}) \chi_A^2 + \xi_{BK} w_Q \sqrt{2\rho\Delta P_A} \cdot \chi_A + \left[ P_{B5} - P_{A3} - \frac{1}{2} \rho \xi_{BK} w_Q^2 \right] = 0.$$

Имея измерения давления и расхода режима перекачки, с помощью этого соотношения и  $\xi_{AK} \neq \xi_{BK}$  гидравлический параметр  $\chi_A$  представляется следующим образом:

$$\chi_A = \frac{w_Q}{(\xi_{AK} - \xi_{BK})} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_A}} \cdot \left\{ \sqrt{\xi_{BK}^2 + (\xi_{AK} - \xi_{BK}) \left[ \xi_{BK} + \frac{2(P_{A3} - P_{B5})}{\rho w_Q^2} \right]} - 1 \right\}. \quad (14)$$

При выполнении условия  $\xi_{AK} = \xi_{BK}$  соотношение (14) приводится к виду:

$$\hat{\chi}_A = \frac{w_Q}{2\xi_{BK}} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_A}} \cdot \left[ \xi_{BK} + \frac{2(P_{A3} - P_{B5})}{\rho w_Q^2} \right].$$

По известной величине  $\chi_A$  и перепаду давления на фильтре контура А вычисляется скорость на выходном патрубке фильтра и связь между гидравлическими параметрами фильтров на контурах А и В:

$$w_A = \sqrt{\frac{2\Delta P_A}{\rho}} \cdot \chi_A,$$

$$w_Q = \sqrt{\frac{2\Delta P_A}{\rho}} \cdot \chi_A + \sqrt{\frac{2\Delta P_B}{\rho}} \cdot \chi_B. \quad (15)$$

Используя связь между перепадом давления  $\Delta P$ , расходом  $Q$ , гидравлическим параметром  $\chi$  и коэффициентом гидравлического сопротивления фильтра  $\xi$ , устанавливают рабочий диапазон значений гидравлического параметра, выход за пределы которого означает либо недопустимое загрязнение, либо разрыв индивидуального фильтрующего элемента:

$$Q_A = \chi_A S \sqrt{\frac{2\Delta P_A}{\rho}}, \quad Q - Q_A = \chi_B S \sqrt{\frac{2\Delta P_B}{\rho}},$$

$$\chi_z = \frac{Q^*}{S} \sqrt{\frac{\rho_{\text{tabl}}}{2\Delta P_z}}, \quad \chi_{\text{th}} = \frac{Q^*}{S} \sqrt{\frac{\rho_{\text{tabl}}}{2\Delta P_{\text{th}}}}, \quad Q^* = w_{\text{tabl}} \cdot S,$$

$$\chi_z \leq \chi_A \leq \chi_{\text{th}}, \quad \chi_z \leq \chi_B \leq \chi_{\text{th}}. \quad (16)$$

где  $\chi_z, \chi_{\text{th}}$  – гидравлический параметр чистого и загрязненного фильтра, соответствующий нормативным перепадам давления при «паспортном» расходе  $Q^*$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения отводящего патрубка.

Точность датчиков, применяемых в данное время в трубопроводном транспорте на узлах ФГУ, не позволяет измерить величину взаимного отклонения  $\Delta P_A$  и  $\Delta P_B$ , что дает основание для формального допущения:

$$\Delta P_A \cong \Delta P_B. \quad (17)$$

При допущении (17) из (16) после простых алгебраических преобразований следует необходимое условие соответствия нормативным требованиям:

$$\beta \Delta P_{th} \leq \Delta P_{izm} \leq \beta \Delta P_z, \quad \beta = \frac{1}{4} \frac{\rho}{\rho_{tabl}} \left( \frac{Q}{Q^*} \right)^2, \quad Q^* < Q \leq 2Q^*. \quad (18)$$

Неравенства (18) устанавливают рабочую область любой пары фильтров с учетом их конструктивных особенностей, заданных в конструкторской документации завода-изготовителя при произвольном режиме перекачки и наработки. Регламентируемый на данный момент критерий  $\Delta P_{th} \leq \Delta P_{izm} \leq \Delta P_z$  совпадает с критерием (18) лишь в одном варианте  $\rho = \rho_{tabl}$ ,  $Q = 2Q^*$ , т.е. на его основе в большинстве случаев нет возможности достоверно оценить состояние рабочих элементов ФГУ.

Соотношения (18), в свою очередь, могут выступать только в качестве необходимого, но не достаточного условия работоспособности узла фильтрации. Так, например предельно засоренный фильтр (фактически отключенный) и фильтр с абсолютно чистым фильтрующим элементом (или полностью разрушенным) согласно этому критерию могут составлять, как показано далее, комбинацию, удовлетворяющую нормативным требованиям к блоку фильтрации. Максимальное значение расхода  $Q_{th}^{max}$  для такой комбинации равно расходу в контуре с чистым фильтрующим элементом при перепаде давления  $(\Delta P)_z$ :

$$Q_{th}^{max} = Q^* \sqrt{\frac{(\Delta P)_z}{(\Delta P)_{th}}}.$$

Таким образом, для расходов перекачки в диапазоне  $Q^* \leq Q \leq Q_{th}^{max}$  нормативные критерии работоспособности блока фильтрации как по максимальному расходу, так и по перепаду давления в рассматриваемом случае будут выполнены при фактическом функциональном отказе обоих фильтрующих элементов. Без специальной расчетной процедуры «скрытый» отказ такого типа, как правило, не будет выявлен и по перепаду давления в условиях отключения одного из фильтрующих контуров.

Применение необходимых и достаточных условий работоспособности фильтра (16) предполагает установку высокоточных датчиков давления.

Способ, рассмотренный в [9] может быть применен только при наличии информации по перепаду давления на всех парных комбинациях работы фильтрующих элементов, что требует большого числа переключений. Переход к пониженному режиму фильтрации и измерение перепада давления на пониженном режиме перекачки с двумя подключенными контурами в совокупности с информацией по перепаду давления в исходном режиме не дают возможности оценки распределения потоков между двумя контурами фильтрации.

Наиболее приемлемым является вариант периодического перехода на пониженный режим, с отключением одного из контуров во время работы трубопровода на пониженном режиме перекачки  $Q_{pn} \leq Q^*$ , что формально дает возможность получения адекватного значения гидравлического параметра  $\chi$  включенного контура.

### **Фильтрация с одним подключенным контуром**

Корректное применение этого способа, в свою очередь, требует выявления критерия безопасного перехода на режим фильтрации с одним подключенным контуром. Не останавливаясь на этом обстоятельстве, примем для определенности, что отключают контур В, тогда с учетом (16) приходим к следующим расчетным соотношениям:

$$\chi_A = \frac{Q_A}{S} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_{izm}}}, \quad \chi_B = \frac{Q - Q_A}{S} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_{izm}}}, \quad Q_A = Q_{pn} \sqrt{\frac{\Delta P_{izm}}{(\Delta P)_{pn}}},$$

$$\chi_z \leq \chi_A \leq \chi_{th}, \quad \chi_z \leq \chi_B \leq \chi_{th}, \quad Q_{pn} \leq Q^*. \quad (19)$$

Неудобство применения (19) в качестве критерия заключается в необходимости пересчета показаний манометра на блоке ФГУ. Поэтому с учетом (16) предпочтительно представить (19) в форме, использующей непосредственно измеряемые величины. Проведя соответствующие преобразования, представим (19) в виде:

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{табл}}} \left( \frac{Q_{pn}}{Q^*} \right)^2 \cdot \Delta P_{th} \leq (\Delta P)_{pn} \leq \frac{\rho}{\rho_{\text{табл}}} \left( \frac{Q_{pn}}{Q^*} \right)^2 \cdot \Delta P_z \quad (20)$$

$$\left( \frac{Q}{Q^*} \right)^2 \left[ 1 + \frac{Q_{pn}}{Q^*} \sqrt{\frac{\rho(\Delta P)_{th}}{\rho_{\text{табл}}(\Delta P)_{pn}}} \right]^{-2} \cdot \Delta(P)_{th} \leq (\Delta P)_{izm} \leq \left( \frac{Q}{Q^*} \right)^2 \left[ 1 + \frac{Q_{pn}}{Q^*} \sqrt{\frac{\rho(\Delta P)_z}{\rho_{\text{табл}}(\Delta P)_{pn}}} \right]^{-2} \cdot \Delta P_z.$$

Оценки с использованием соотношений (20) показывают, что нормативный документ [11] фактически не запрещает «скрытое дросселирование» до 0,08 МПа, а при переходе к повышенному режиму перекачки на ФГУ возможна реализация перепадов давления до 0,40 МПа. На рисунке 1 показан вариант пограничных значений перепада давления на узле фильтров согласно критериям (18) и (20) в зависимости от суммарного расхода при контрольном измерении с параметрами  $Q_{pn} = 0.8 \cdot Q^*$ ,  $(\Delta P)_{pn} = 0.64 \cdot (\Delta P)_{th}$ , что соответствует чистому фильтру в контуре А. Для удобства графического представления использованы относительные величины  $\hat{Q} = Q/Q^*$ ,  $(\hat{\Delta P})_{izm} = (\Delta P)_{izm}/(\Delta P)_z$ .

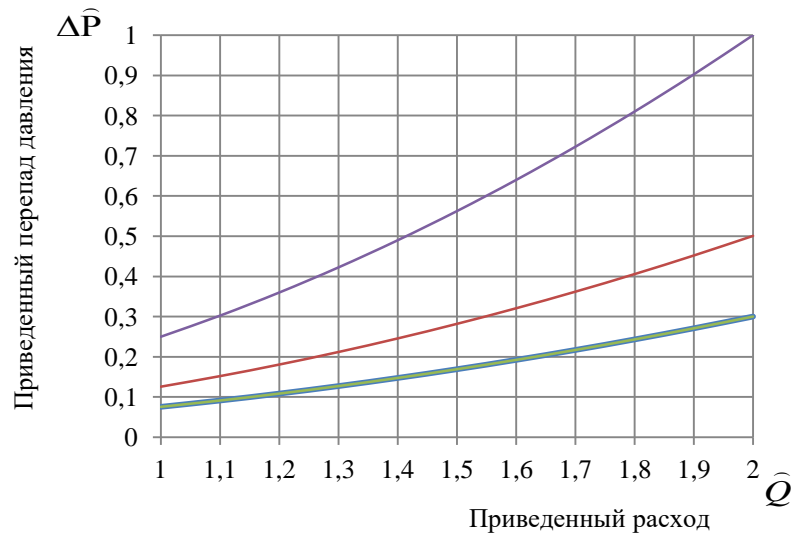


Рисунок 1. Диапазон соответствия состояния фильтрующих элементов нормативным требованиям

Первая сверху кривая, согласно допущению  $\chi_A = \chi_B$ , соответствует равномерному распределению потоков  $\hat{Q}_A = \hat{Q}_B$ , а вторая – приведенным к нормативному расходу параметрам:  $\hat{Q}_A = 1.3$ ,  $\hat{Q}_B = 0.7$ ,  $(\Delta P)_{izm} = 0.5$ , что

соответствует контрольному измерению на контуре А:  $\hat{Q}_{pn} = 0.8$ ,  
 $(\Delta P)_{pn} = 0.192$ .

Представленные результаты иллюстрируют существенную зависимость верхнего пограничного значения от распределения потоков по контуру А и В.

Надежность фильтра – это не только отсутствие внезапных отказов, но и отсутствие предпосылок (постепенных отказов), которые можно интерпретировать как отклонения от расчетных параметров функционирования. В связи с этим обстоятельством поиск уточненных критериев для оценки технического состояния фильтрующих элементов, помимо теоретического интереса, представляет и практический интерес. Использование результатов контрольного измерения в принципе позволяет улучшить прогнозную оценку состояния фильтрующих элементов. Технологически своевременное устранение предпосылок может предупредить внезапный отказ.

Сравнение с приведенным ранее примером показывает, что предпосылка ненормативного состояния узла фильтрации по критерию (20) будет диагностирована значительно раньше (при перепаде  $(\Delta \hat{P})_{izm} \approx 0.5$ ), чем по критерию (18) (при перепаде  $(\Delta \hat{P})_{izm} \approx 1$ ). Однако нужно иметь в виду, что в нормальных условиях эксплуатации возможна реализация механизма самостабилизации (более интенсивный поток вызывает более интенсивное засорение). Исходя из принципа реализации варианта, обеспечивающего минимальную суммарную потерю мощности, также следует отдать предпочтение равномерному распределению  $\hat{Q}_A = \hat{Q}_B$  потоков по рабочим контурам фильтра.

## Результаты и обсуждения

При невозможности проведения контрольных измерений на одном из рабочих контуров фильтра следует руководствоваться предположением о равномерном распределении потоков и вытекающими из этого допущения расчетными формулами. Вне зависимости от характера распределения потоков жидкости по рабочим контурам узла фильтрации оценка прогнозного состояния фильтрующих элементов должна быть проведена с учетом фактического расхода перекачки. Иначе возможно проявление предпосылок в виде «внезапного выхода» перепада давления из нормативного диапазона при переходе к повышенному режиму перекачки. Оценка величины возможного превышения получена из условия  $\chi_{AB} = \text{const}$ . На рисунке 2 приведено отклонение перепада давления  $\delta = (\Delta\hat{P}) - 1$  от его нормативного значения  $\delta = 0$  при увеличении расхода перекачки от текущего значения до величины  $\hat{Q}^{\max} = 2$  и величине перепада давления до изменения расхода  $(\Delta\hat{P})_{izm} = 0.5$ .

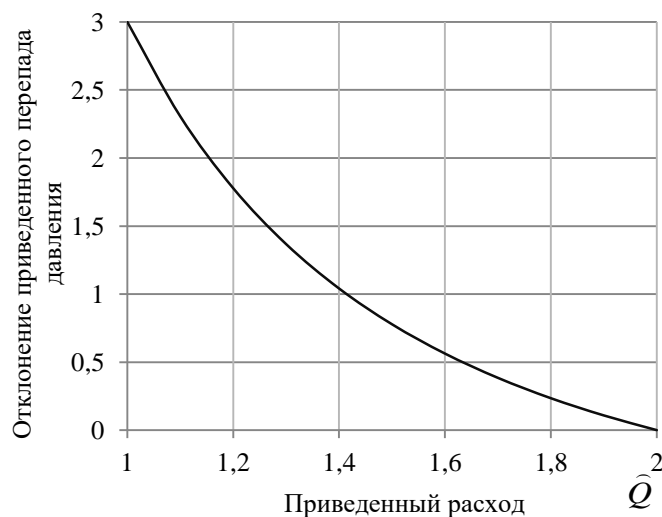


Рисунок 2. Возможное превышение нормативного перепада давления

Такой тип «проявленного» отказа может быть легко установлен по ретроспективным данным СДКУ. Подобной предпосылки отказа можно



избежать путем упреждающей очистки или предварительным переходом на запасную пару фильтров.

Возможность повышения энергоэффективности устанавливают в результате экономического расчета.

Следует отметить, что предположение о независимости коэффициента гидравлического сопротивления фильтра от режима перекачки существенно упрощает все приведенные выше зависимости, но не является обязательным при выводе критерия. Процедура получения критерия не изменится, лишь приведет к более громоздким промежуточным и конечным соотношениям, если предположить, что  $\xi = a Re^m \neq const$ , где  $m$ ,  $a$  – постоянные величины, отражающие конструктивные особенности фильтрующего элемента и фильтруемой жидкости.

## **Выводы**

Организационные меры и математическая обработка данных СДКУ по давлению и расходу позволят осуществить корректный мониторинг величины индивидуального гидравлического параметра и установить обоснованные границы рабочей зоны блока ФГУ при произвольном режиме перекачки.

## **Список используемых источников**

1. Singh P., Venkatesan R., Fogler H.S., Nagarajan N.R. Morphological Evolution of Thick Wax Deposits during Aging // AIChE Journal. 2001. No. 47 (1). P. 6-18. URL: <http://hdl.handle.net/2027.42/34242>.

2. Cordoba A.J., Schall C.A. Solvent Migration in a Paraffin Deposit // Fuel. 2001. Vol. 80. P. 1279-1284.

3. Cordoba A.J., Schall C.A. Application of a Heat Transfer Method to Determine Wax Deposition in a Hydrocarbon Binary Mixture // Fuel. 2001. Vol. 80. P. 1285-1291.

4. Жолобов В.В., Савинов С.А., Варыбок Д.И., Гильмутдинов Н.Р. Определение границ участков с отложениями парафина на стенках трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 1 (21). С. 21-29.

5. Казанцев М.Н., Тимофеев Ф.В., Замалаев С.Н., Гильманов М.Р. Методы обнаружения, предотвращения образования и удаления асфальтосмолопарафиновых отложений на магистральных трубопроводах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 3 (23). С. 50-56.

6. Бабинцева Т.В., Майзель И.Г. Исследование конструктивных и технологических параметров процесса очистки внутренней поверхности трубопроводов от отложений // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 3 (11). С. 86-91.

7. Wang Q., Sarica C., Chen T.X. An Experimental Study on Mechanics of Wax Removal // Pipeline. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-71544-MS. New Orleans, Louisiana. 30 September – 3 October, 2001. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/71544-MS>.

8. Southgat J. Wax Removal Using Pipeline Pigs: PhD thesis. University of Durham, UK, 2004. 269 p.

9. Жолобов В.В., Варыбок Д.И. Идентификация динамики гидравлического параметра фильтра грязеуловителя по данным СДКУ // Трубопроводный транспорт – 2016: матер. XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. С. 24-25.

10. ОТТ-75.180.00-КТН-179-10. Фильтры-грязеуловители. Общие технические требования. С изм. № 4 от 18.01.2017. М., 2017. 92 с.

11. РД-75.200.00-КТН-119-16. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Техническое обслуживание и ремонт механо-технологического оборудования и сооружений НПС. 2016. 362 с.

## References

1. Singh P., Venkatesan R., Fogler H.S., Nagarajan N.R. Morphological Evolution of Thick Wax Deposits during Aging. *AIChE Journal*, 2001, No. 47 (1), pp. 6-18. URL: <http://hdl.handle.net/2027.42/34242>.
2. Cordoba A.J., Schall C.A. Solvent Migration in a Paraffin Deposit. *Fuel*, 2001, Vol. 80, pp. 1279-1284.
3. Cordoba A.J., Schall C.A. Application of a Heat Transfer Method to Determine Wax Deposition in a Hydrocarbon Binary Mixture. *Fuel*, 2001, Vol. 80, pp. 1285-1291.
4. Zholobov V.V., Savinov S.A., Varybok D.I., Gil'mutdinov N.R. Opredeleniye granits uchastkov s otlozheniyami parafina na stenkakh truboprovoda [Determination of Limits of Sections with Paraffin Deposits on Pipeline Walls]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov – Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, No. 1 (21), pp. 21-29. [in Russian].
5. Kazantsev M.N., Timofeyev F.V., Zamalayev S.N., Gil'manov M.R. Metody obnaruzheniya, predotvrashcheniya obrazovaniya i udaleniya asfal'tosmoloparafinykh otlozheniy na magistral'nykh truboprovodakh [Methods of Detection, Elimination and Formation Prevention of Asphalt, Resin and Paraffin Deposits in Main Oil Pipelines]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov – Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, No. 3 (23), pp. 50-56. [in Russian].
6. Babintseva T.V., Mayzel' I.G. Issledovaniye konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov protsessa ochildki vnutrenney poverkhnosti truboprovodov ot otlozheniy [The Study of Design and Technological Parameters of the Process of Cleaning the Interior Surfaces of Pipes Deposits]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov – Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2013, No. 3 (11), pp. 86-91. [in Russian].

7. Wang Q., Sarica C., Chen T.X. An Experimental Study on Mechanics of Wax Removal. *Pipeline. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-71544-MS*. New Orleans, Louisiana, 30, September – 3, October, 2001. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/71544-MS>.

8. Southgat J. *Wax Removal Using Pipeline Pigs: PhD thesis*. University of Durham, UK, 2004. 269 p.

9. Zholobov V.V., Varybok D.I. Identifikatsiya dinamiki gidravlicheskogo parametra fil'tra gryazeulovatelya po dannym SDKU [Identification of the Dynamics of the Filter Mud-Box Hydraulic Parameter According to the SDKU Data]. *Materialy XI Mezhdunarodnoy uchebno-nauchno-prakticheskoy konferentsii «Truboprovodnyy transport – 2016»* [Materials of the XI International Training, Scientific and Practical Conference «Pipeline Transportation – 2016»]. Ufa, UGNTU Publ., 2016, pp. 24-25. [in Russian].

10. OTT-75.180.00-KTN-179-10. *Fil'try-gryazeuloviteli. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. S izm. № 4 ot 18.01.2017* [OTT-75.180.00-KTN-179-10. Filters-Mud Collectors. General Technical Requirements. With Changes. No. 4 dd. 18.01.2017]. Moscow, 2017. 92 p. [in Russian].

11. RD-75.200.00-KTN-119-16. *Magistral'nyy truboprovodnyy transport nefti i nefteproduktov. Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont mekhanotekhnologicheskogo oborudovaniya i sooruzheniy NPS* [RD-75.200.00-KTN-119-16. Trunk Pipeline Transport of Oil and Oil Products. Maintenance and Repair of Mechanical and Technological Equipment and Structures of the NPS]. 2016. 362 p. [in Russian].

## **Сведения об авторах**

### **About the author**

Жолобов В.В., д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сопровождения программных комплексов ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация

V.V. Zholobov, Doctor of Physical and Mathematical Science, Leading Research Associate of the Laboratory of Escorts Software Complexes, Transneft Research and Development Institute for Oil and Oil Products Transportation (Transneft R&D), LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: zholobovvv@niitnn.transneft.ru

Варыбок Д.И., ведущий научный сотрудник лаборатории технологических расчетов ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация

D.I. Varybok, Leading Research Associate of the Laboratory of Technological Calculations, Transneft Research and Development Institute for Oil and Oil Products Transportation (Transneft R&D), LLC, Moscow, Russian Federation

Надежкин О.С., ведущий научный сотрудник лаборатории технологических расчетов ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация

O.S. Nadezhkin, Leading Research Associate of the Laboratory of Technological Calculations, Transneft Research and Development Institute for Oil and Oil Products Transportation (Transneft R&D), LLC, Moscow, Russian Federation