

УДК 622.692.4

М.Н. Федосеев, магистрант РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, e-mail: fedoseyev.m@gmail.com

Комбинированная система защиты трубопроводов морских нефтеналивных терминалов от гидравлического удара

Рассматривается вопрос о защите морского нефтеналивного терминала от гидравлического удара. В качестве средства защиты рассматривается так называемая комбинированная система, состоящая из двух устройств: первое устанавливается на причале, где существует дефицит свободного пространства, второе – на берегу, где такого дефицита нет. Причальное устройство представляет собой «газовый колпак» – сравнительно небольшую герметичную емкость, частично заполненную инертным газом, устанавливаемую непосредственно в конце наливного трубопровода перед стендерами. Береговое устройство состоит из специального резервуара, оборудованного предохранительным клапаном для частичного отвода нефти из трубопровода в случае превышения давления заданной уставки. Газовый колпак, установленный на причале, предназначается лишь для замедления процесса формирования волны гидравлического удара, в то время как сбросной резервуар с предохранительным клапаном, установленный на берегу, обеспечивает частичный отвод нефти из наливного трубопровода и снижение давления в наливной системе, предотвращая ее разгерметизацию. Основное преимущество предлагаемого метода состоит в том, что он освобождает причал нефтеналивного терминала от громоздкого сооружения, каким является сбросной резервуар, без потери надежности защитной системы в целом.

Ключевые слова: нефтеналивной трубопровод, морской терминал, гидравлический удар, газовый колпак, защита от гидравлического удара, математическое моделирование, метод характеристик.

ФОРМУЛИРОВКА ВОПРОСА

Значительная часть нефти, поставляемой Россией за рубеж, отгружается через морские нефтеналивные терминалы, каждый из которых представляет собой технологический объект повышенной опасности. Скачок давления в наливном трубопроводе, связывающем резервуарный парк, расположенный на берегу, с танкером, находящимся под погрузкой в море непосредственно у причала или у выносного причального устройства, может привести к разрыву трубы и загрязнению нефтью или

нефтепродуктами акватории порта. Поэтому одной из задач эксплуатации нефтеналивного терминала является обеспечение его защиты от возможных скачков давления. Основной причиной таких скачков является гидравлический удар, возникающий в результате достаточно быстрого закрытия задвижек при штатных технологических операциях или в нештатных ситуациях. Наиболее распространенный метод защиты от гидравлического удара – установка непосредственно перед наливными устройствами (стендерами)

предохранительных клапанов. В случае возникновения скачка давления, превышающего максимально допустимое значение, предохранительный клапан открывается, обеспечивая сброс нефти из полости трубопровода в подключенный к нему резервуар. В результате частичного отвода нефти давление в защищаемом трубопроводе удерживается на уровне, не превышающем максимально допустимое значение. Данный способ хорошо апробирован, однако имеет определенные недостатки. Во-первых, для надежной защиты

терминала объем резервуара, подключенного к трубопроводу, должен быть достаточно большим. Это плохо, поскольку на причалах всегда существует дефицит свободного пространства и попросту нет места для установки сколько-нибудь вместительных резервуаров. Во-вторых, в случае неправильно выбранной вместимости сбросного резервуара может произойти его переполнение, тогда система автоматики перекрывает отвод к предохранительным клапанам и тем самым оставляет трубопровод не защищенным от гидравлического удара. Вот почему актуальна задача изыскания альтернативных систем защиты нефтеналивных трубопроводов от гидравлического удара.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ

В качестве альтернативы классической системе защиты, базирующейся на установке перед стендерами предохранительных клапанов, предлагается использовать комбинированную систему защиты, состоящую из двух частей: первой (причальной), т.е. устанавливаемой на причале вблизи стендеров и потому относительно небольших размеров, и второй (береговой) больших размеров, устанавливаемой на берегу, где дефицита свободного пространства нет. В качестве причальной составляющей системы защиты предлагается использовать газовый колпак с относительно небольшим объемом газовой полости (заполненной азотом), а в качестве береговой составляющей предлагается использовать обычную систему – отвод к сбросному резервуару с установленным на нем предохранительным клапаном (рис. 1). Такое сочетание позволяет освободить дополнительное пространство на причале и предотвратить возможность переполнения причальной емкости.

Комбинированная система защиты работает следующим образом. Нефть из резервуарного парка подается по нефтеналивному трубопроводу на танкер, пришвартованный у причала. На причале в непосредственной близости от стендеров устанавливается газовый колпак. В случае несанкционированного (или аварийного) закрытия стен-

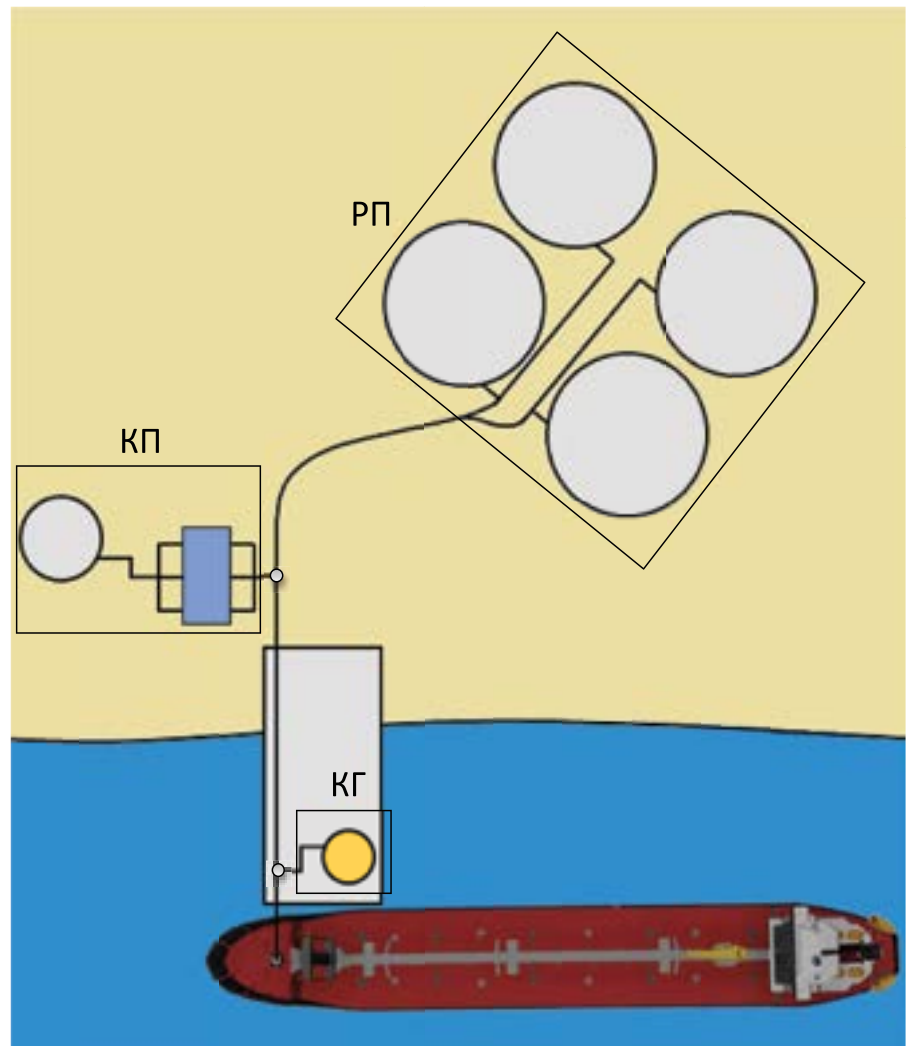


Рис. 1. Комбинированная система защиты нефтеналивного терминала: КГ – колпак газовый; КП – узел предохранительных клапанов с резервуаром для приема нефти; РП – резервуарный парк

дерной задвижки в линии налива трубопровода возникает гидравлический удар, волна которого распространяется вверх по течению. При этом часть жидкости сразу же начинает поступать в газовый колпак, в результате чего скорость увеличения давления в волне гидравлического удара уменьшается. В момент, когда эта волна, сглаженная газовым колпаком, достигает установленных на берегу предохранительных клапанов, срабатывает береговая составляющая системы защиты, которая будет удерживать давление нефти на уровне давления срабатывания предохранительных клапанов. При этом волна разрежения, возникающая при открытии береговых клапанов, движется обратно по направлению к стендеру и, достигнув сечения установки газо-

вого колпака, прекращает поступление нефти в его полость.

Таким образом, предлагаемая система защиты позволяет использовать основное преимущество газового колпака – способность замедлить увеличение давления в формирующейся волне гидравлического удара и решить проблему дефицита свободного пространства на причале. Однако для ее использования требуется получить ответы на следующие основные вопросы: во-первых, будет ли такая система работать, т.е. защищать терминал от волн высокого давления; во-вторых, какой объем газовой полости должен иметь газовый колпак; в-третьих, какой должна быть уставка защиты на предохранительном клапане, чтобы обеспечить эффективную работу газового колпака.

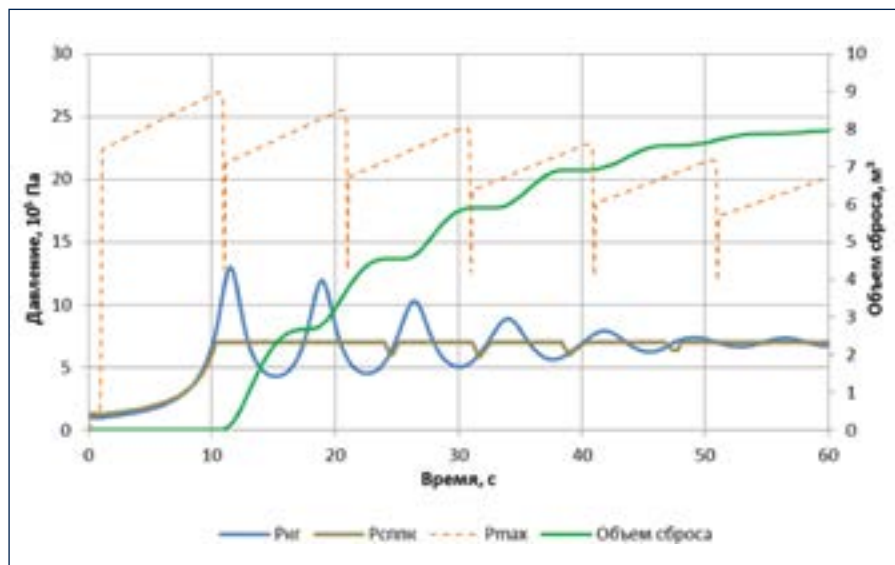


Рис. 2. Изменение давления в узлах комбинированной системы защиты

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Для получения ответов на поставленные вопросы используется метод математического моделирования переходных процессов в нефтеналивном трубопроводе, в конце которого установлена секущая задвижка и перед ней – газовый колпак, а на некотором расстоянии вверх по потоку находится отвод к сбросному резервуару, имеющему на своем входе предохранительный клапан.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Волновой процесс в нефтеналивном трубопроводе моделируется системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda \frac{\rho v |v|}{2d} - \rho g \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

для давления $p(x,t)$ и скорости $v(x,t)$ течения, где x – координата по длине трубопровода, отсчитываемая от его начала; t – время; ρ – номинальная плотность жидкости; c – скорость распространения волн давления; $\alpha(x)$ – угол наклона оси трубопровода к горизонту; $\lambda(Re, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса Re и эквивалентной шероховатости ε внутренней поверхности трубопровода; d – внутренний диаметр трубопровода.

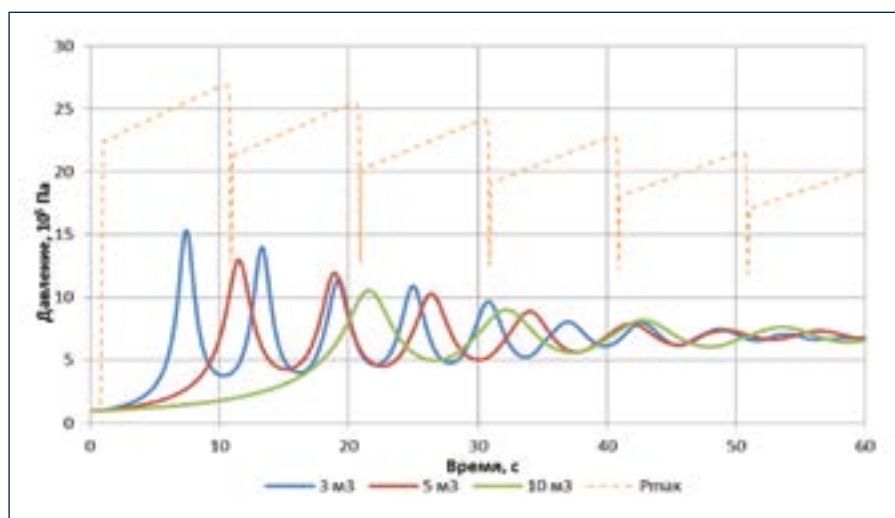


Рис. 3. Изменение максимального уровня давления при различных объемах газа в колпаке

Система уравнений (1) решается методом характеристик, хорошо зарекомендовавшим себя в подобных исследованиях [2]. Использование метода характеристик позволяет перейти от системы уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(p + \rho v c) = -\lambda \frac{\rho v |v|}{2d} - \rho g \cdot \sin \alpha \text{ вдоль линии } \frac{dx}{dt} = c, \\ \frac{d}{dt}(p - \rho v c) = \lambda \frac{\rho v |v|}{2d} + \rho g \cdot \sin \alpha \text{ вдоль линии } \frac{dx}{dt} = -c, \end{cases}$$

каждое из которых выполняется вдоль своей собственной линии плоскости (x,t) , называемой характеристикой. В конечно-разностном виде эти уравнения превращаются в линейные алгебраические уравнения

$$\begin{cases} p_{M,t} + \rho c v_{M,t} = J_{A,t-\Delta t}^{(+)} \\ p_{M,t} - \rho c v_{M,t} = J_{B,t-\Delta t}^{(-)} \end{cases} \quad (2)$$

для $p_{M,t}$, $v_{M,t}$ значений сеточных функций в сечении $M(x,t)$ трубопровода. Здесь $J_{A,t-\Delta t}^{(+)} \equiv p_{A,t-\Delta t} + \rho c v_{A,t-\Delta t} - \varphi_{A,t-\Delta t} \Delta x$; $J_{B,t-\Delta t}^{(-)} \equiv p_{B,t-\Delta t} - \rho c v_{B,t-\Delta t} + \varphi_{B,t-\Delta t} \Delta x$; $\Delta x, \Delta t$ шаг вычислительной сетки по координате и времени, соответственно; $A(x_M - \Delta x)$, $B(x_M + \Delta x)$ – узлы, ближайшие к узлу $M(x_M)$ вычислительной сетки на плоскости (x,t) .

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОВОГО КОЛПАКА

Газовый колпак моделируется дополнительными условиями сопряжения параметров жидкости перед и после сечения K , в котором установлен газовый колпак. Давление $p_{K,t}$ в этом сечении непрерывно, а скорость $v_{K,t}$ испытывает разрыв непрерывности вследствие наличия расхода сброса в полость газового колпака. Условия сопряжения имеют вид:

$$\begin{cases} p_{K,t} + \rho c v_{K,t}^+ = J_{A,t-\Delta t}^{(+)} \\ p_{K,t} - \rho c v_{K,t}^- = J_{B,t-\Delta t}^{(-)} \\ v_{K,t}^+ - v_{K,t}^- = \frac{4q_{K,t}}{\pi d^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $q_{K,t}$ – расход нефти, поступающей из трубопровода в полость газового колпака, заранее не известный и подлежащий определению в процессе расчета. Для нахождения расхода $q_{K,t}$ воспользуемся уравнением сохранения массы



m_r газа в колпаке $m_r = \rho_r(t) \cdot V_r(t) = \text{const}$. Если в первом приближении считать газ совершенным, а процесс сжатия – изотермическим, то это уравнение равносильно уравнению $p_{k,t} \cdot V_r(t) = p_0 V_0$, где $p_0 V_0$ – начальное давление и объем газа в колпаке. Учитывая, что изменение объема газа в колпаке связано с расходом жидкости внутрь газового колпака уравнением $dV/dt = -q$, имеем

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

или в конечно-разностном виде:

$$q_{k,t} = \frac{p_0 V_0}{\Delta t} \left(\frac{1}{p_{k,t-\Delta t}} - \frac{1}{p_{k,t}} \right).$$

Таким образом, система уравнений для расчета параметров в сечении установки газового колпака принимает вид:

$$\begin{cases} p_{k,t} + \rho c v_{k,t}^+ = J_{A,t-\Delta t}^{(+)} \\ p_{k,t} - \rho c v_{k,t}^- = J_{B,t-\Delta t}^{(-)} \\ v_{k,t}^+ - v_{k,t}^- = \frac{4 p_0 V_0}{\pi d^2 \cdot \Delta t} \cdot \left(\frac{1}{p_{k,t-\Delta t}} - \frac{1}{p_{k,t}} \right). \end{cases} \quad (5)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА

Сечение П с установленным в нем предохранительным клапаном моделируется следующим образом: если давление в сечении не превышает давления срабатывания клапана, то расчет давления $p_{п,t}$ и скорости потока $v_{п,t}$ ведется в соответствии с (2). В случае если рассчитанное давление оказывается выше допустимого давления $p_{доп.}$, то расход жидкости через предохранительный клапан выражается формулой

$$q_{п,t} = u_* \cdot \frac{\pi d_*^2}{4} = \frac{\pi d_*^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \cdot \sqrt{2 \cdot (p_{п,t} - p_{атм})},$$

если $p_{п,t} > p_{доп.}$

где d_* – внутренний диаметр клапана, ζ – коэффициент сопротивления клапана, $p_{п,t}$ – давление в сечении установки предохранительного клапана. Тогда окончательная система уравнений для расчета открытого предохранительного клапана примет вид:

$$\begin{cases} p_{п,t} = \frac{J_{A,t-\Delta t} + J_{B,t-\Delta t}}{2} - \frac{\rho c \cdot \Psi_t}{2}, \\ u_{п,t}^{(+)} = \frac{J_{A,t-\Delta t} - p_{п,t}}{\rho c}, \\ u_{п,t}^{(-)} = \frac{J_{B,t-\Delta t} - p_{п,t}}{\rho c}, \\ q_{п,t} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Psi_t. \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\Psi_t = \frac{c}{2\zeta} \left(\frac{d_*}{d} \right)^2 \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{8\zeta}{\rho_0 c^2} \left(\frac{d}{d_*} \right)^4 \left(\frac{J_{A,t-\Delta t} + J_{B,t-\Delta t}}{2} - p_{атм} \right)} \right].$$

- фонтанная арматура
- блоки
обвязки скважин
- комплекты
подземного
оборудования
- станции управления
- противовыбросовое
оборудование
- сертификация API и ISO



на правах рекламы

394055, г. Воронеж,
ул. Ворошилова, 22,
тел.: (473) 234-87-49, 234-82-73,
e-mail: 348168@rambler.ru,
www.vmpzrn.ru

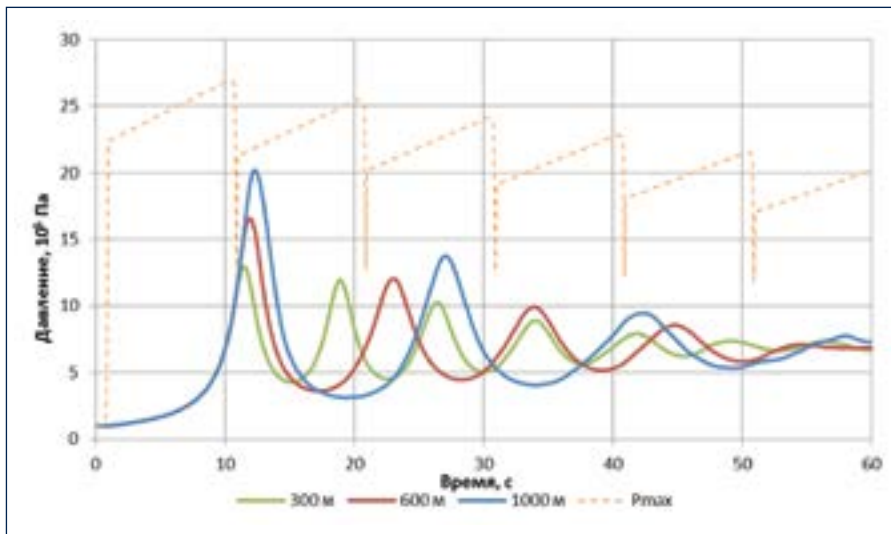


Рис. 4. Изменение максимального уровня давления при различных расстояниях между узлами комбинированной системы защиты

Таким образом, классический метод характеристик позволяет рассчитать значения $p_{M,t}, v_{M,t}$ сеточных функций в момент времени t по значениям сеточных функций в момент времени $t-\Delta t$, причем для расчета значений сеточных функций в сечениях, где установлен газовый колпак, следует использовать формулы (5), а в сечениях, где берет начало отвод с установленным на нем предохранительным клапаном, – формулы (6).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В качестве примера защищаемого терминала рассмотрим нефтеналивной трубопровод длиной 5000 м и диаме-

тром 530 x 10 мм, по которому из резервуарного парка происходит налив танкера с производительностью 1800 $m^3/ч$. Предположим, что несущая способность рассматриваемого трубопровода не превышает 1,6 МПа.

Рассмотрим принцип работы комбинированной системы защиты, состоящей из газового колпака объемом 5 m^3 , установленного непосредственно на причале, и предохранительного клапана, установленного на давление срабатывания 0,7 МПа, находящегося на берегу на расстоянии 300 м от наливаемого танкера (рис. 2).

Кривая p_{max} показывает, что в случае прохождения прямого гидравлическо-

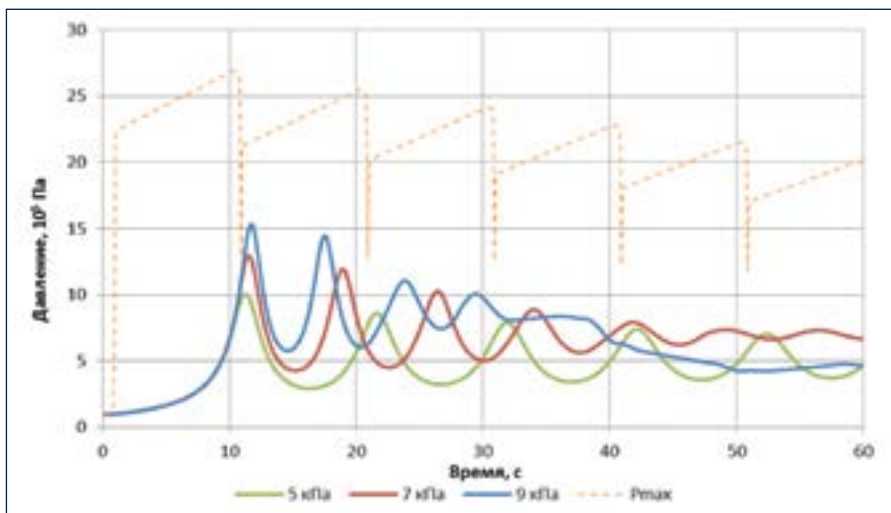


Рис. 5. Изменение максимального уровня давления при различных значениях уставки защиты на предохранительных клапанах

го удара в трубопроводе без системы защиты уровень максимального давления превысит 2,7 МПа. В случае работы с подключенной системой защиты удается значительно снизить значение максимального давления переходного процесса. При этом защита работает следующим образом: при закрытии судовой задвижки волну гидравлического удара принимает на себя газовый колпак, растягивая во времени процесс нарастания давления (кривая $P_{кр}$). Затем, при повышении давления выше установочных 0,7 МПа, срабатывают установленные на берегу предохранительные клапаны (изменение давления перед клапаном показано на кривой $P_{сплк}$), через которые начинается сброс жидкости в предохранительную емкость. Возникающая в результате срабатывания клапанов волна разрежения распространяется по трубопроводу обратно к сечению газового колпака и вследствие снижения давления приостанавливает его заполнение. Последующие колебания давления в трубопроводе, которые в результате должны привести к выравниванию значений полного напора во всех сечениях трубопровода, имеют затухающую амплитуду и уже не превысят достигнутого ранее максимального уровня. Таким образом, уровень повышения давления при гидравлическом ударе не превысит значения 1,3 МПа при объеме сброшенной через предохранительные клапаны жидкости 8 m^3 . На рисунках 3–5 показано влияние отдельных конструктивных параметров системы защиты на степень понижения давления при прямом гидравлическом ударе. Можно заметить, что увеличение первоначального объема газового колпака (рис. 3) значительно снижает максимальное давление, при этом объем сброшенной жидкости через предохранительные клапаны не меняется и составляет те же 8 m^3 . На рисунке 4 представлена зависимость степени снижения давления в трубопроводе от расстояния между элементами комбинированной системы защиты, а именно: при увеличении расстояния между элементами комбинированной системы защиты увеличивается и уровень достигаемого при

переходном процессе давления. Это связано в первую очередь с тем, что с увеличением расстояния до предохранительного клапана увеличивается время, необходимое волне давления, чтобы та распространилась от газового колпака до клапана и затем вернулась обратно в виде волны разряжения. Вот почему газовый колпак вынужден принять больший объем жидкости, и, как следствие, давление внутри колпака поднимется до большего уровня. Иными словами, чем ближе предохранительный клапан удастся расположить к конечному сечению трубопровода (месту возникновения гидравлического удара), тем эффективнее работает система защиты от гидравлического удара при незначительном увеличении объема сброшенной через клапаны жидкости. Другим вариантом увеличения эффективности предлагаемой системы защиты

является снижение давления настройки срабатывания предохранительного клапана (рис. 5).

Изменяя давление срабатывания клапана, можно уменьшить уровень максимального давления до значения 1,0 МПа при уставке защиты 0,5 МПа. Однако это влечет за собой увеличение объема сброса через предохранительные клапаны, который составляет: 4 м³ при настройке 0,9 МПа, 8 м³ при настройке 0,7 МПа и 15 м³ при настройке 0,5 МПа.

Выводы

1. Комбинированная система защиты трубопроводов нефтеналивных терминалов от гидравлического удара, основанная на использовании двух составляющих: причальной – в виде газового колпака, и береговой – в виде сбросного резервуара, на отводе к ко-

торому установлен предохранительный клапан, способна эффективно сгладить волну гидравлического удара, позволяя при этом освободить дополнительное пространство на причале за счет перенесения части компонентов системы защиты на берег.

2. Варьируя параметры системы защиты, можно регулировать уровень максимального давления, достигаемого в результате прямого гидравлического удара. Для уменьшения уровня максимального давления следует использовать следующие мероприятия:

- увеличивать объем газа, первоначально заполнявшего колпак;
- снижать давление срабатывания предохранительного клапана (уменьшать уставку защиты);
- устанавливать предохранительные клапаны на как можно меньшем от газового колпака расстоянии.

Литература:

1. Чарный И.А. К теории одномерного неустойчившегося движения жидкости в трубах и расчету воздушных колпаков и уравнительных башен // Известия ОН АН СССР. – 1938. – № 6. – С. 59–82.
2. Арбузов Н.С. Комбинированная система защиты морских нефтеналивных терминалов от гидроударных явлений // Трубопроводный транспорт (теория и практика). – 2010. – № 4 (20). – С. 20–23.
3. 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.
4. Полянская Л.В. Исследование нестационарных процессов при изменении режима работы нефтепроводов с центробежными насосами: канд.дисс., МИНХиГП им. И.М. Губкина. – 1965. – 141 с.

UDC 622.692.4

M.N. Fedoseyev, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, e-mail: fedoseyev.m@gmail.com

Combined using gas tank protection system of oil-loading terminals from hydraulic shock

The problem of protection of oil-loading terminals from hydraulic shock waves is studied in the paper. As a means of protection so-called «combined protection system» is considered. The system consists of a gas cap installed directly on the quay where shortage of free space is an issue, and safety valves mounted onshore. The gas cap is a relatively small sealed vessel partially filled with inert gas that is installed in front of marine loading arms. On-shore part of the device represents safety valves that open in case of pressure wave exceeding tunned-up level. The gas cap used in the device is primarily intended to stretch in time the process of surge wave forming, whereas safety valves allow minimizing pressure level in the pipeline. Advantages of proposed device are considered and analysis of the device construction impact on effectiveness is conducted.

Keywords: oil-loading pipeline, oil-tanker terminal, water shock waves, gas hood-cap, gas tank, air cushion surge chamber, hydraulic shock absorber, mathematical modeling, method of characteristics.

References:

1. Charny I.A. K teorii odnorazmernogo neustanovivshegosya dvizheniya zhidkosti v trubakh i raschetu vozdushnykh kolpakov i uravnitel'nykh bashen (Toward a theory of one-dimensional unstable flow of liquid in pipes and calculation of air chambers and surge towers) // News of Engineering Sciences Department of AS of USSR. – 1938. – No. 6. – P. 456. 59–82.
2. Arbuzov N.S. Kombinirovannaya sistema zatshity morskikh neftenalivnykh terminalov ot gidroudarnykh yavleniy (Combined protection system of onshore oil loading terminals against hydroshock) // Pipelines (theory and practice). – 2010. – No. 4 (20). – P. 456. 20–23.
3. Lurie M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefiti, nefteproduktov i gaza (Mathematic modeling of oil, oil products and gas pipeline transportation processes). – Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2012. – 456 p.
4. Polyanskaya L.V. Issledovanie nestatsionarnykh protsessov pri izmenenii rezhima raboty nefteprovodov s tsentrobezhnyimi nasosami (Research into non-steady processes in case of pipelines operational changes with centrifugal type pumps): Candidate's thesis, Gubkin Moscow Institute of the Petrochemical and Gas Industry. – 1965. – 141 p.