

УДК 622.692.4

М.В. Лурье, д.т.н., профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия), e-mail: lurie254@gubkin.ru; **М.Н. Федосеев**, магистр, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия), e-mail: fedoseyev.m@gmail.com

Сопоставление эффективности действия систем сглаживания волн давления и газовых колпаков

Во многих случаях аварийные ситуации в магистральных нефтепроводах обусловлены волнами повышенного давления, возникающими в трубопроводе при изменении расхода перекачки. Известно, что торможение потока на 1 м/с влечет за собой увеличение давления примерно на 1 МПа, т.е. на 10 атм. Вот почему на многих нефтепроводах, транспортирующих нефть со скоростями до 3,5 м/с, устанавливают системы защиты от гидравлического удара. В статье дается сопоставление двух систем защиты магистрального нефтепровода от волн повышенного давления: первой – системы сглаживания волн давления (ССВД) и второй – газового колпака (КГ), устанавливаемых перед нефтеперекачивающей станцией с целью уменьшения скорости увеличения давления при экстренном отключении станции. Причем в качестве газового колпака рассматривался горизонтальный отрезок трубопровода, закрытый с одного конца и свободно сообщаемый с нефтепроводом другим концом, частично заполненный газом (например, азотом). Для проведения расчетов был использован метод математического моделирования переходных процессов в трубопроводе с установленными системами защиты. Каждая из рассматриваемых систем настраивалась таким образом, чтобы обеспечить примерно одинаковый эффект уменьшения скорости роста давления, после чего сравнивались двойной объем нефти, перепускаемой в специальную сбросную емкость в случае использования ССВД, и необходимый объем газовой полости КГ в случае использования колпака. Расчетами показано, что во всех сравниваемых случаях эти параметры примерно одинаковы и, следовательно, предпочтение той или иной системы защиты определяется приведенными затратами на сооружение и эксплуатацию каждой.

Ключевые слова: нефтепровод, авария, волны, гидравлический удар, защита, система сглаживания волн давления, газовый колпак.

M.V. Lurye, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia), Doctor of Science, Professor, e-mail: lurie254@gubkin.ru; M.N. Fedoseyev, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia), Master of Science (Engineering), e-mail: fedoseyev.m@gmail.com

Effectiveness comparison of surge reduction systems and gas accumulators

Emergencies during operation of trunk pipelines often come from surge waves arising as a result of flow rate change. 1 m/s of flow speed deceleration is known to create a surge wave with amplitude of 1 MPa. That is why a lot of pipelines operating with flow speed up to 3.5 m/s are equipped with surge protection systems. The paper studies a comparison of two different protection systems used to reduce effect of surge waves on main pipeline facilities. Reviewed systems are gas accumulators and surge reduction systems. Both types of protection devices are usually installed in the upstream pipeline of pumping station in order to reduce sharp pressure increase in case of pump station shutdown/control valve closure. A closed pipeline section partially filled with rare gas (e.g. nitrogen) and freely connected to the protected pipeline is considered as a gas accumulator. In order to perform a specified research has been implied a method of mathematical modeling of transient flow of incompressible fluid. Each of the compared systems had been set to maintain equal rate of pressure increase, after that doubled volume of required drain tank for surge reduction system and volume of gas accumulator were compared. It is shown that in each case the compared parameters are equal; therefore choice of preferred protection system should be determined by comparison of additional economic indicators.

Keywords: pipeline, accident, hydraulic shock, surge wave, protection, surge reduction system, gas cap.

Во многих случаях аварийные ситуации в магистральных нефтепроводах обусловлены волнами повышенного давления, возникающими в трубопрово-

де при изменении расхода перекачки: торможение потока нефти в трубе вызывает увеличение давления, а ускорение – волны разрежения. Известно,

что торможение потока на 1 м/с влечет за собой увеличение давления примерно на 1 МПа, т.е. на 10 атм. Поэтому на многих нефтепроводах, транспорти-

рующих нефть со скоростями 2–3 м/с, устанавливают системы защиты от волн гидравлического удара.

Чаще всего в качестве систем защиты используют предохранительные клапаны (КП) или системы сглаживания волн давления, обеспечивающие частичный отвод нефти из внутренней полости трубопровода в специальную сбросную емкость [1–3]. Предохранительные клапаны обеспечивают сброс нефти в случае, если давление в трубопроводе превысит разрешенное давление на определенную величину уставки. Системы сглаживания волн давления также отводят нефть из трубопровода в сбросную емкость, но только в том случае, если скорость увеличения давления превышает максимально разрешенную. В последнем случае сброс нефти прекращается, как только давление в трубопроводе стабилизируется. В этом отношении ССВД выгодно отличаются от КП, у которых сброс нефти в емкость не прекращается до тех пор, пока давление в трубопроводе выше разрешенного. Известны также газовые колпаки, используемые главным образом для сглаживания высокочастотных колебаний давления [4–9]. Газовый колпак представляет собой замкнутую емкость, частично заполненную инертным газом (например, азотом) и свободно сообщаемую с нефтепроводом. При этом первоначальное давление в газовой полости КГ равно давлению в нефтепроводе в том сечении, в котором к нему присоединен колпак. При увеличении давления в нефтепроводе часть транспортируемой нефти уходит в колпак, сжимая находящийся в нем газ, и благодаря этому давление в нефтепроводе уменьшается. Л.В. Полянская, выполнившая под руководством проф. И.А. Чарного всестороннее исследование, касающееся использования газовых колпаков в качестве средства защиты нефтепровода от резкого увеличения давления при отключении нефтеперекачивающей станции (НПС), показала, что КГ может защищать трубопровод, однако объем

колпака для этого должен быть весьма значительным и составлять не менее 100–200 м³ [8]. Естественно, что такой результат несколько охладил энтузиазм специалистов к этой идее, и большинство из них сосредоточилось на использовании других средств защиты, в частности ССВД. Однако позже появилось предложение проф. В.Ф. Новоселова и Ю.В. Крылова использовать в качестве газового колпака протяженный отрезок нефте- или газопровода, наглухо закрытый с одного конца и свободно сообщаемый с нефтепроводом другим своим концом [9]. Такой отрезок трубы может быть безопасно заполнен газом (например, азотом) под давлением 0,5–1,0 МПа и, следовательно, может играть роль газового колпака. Следует отметить, что ССВД и газовый колпак в определенном смысле представляют собой родственные устройства. Оба имеют в своем составе газовые аккумуляторы, которые обеспечивают уменьшение темпа нарастания давления. В газовых колпаках это газовая полость колпака, которая принимает определенный объем транспортируемой нефти непосредственно внутрь себя. В ССВД имеется такой же газовый колпак (называемый газовым аккумулятором), однако установлен он в линии управления сбросным клапаном, а конкретней, газовый аккумулятор установлен на одной из параллельных линий системы управления защитного устройства, по которой нефть (или заменяющая ее специальная разделительная жидкость – гликоль) поступает к сбросному клапану. Поскольку газовый аккумулятор уменьшает темп нарастания давления в линии, на которой он установлен, по разные стороны запорного органа сбросного клапана возникает разность давлений. От этой разности зависит, когда и насколько открывается сбросной клапан и сколько долго будет происходить перепуск нефти из нефтепровода в сбросную емкость [3]. Резюмируя изложенное, можно сказать, что КГ – это достаточно простое

и сравнительно недорогое устройство, однако для его использования в качестве средства защиты магистрального нефтепровода от волн повышенного давления необходимо иметь КГ достаточно большого объема. В то же время ССВД – это хотя и компактное, но достаточно дорогое и сложное устройство, требующее, помимо всего прочего, сооружения специальной емкости для частичного отвода нефти из трубопровода и последующего ее возвращения в нефтепровод.

Правомочен вопрос, какое средство защиты лучше: сравнительно дешевый газовый колпак, хотя и больших размеров, или компактная, но дорогостоящая ССВД, требующая притом сооружения дополнительного резервуара? Ниже дается сравнительный анализ параметров той и другой систем защиты, обеспечивающих примерно одинаковый эксплуатационный эффект.

ЗАЩИТА НЕФТЕПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ССВД

Работа ССВД иллюстрируется схемой, представленной на рисунке 1 [9]. Одна из полостей сбросного клапана 5 соединена с газовым аккумулятором 4, частично заполненным газом, частично – разделительной жидкостью. По сути, газовый аккумулятор является газовым колпаком, установленным внутри управляющего устройства ССВД. Давление $p_{ак}$ в этой полости сбросного клапана равно давлению в аккумуляторе и, следовательно, давлению на выходе дросселя 3.

Другая полость сбросного клапана 5 соединена напрямую с нефтепроводом, поэтому давление на входе в регулировочный дроссель 3 равно давлению p_n в нефтепроводе. Разделительная емкость 2 предназначена для того, чтобы заменить нефть другой рабочей жидкостью (гликолем).

Таким образом, между изолированными друг от друга полостями клапана 5 возникает разность давлений $\Phi = p_n - p_{ак}$, которая равна разности давлений меж-

Ссылка для цитирования (for references):

Лурье М.В., Федосеев М.Н. Сопоставление эффективности действия систем сглаживания волн давления и газовых колпаков // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 9. С. 106–110.

Lurye M.V., Fedoseyev M.N. Effectiveness comparison of surge reduction systems and gas accumulators (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 9. P. 106–110.

ду входом и выходом регулирующего дросселя 3.

В стационарном состоянии эта разность давлений равна нулю, поэтому равна нулю и разность давлений в полостях сбросного клапана, следовательно, сбросной клапан закрыт, и перепуск нефти из трубопровода в резервуар не происходит.

При увеличении давления p_n в нефтепроводе разность давлений $p_n - p_{ак}$ между полостями сбросного клапана становится отличной от нуля, поскольку часть разделительной жидкости поступает из емкости 2 в газовый аккумулятор 4, где сжимается находящийся там газ. Если эта разность превысит пороговое значение $\Phi_{пор.}$, то сбросной клапан откроется и начнется сброс нефти из трубопровода в резервуар 6. Постепенно газ, находящийся в аккумуляторе, сжимается, и разность $\Phi = p_n - p_{ак}$ давлений уменьшается. Когда она станет меньше порогового значения, клапан закроется, и сброс нефти прекратится. Однако до тех пор, пока эта разность превышает пороговое значение, клапан открыт, и через него происходит сброс нефти в резервуар. Скорость изменения разности $\Phi(t)$ давлений и, следовательно, условие открытия клапана, зависит от начальных значений V_0, p_0 объема и давления газа в газовом аккумуляторе, а также от расхода $q_{ж.}$ поступающей в него разделительной жидкости; последнюю можно регулировать с помощью дросселя 3.

Математическая модель ССВД подробно изложена в [4, 10]. Согласно этой модели, наличие ССВД, установленной в сечении $M(x_0)$ перед нефтеперекачивающей станцией, учитывается в уравнениях неустановившегося течения нефти в трубопроводе

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda(Re, \epsilon) \frac{1}{d} \frac{\rho_0 u |u|}{2} - \rho_0 g \frac{dz}{dx} \end{cases} \quad (1)$$

в виде внутренних условий сопряжения, связывающих параметр течения до и после рассматриваемого сечения $M(x_0)$

$$\begin{cases} p_M^{(+)} = p_M^{(-)} = p_M, \\ u_M^{(+)} - u_M^{(-)} = \frac{4q_{сб.}}{\pi d^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $q_{сб.}$ – расход сброса жидкости из нефтепровода в резервуар. Эти условия означают непрерывность давления и разрыв скорости течения в месте подключения ССВД. Расход сброса $q_{сб.} = 0$, если клапан ССВД закрыт, и $q_{сб.} > 0$, если клапан открыт.

Расход $q_{сб.}$ (m^3/c) определяется избыточным давлением $p_M - p_{атм.}$ (Па) нефти в нефтепроводе и степенью открытия клапана, которая, в свою очередь, зависит от разности $\Phi = p_M - p_{ак.}$ давлений p_M в нефтепроводе и $p_{ак.}$ в пневматическом аккумуляторе. Иными словами:

$$q_{сб.} = \frac{\pi d_{отв.}^2}{4} k_{кл}(\Phi) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_M - p_{атм.})}{\rho_0}}, \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность нефти (kg/m^3); $k_{кл}$ – безразмерный коэффициент сопротивления перепускного клапана (например, клапана типа «Дан-Фло», «Флекс-Фло» или др.); $d_{отв.}$ – диаметр отвода из нефтепровода в сбросной резервуар, на котором установлена ССВД. Подчеркнем еще раз, что особенно важно учитывать зависимость коэффициента $k_{кл}$ от степени открытия сбросного клапана ССВД, т.е. от разности Φ давлений в нефтепроводе и в газовом аккумуляторе.

Математическая модель управляющего органа ССВД сводится к системе алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} q_{др.} = k_{др.} \cdot \sqrt{\frac{2|\Phi|}{\rho_1}} \cdot \text{sign}\Phi, \\ \frac{dV}{dt} = -q_{др.}, \\ \frac{d(\rho_r V)}{dt} = 0, \\ p = Z \cdot \rho_r R T, \end{cases} \quad (4)$$

где $q_{др.}$ – расход жидкости (m^3/c), перетекающей через дроссель 3 (рис. 1); $\Phi = p_M(t) - p_{ак.}(t)$ – разность давлений на дросселе, а также в нефтепроводе и клапане ССВД (Па); $k_{др.}$ – размерный (m^2) коэффициент сопротивления дросселя; V, ρ_r – текущий объем и плотность газа в газовой полости системы ($m^3, kg/m^3$); ρ_1 – плотность разделительной жидкости (kg/m^3); R – газовая постоянная (Дж/кг·К); T – абсолютная температура (К); Z – коэффициент сжимаемости газа ($Z \approx const.$); sign – знак ($\text{sign}\Phi = 1$, если $\Phi \geq 0$ и $\text{sign}\Phi = -1$, если $\Phi < 0$). Первое уравнение определяет зависимость

расхода разделительной жидкости через дроссель 3 от перепада давлений на нем, второе – динамику изменения газового объема, третье – выражает закон сохранения массы газа, четвертое – уравнение состояния газа. Если учесть постоянство массы газа в газовом аккумуляторе ССВД и считать процесс сжатия газа изотермическим, то система уравнений (4) сводится к одному обыкновенному дифференциальному уравнению, связывающему перепад $\Phi(t)$ давлений по разные стороны манжеты сбросного клапана с текущим давлением $p_M(t)$ нефти в нефтепроводе:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{dp_M}{dt} - \frac{k_{др.}}{\rho_0 V_0} \cdot \frac{(p_M - \Phi)^2}{\rho_1} \cdot \sqrt{\frac{2}{|\Phi|}} \cdot \text{sign}\Phi, \quad (5)$$

где p_0, V_0 – значения начального давления и объема газа в газовом аккумуляторе ССВД [10].

ЗАЩИТА НЕФТЕПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ГАЗОВЫХ КОЛПАКОВ

Газовый колпак 2 (рис. 2) представляет собой слегка наклоненный участок трубопровода, частично заполненный газом (например, азотом), свободно сообщаящийся с магистральным нефтепроводом 1. В стационарном состоянии давление газа в КГ равно давлению нефти в сечении M , в котором он присоединен к нефтепроводу, поэтому нефть не поступает в полость колпака. При увеличении давления p_n в нефтепроводе газ в полости КГ сжимается, и часть нефти перетекает из полости нефтепро-

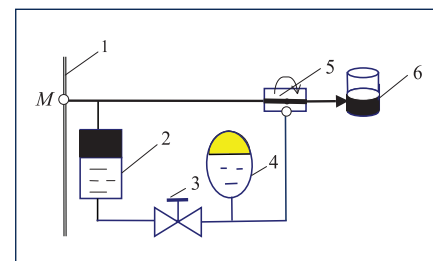


Рис. 1. Принципиальная схема ССВД: 1 – магистральный нефтепровод; 2 – разделительная емкость; 3 – регулируемый дроссель; 4 – газовый аккумулятор; 5 – сбросной клапан; 6 – резервуар для сброса нефти
Fig. 1. A surge reduction system principal diagram: 1 – main oil pipeline; 2 – clarifier; 3 – control choke; 4 – gas storage tank; 5 – relief valve; 6 – oil collection tank

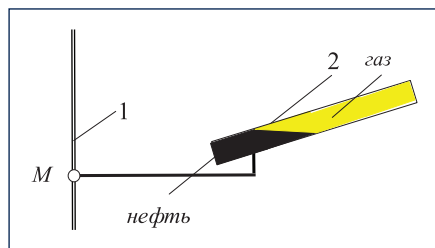


Рис. 2. Принципиальная схема работы газового колпака: 1 – магистральный нефтепровод; 2 – газовый колпак

Fig. 2. A gas cap process functional diagram: 1 – main oil pipeline; 2 – gas cap

вода в колпак. После того как давление в нефтепроводе уменьшится, нефть из полости КГ под давлением сжатого газа возвращается в нефтепровод.

Математическая модель КГ широко известна. Согласно этой модели, газовый колпак, установленный в сечении $M(x_0)$ перед нефтеперекачивающей станцией, учитывается в уравнениях (1) неустановившегося течения нефти в трубопроводе так же, как и ССВД, внутренними условиями сопряжения

$$\begin{cases} p_M^{(+)} = p_M^{(-)} = p_M \\ u_M^{(+)} - u_M^{(-)} = \frac{4q_{CB}}{\pi d^2} \end{cases}$$

с той только разницей, что расход q_{CB} перетекания нефти из нефтепровода в полость КГ имеет другой вид, а именно:

$$q_{CB} = -\frac{dV}{dt} = -p_0 V_0 \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{p_M(t)} \right),$$

т.е. отражает сжатие находящегося в нем газа. Здесь $p_M(t)$ – давление в сечении установки КГ; $p_0 V_0$ – значения начальных давления и объема газа в КГ;

$V(t)$ – текущее значение объема сжатого газа в колпаке.

Таким образом, модель КГ представляется следующими условиями сопряжения:

$$\begin{cases} p_M^{(+)} = p_M^{(-)} = p_M(t), \\ u_M^{(+)} - u_M^{(-)} = \frac{4p_0 V_0}{\pi d^2} \cdot \frac{1}{p_M^2(t)} \frac{dp_M}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

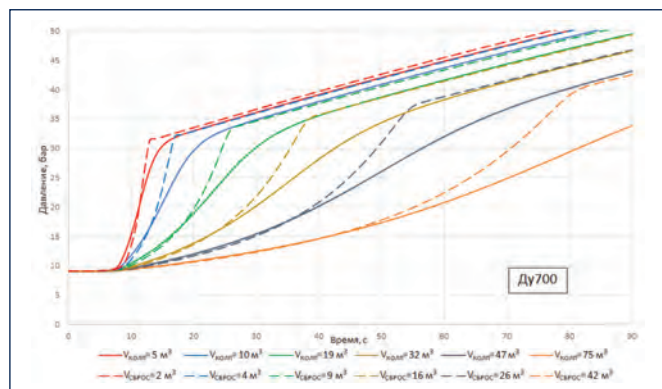
Иными словами, требуется решать систему дифференциальных уравнений (1), описывающую переходный процесс в нефтепроводе, с учетом того обстоятельства, что в сечении $x = x_0$ существует разрыв скорости $u(x,t)$ течения нефти, причем разность скоростей до и после КГ связана с давлением в сечении его установки вторым уравнением (6). В обоих случаях, как ССВД, так и КГ, рабочим методом расчета, т.е. методом решения уравнений (1) с условиями сопряжения (2–3) или (6) является метод характеристик, реализация которого осуществляется численно; основы этого метода подробно изложены, например, в [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

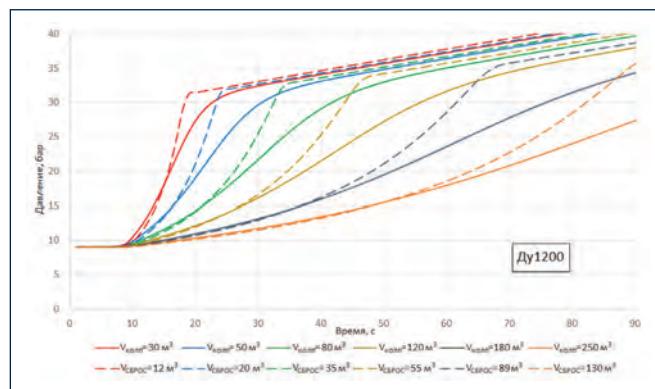
На графиках (рис. 3 и 4) представлены результаты расчетов давления в сечении $M(x_0)$ нефтепровода, в котором установлены сопоставляемые средства защиты трубопровода от волн повышенного давления. Волна повышенного давления генерировалась закрытием задвижки, установленной в конечном сечении нефтепровода. Различные значения скорости увеличения давления в случае использования ССВД регулиро-

вались дросселем 3 (рис. 1), а в случае использования КГ – значением объема V_0 его газовой полости, причем этот объем подбирался так, чтобы обеспечить примерно одинаковую с ССВД скорость увеличения давления. Сравнению подлежали двойной объем сброса нефти в резервуарную емкость в случае использования ССВД и необходимый объем V_0 газовой полости КГ.

Рассмотрим эффективность сравниваемых систем защиты на участке нефтепровода диаметром 720 мм, транспортирующем нефть плотностью $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, вязкостью $\nu = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ с производительностью 3500 м³/ч (рис. 3а), а также на участке трубопровода диаметром 1220 мм, работающего с производительностью 10 200 м³/ч (рис. 3б). На графиках показаны зависимости изменения давления от времени в сечении трубопровода непосредственно перед задвижкой. При этом зависимости для трубопровода, защищаемого с помощью газового колпака различного объема, показаны сплошными кривыми, а для трубопровода, в качестве средства защиты которого используется ССВД, – пунктирными кривыми. Приведенные зависимости получены при изменении объема емкости газового колпака и коэффициента пропускной способности дросселя ССВД. При этом увеличение объема КГ ведет к уменьшению скорости нарастания давления – кривые становятся более пологими. Того же эффекта можно добиться уменьшением коэффициента пропускной способности дроссельного отверстия в ССВД – увеличением объема сброса нефти в резервуар-сборник ССВД.



а) а)



б) б)

Рис. 3. Изменение давления в сечении установки средства защиты: сплошные кривые – КГ; пунктирные кривые – ССВД

Fig. 3. Pressure change at the section of a protection system: solid curves – gas cap; dashed curves – surge reduction system

Из результатов сопоставления требуемых объемов газового колпака и сбросной емкости ССВД при условии обеспечения примерно одинаковой скорости нарастания давления следует вывод о необходимости установки газового колпака в 1,5–2,5 раза большего объема в сравнении с объемом резервуара ССВД (объемы указаны в описании, рис. 3). Однако, учитывая требования пункта 6.6.6 РД-23.040.00-КТН-110-07 «Магистральные нефтепроводы» [11], из которого следует необходимость установки резервуара ССВД, способного обеспечить прием нефти от двух

последовательных срабатываний ССВД, можно сделать вывод о приблизительном равенстве требуемых объемов емкостей сопоставляемых систем защиты от гидравлического удара.

Таким образом, известны параметры обеих систем защиты нефтепровода, обеспечивающих примерно равную скорость увеличения давления в сечении их установки. Решение отдать предпочтение сравнительно дешевому газовому колпаку больших размеров или компактной апробированной, но дорогостоящей ССВД с дополнительным резервуаром зависит от экономической оценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение одного из основных конструктивных параметров систем защиты трубопроводов от гидравлического удара, влияющего на стоимость разработки и эксплуатации систем защиты, – объема газового колпака и 2-кратного объема сброса нефти в результате срабатывания системы сглаживания волн давления – показало сопоставимость этих параметров. Таким образом, отдать предпочтение той или иной системе защиты в каждом отдельно взятом случае можно на основе экономических соображений.

Литература:

1. Адоевский А.В., Арбузов Н.С., Левченко Е.Л., Лурье М.В. Защита нефтепроводов и морских терминалов от гидроударных явлений системами сглаживания волн давления // Нефтяное хозяйство. 2011. № 9. С. 119–122.
2. Рахматуллин Ш.И., Гумеров А.Г., Верушин А.Ю. О влиянии параметров клапана-гасителя на величину гидроудара в нефтепроводе // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2009. Вып. 2 (76). С. 76–78.
3. Лурье М.В., Адоевский А.В., Арбузов Н.С. Моделирование и предварительная настройка систем сглаживания волн давления // Известия вузов. Нефть и газ. 2009. № 6. С. 38–45.
4. Федосеев М.Н., Лурье М.В., Арбузов Н.С. Теория и расчет систем сглаживания волн давления // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 6. С. 102–108.
5. Арбузов Н.С., Федосеев М.Н., Лурье М.В. Использование газовых колпаков для защиты морских нефтеналивных терминалов от гидравлического удара // Нефтяное хозяйство. 2014. № 11. С. 124–127.
6. Чарный И.А. К теории одномерного неустановившегося движения жидкости в трубах и расчету воздушных колпаков и уравнильных башен // Известия ОТН АН СССР. 1938. № 6. С. 59–82.
7. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
8. Полянская Л.В. Система из двух воздушных колпаков как средство уменьшения крутизны волны давления в трубопроводе // Известия вузов. Нефть и газ. 1969. № 4. С. 90–94.
9. Новоселов В.Ф., Крылов Ю.В. Использование горизонтальных емкостей в качестве газовых колпаков // Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. 1975. № 12.
10. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Изд. Центр РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина, 2012. 456 с.
11. РД-23.040.00-КТН-110-07 Магистральные нефтепроводы. Нормы проектирования ОАО «АК «Транснефть».

References:

1. Adoyevskiy A.V., Arbuzov N.S., Levchenko Ye.L., Lurie M.V. Zashhita nefteprovodov i morskikh terminalov ot gidroudarnykh javlenij sistemami sglazhivaniya voln davleniya [Protection of oil pipelines and sea terminals from the hydro-percussion effects with the pressure waves smoothing systems]. *Neftjanoe hozjajstvo = Oil facility*, 2011, No. 9. P. 119–122.
2. Rakhmatullin Sh.I., Gumerov A.G., Verushin A.Yu. O vlijanii parametrov klapana-gasitelja na velichinu gidroudara v nefteprovode [On the impact of damper valve parameters on the hydraulic shock range in the oil pipeline]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Issues of oil and oil products collection, treatment and transportation*, 2009, Issue 2 (76). P. 76–78.
3. Lurie M.V., Adoyevskiy A.V., Arbuzov N.S. Modelirovanie i predvaritel'naja nastrojka sistem sglazhivaniya voln davleniya [Modeling and preliminary setting of surge relief systems]. *Izvestija vuzov. Neft' i gaz = Universities news. Oil and gas*, 2009, No. 6. P. 38–45.
4. Fedosejev M.N., Lurie M.V., Arbuzov N.S. Teorija i raschet sistem sglazhivaniya voln davleniya [Theory and evaluation of pressure waves smoothing systems]. *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 6. P. 102–108.
5. Arbuzov N.S., Fedosejev M.N., Lurie M.V. Ispol'zovanie gazovykh kolpakov dlja zashhity morskikh neftenalivnykh terminalov ot gidravlicheskogo udara [Gas caps utilization for the protection of sea oil terminals from hydraulic impact]. *Neftjanoe hozjajstvo = Oil facility*, 2014, No. 11. P. 124–127.
6. Charny I.A. K teorii odnorazmernogo neustanovivshegosja dvizhenija zhidkosti v trubah i raschetu vozdušnykh kolpakov i uravnitel'nykh bashen [To the theory of one-dimensional unsteady flow of fluid in the pipes and the calculation of air caps and surge tanks]. *Izvestija OTN AN SSSR = News of the Engineering Sciences Department of the Academy of Science of USSR*, 1938, No. 6. P. 59–82.
7. Fox D.A. *Gidravlicheskij analiz neustanovivshegosja techenija v truboprovodah* [Hydraulic analysis of unsteady flows in pipelines]. Moscow, Energoizdat, 1981. 296 pp.
8. Polyanskaya L.V. Sistema iz dvuh vozdušnykh kolpakov kak sredstvo umen'shenija krutizny volny davleniya v truboprovode [A system of two air caps as means of the pressure wave steepness ratio reduction in the pipe]. *Izvestija vuzov. Neft' i gaz = Universities news. Oil and gas*, 1969, No. 4. P. 90–94.
9. Novosyolov V.F., Krylov Yu.V. Ispol'zovanie gorizontaľnykh emkostej v kachestve gazovykh kolpakov [Horizontal vessels application as gas caps]. *Tрубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов = Oil and oil products pipeline transport*, 1975, No. 12.
10. Lurie M.V. *Matematicheskoe modelirovanie processov truboprovodnogo transporta nefti, nefteproduktov i gaza* [Mathematics modeling of processes of oil, oil products and gas pipeline transportation]. Moscow, Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2012. 456 pp.
11. RD-23.040.00-КТН-110-07 Magistral'nye nefteprovody. Normy proektirovaniya ОАО «АК «Транснефть» [Main oil pipelines. Design standards of AK Transneft OJSC].