

УДК 621.646

Н.С. Арбузов, к.т.н., начальник отдела расчета переходных процессов, ООО «ИМС Индастриз», e-mail: arbuzov@imsholding.ru

Сравнительный анализ использования предохранительного клапана и газового колпака в качестве систем защиты от гидроудара морского нефтеналивного терминала

Дан сравнительный анализ предохранительного клапана и газового колпака как основных рабочих элементов системы защиты (СЗГУ) нефтеналивных трубопроводов от гидравлического удара. Показано, что применение газового колпака в качестве ограничителя давления в наливном трубопроводе целесообразно лишь для относительно коротких трубопроводов и сравнительно небольших производительностей налива. В отличие от предохранительных клапанов, которые ограничивают давление в трубопроводе заданным значением, газовый колпак лишь замедляет скорость увеличения этого давления. Показано, что задачу по ограничению давления газовый колпак способен решить только в тех случаях, когда объем его газовой полости достаточно велик. Недооценка многочисленных факторов, влияющих на величину требуемого объема, особенно при попытке минимизировать размеры газового колпака, может привести к аварии с проливом нефти в акваторию порта.

Ключевые слова: морской нефтеналивной терминал, гидравлический удар, система защиты, газовый колпак, наливной трубопровод.

Обеспечение безопасных условий погрузки нефти на судно является одной из важнейших задач, решаемых при проектировании морских нефтеналивных терминалов. Наибольшую опасность в процессе налива судна у причала представляют гидроударные явления, вызываемые, например, прекращением погрузки судна в результате закрытия судовых задвижек при возникновении угрозы переполнения танка судна или в случае закрытия задвижек дрейфовой безопасности, когда при подвижке судна у причала появляется опасность разрыва соединений шланговых трубопроводов и пролива нефти в море. Гидравлическим ударом называется резкое торможение потока жидкости в гидравлической системе, сопровождающееся значительным повышением давления. На морском нефтеналивном

терминале повышение давления при гидравлическом ударе может не только вывести из строя установленное на трубопроводах дорогостоящее оборудование, но и привести к разгерметизации с проливом нефти в акваторию порта. Для защиты от гидравлического удара морские нефтеналивные терминалы оборудуются специальными устройствами – системами защиты от гидравлического удара (СЗГУ), основное назначение которых – предотвратить резкое торможение потока жидкости в процессе перекрытия сечения трубопровода. Среди различных устройств защиты наибольшее распространение получили СЗГУ, оборудованные предохранительными клапанами. Основное преимущество предохранительных клапанов заключается в их способности ограничивать давление

в трубопроводе на уровне давления срабатывания клапанов, что достигается перенаправлением потока нефти в специально предусмотренную сбросную емкость. Давление срабатывания предохранительного клапана является настраиваемым легко контролируемым параметром. К недостаткам данного устройства можно отнести необходимость опорожнять сбросную емкость после каждого срабатывания предохранительных клапанов, а также необходимость проведения их периодического технического обслуживания. Перечисленных недостатков лишены газовые колпаки, которые широко используются в различных отраслях промышленности и также могли бы использоваться в качестве систем защиты от гидравлического удара. Цель данной работы – провести сравнение

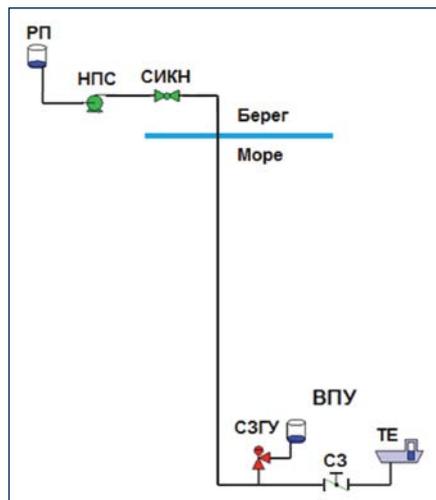


Рис. 1. Схема морского нефтеналивного терминала

параметров и эффективности работы газового колпака и предохранительного клапана и определить параметры морских нефтеналивных терминалов, на которых было бы целесообразным использование газового колпака в качестве системы защиты от гидравлического удара.

1. Проанализируем сначала механизм действия СЗГУ, использующей предохранительный клапан. Для исследования переходных процессов в трубопроводе воспользуемся системой уравнений неустановившегося течения слабо сжимаемой жидкости [1–6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = -\varphi(v,x), \end{cases} \quad (1)$$

где $v(x,t)$ – скорость течения; $p(x,t)$ – давление; $\lambda(v)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\varphi(v,x) = \lambda v^2 / 2d + \rho g \sin \alpha(x)$; $\alpha(x)$ – угол наклона оси трубопровода к горизонту; ρ – номинальная плотность жидкости; d – внутренний диаметр трубопровода; x,t – координата и время; c – скорость распространения в трубопроводе волн возмущения, которая определяется известной формулой Н.Е. Жуковского $c = (\rho / (K + \rho d / E \delta))^{-1}$. Здесь δ – толщина стенки трубопровода; E – модуль Юнга материала трубы (для стали $E \approx 2 \cdot 10^5$ МПа); K – модуль упругости жидкости (для нефти $K \approx 1,3 \div 1,5 \cdot 10^9$ Па). Эта система решается численно методом характеристик, под-

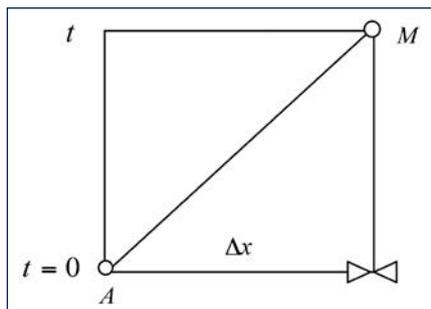


Рис. 2. Случай конечного расположения СЗГУ

точно изложенным в ряде работ [1–6]. В нашем исследовании мы используем этот метод в некотором приближенном виде, позволяющем, однако, получить существенные инженерные результаты. Рассмотрим нефтеналивной терминал с выносным причальным устройством ВПУ (рис. 1). Нефть из резервуарного парка РП с помощью насосного агрегата НПС через узел учета СИКН подается на танкер, перед судовыми задвижками СЗ которого к наливному трубопроводу на ВПУ подключен СЗГУ с предохранительным клапаном и со сбросной емкостью. В случае гидравлического удара, вызванного закрытием судовой задвижки в процессе погрузки судна, СЗГУ ограничивает давление перед судовыми задвижками давлением срабатывания предохранительного клапана. Покажем сначала, как оценить объем перепуска нефти в сбросную емкость. Рассмотрим момент времени t , когда судовой задвижка закрыта и через

предохранительный клапан, расположенный перед ней в конце М трубопровода, осуществляется перепуск нефти в сбросную емкость. Тогда, используя метод характеристик, можно записать следующие соотношения:

$$\begin{cases} p_{M,t} + \rho \frac{c}{F} \cdot q_{M,t} = J_{A,0} \\ p_{M,t} = p_{ПК} \end{cases}, \quad (2)$$

где $J_{A,0} = p_{A,0} + \rho c \cdot q_{A,0} / F - \varphi_{A,0} \cdot \Delta x$; Δx – длина участка трубопровода перед задвижкой; индекс t показывает, что параметр относится к моменту времени t , а индекс 0 – к начальному моменту (рис. 2). Второе уравнение в системе (2) означает, что в процессе перепуска нефти через СЗГУ давление $p_{M,t}$ в конце М трубопровода остается равным давлению $p_{ПК}$ срабатывания предохранительного клапана. В этом случае расход $q_{M,t}$ в конце М трубопровода совпадает с расходом $q_{ПК}$ нефти через предохранительный клапан, соотношение для которого можно получить из первого уравнения системы (2):

$$q_{ПК} = q_{M,0} - \frac{F}{\rho \cdot c} \cdot (p_{ПК} - p_{M,0}), \quad (3)$$

где $p_{M,0} = p_{A,0} - \varphi_{A,0} \cdot \Delta x$ – давление в конце трубопровода перед закрытием судовой задвижки. Если принять $\Delta x = L$, где L – длина наливного трубопровода, то в первом приближении в течение $\tau = 2L/c$ времени пробега волны давления от причала до насосной станции и обратно

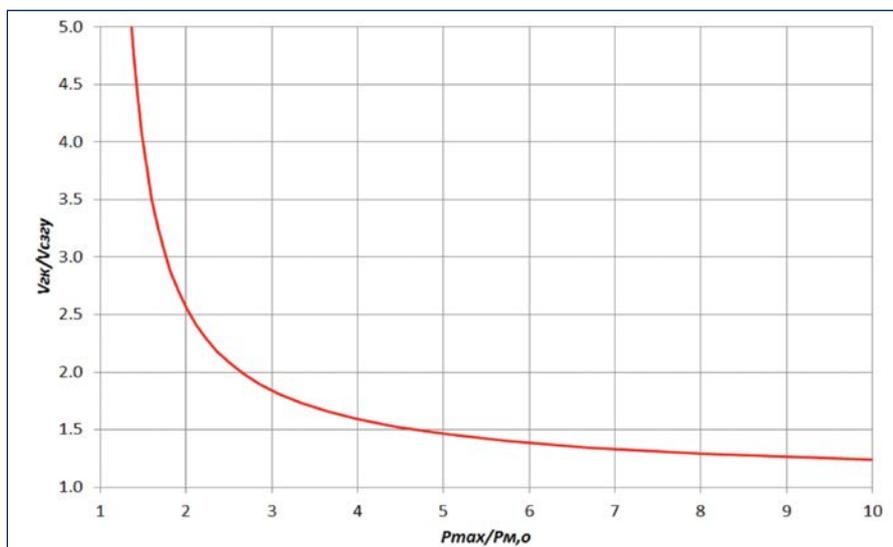


Рис. 3. Зависимость относительного объема газового колпака от уровня превышения допустимого давления над начальным



Рис. 4. Газовый колпак

расход $q_{пк}$ через предохранительный клапан можно считать постоянным. Для снижения объема сбросной емкости СЗГУ минимизируем расход $q_{пк}$ приняв давление $p_{пк}$ срабатывания предохранительного клапана равным максимально допустимому рабочему давлению p_{max} и в дальнейших рассуждениях полагаем $p_{пк} = p_{max}$. На морских нефтеналивных терминалах с насосной подачей нефти срабатывание предохранительного клапана на причале сопровождается отключением насосных агрегатов на НПС. В резуль-

тате при гидравлическом ударе волна разряжения от остановившихся насосных агрегатов приходит к СЗГУ через промежуток $\tau = L/c$ времени, и перепуск нефти через предохранительный клапан прекращается. Следовательно, объем $V_{сзгу}$ нефти, перепускаемой при гидравлическом ударе в сбросную емкость СЗГУ, можно оценить по следующей зависимости:

$$V_{сзгу} = q_{пк} \cdot L/c. \quad (4)$$

2. Проанализируем теперь механизм действия СЗГУ, основанной на использовании газового колпака, объем $V_{гк}$ газовой полости которого заполнен азотом. При этом начальное давление $p_{гк,0}$ заправки газового колпака считаем равным начальному давлению $p_{м,0}$ в конце наливного трубопровода перед судовыми задвижками, т.е. в том месте трубопровода, где на причале расположен газовый колпак.

Из анализа, выполненного в п. 1, следует, что при гидравлическом ударе давление перед судовыми задвижками не превысит p_{max} , если нефть объемом $V_{сзгу}$ будет перенаправлена в сбросную емкость СЗГУ. Определим объем $V_{гк}$ газового колпака из условия, что при гидравлическом ударе в него поступит объем $V_{сзгу}$ нефти. Тогда начальный объем $V_{гк}$ газа в колпаке уменьшится до значения $V_{гк} - V_{сзгу}$ а давление увеличится от начального значения $p_{м,0}$ до максимально допустимого значения p_{max} .

Примем, что при гидравлическом ударе процесс сжатия газа (азота) в колпаке происходит по адиабатическому закону (коэффициент k адиабаты азота равен $\approx 1,4$). Для адиабатического процесса сжатия газа справедливо равенство:

$$p_{м,0} V_{гк}^{1,4} = p_{max} (V_{гк} - V_{сзгу})^{1,4},$$

из которого находится требуемое значение $V_{гк}$ начального объема газового аккумулятора:

$$V_{гк} = V_{сзгу} / [1 - (p_{м,0} / p_{max})^{1/1,4}]. \quad (5)$$

Отсюда следует, что начальный объем $V_{гк}$ газового колпака при давлении $p_{м,0}$ должен удовлетворять неравенству:

$$V_{гк} / V_{сзгу} \geq 1 / [1 - (p_{м,0} / p_{max})^{1/1,4}]. \quad (6)$$

На рисунке 3 приведен график отношения потребного объема $V_{гк}$ газового колпака и объема $V_{сзгу}$ нефти, перепускаемой при гидравлическом ударе через предохранительный клапан СЗГУ, в зависимости от степени превышения допустимого уровня давления p_{max} в трубопроводе над начальным давлением $p_{м,0}$ нефти перед судовыми задвижками. Из этого графика следует, что требуемый объем газового колпака будет тем больше, чем ближе уровень рабочего давления $p_{м,0}$ в трубопроводе перед судовыми задвижками к максимально допустимому значению p_{max} . Так, например, если p_{max} превышает рабочее давление $p_{м,0}$ в 2 раза ($p_{max} / p_{м,0} = 2$), то начальный объем $V_{гк}$ газового колпака с давлением $p_{м,0}$ газа должен составлять не менее $2,5 \times V_{сзгу}$ объемов разового перепуска нефти через СЗГУ, использующего предохранительный клапан. При увеличении отношения $p_{max} / p_{м,0}$ давлений до 5 требуемый начальный объем $V_{гк}$ газового колпака уменьшается до $1,46 \times V_{сзгу}$. На рисунке 4 изображен один из видов промышленного газового колпака с резиновым разделителем между газом и жидкостью. Известны другие конструкции газового колпака с поршневым и мембранным разделителями, а также колпаков, в которых в качестве заменителя газа используется упругий наполнитель. Однако общим для этих устройств является относительно боль-

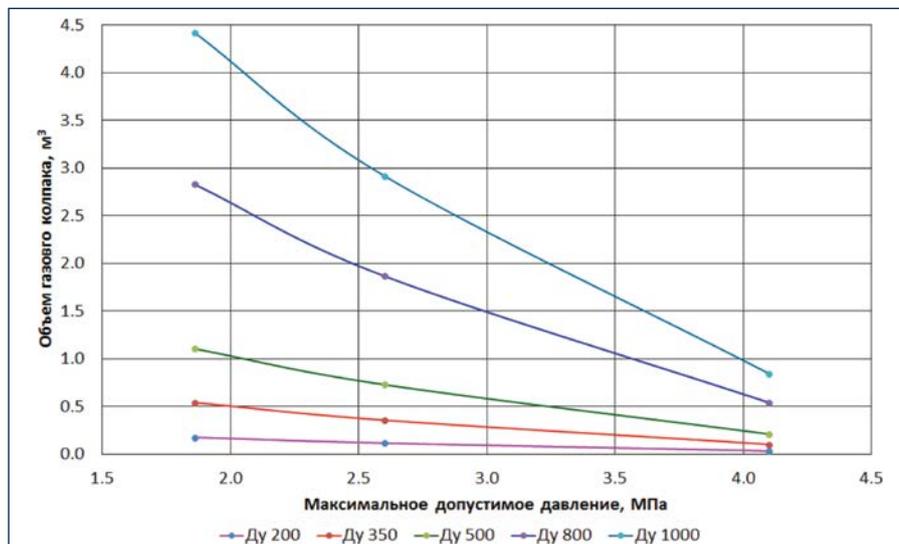


Рис. 5. Зависимость объема газового колпака от допустимого уровня давления

шой линейный размер от 1,0 до 2,0 м с малым, до 0,1 м³, полезным рабочим объемом. Учитывая, что объем $V_{\text{сзгу}}$ нефти, который колпак должен принять при гидравлическом ударе, может значительно превышать 1,0 м³, требуемое для защиты морского терминала от гидравлического удара число газовых колпаков приходится увеличивать до нескольких десятков.

Рассмотрим условия, при которых требуемый объем газового колпака будет минимальным. Из анализа п. 1 следует, что увеличение разности $p_{\text{max}} - p_{\text{м,0}}$ давлений между допустимым значением p_{max} и начальным рабочим давлением $p_{\text{м,0}}$ сопровождается уменьшением расхода $q_{\text{пк}}$ нефти через предохранительный клапан и, следовательно, уменьшением объема $V_{\text{сзгу}}$ газового сброса. Учитывая, что диапазон изменения рабочего давления $p_{\text{м,0}}$ перед судовыми задвижками обычно небольшой и составляет 0,2–0,4 МПа, можно утверждать, что с увеличением разности $p_{\text{пк}} - p_{\text{м,0}}$ давлений будет увеличиваться и отношение $p_{\text{пк}}/p_{\text{м,0}}$ этих давлений. Следовательно, в соответствии с анализом, выполненным

в п. 2, требуемое превышение объема $V_{\text{гк}}$ газового колпака над объемом $V_{\text{сзгу}}$ при гидравлическом ударе будет также уменьшаться. На рисунке 5 приведены графики изменения объема $V_{\text{гк}}$ газового колпака в зависимости от максимально допустимого рабочего давления p_{max} , полученные из условий: рабочее давление перед судовыми задвижками равно $p_{\text{м,0}} = 0,4$ МПа; максимальная производительность погрузки нефти с плотностью $\rho = 865$ м³/с соответствует скорости $v = 5$ м/с потока нефти в трубопроводе; наливная насосная станция находится на расстоянии $L = 1000$ м от газового колпака, расположенного перед судовыми задвижками; начальный уровень давления в газовом колпаке равен $p_{\text{м,0}} = 0,4$ МПа. При увеличении давления в газовом колпаке до 0,5 МПа насосные агрегаты отключаются. При прямом гидравлическом ударе в процессе погрузки увеличение давления перед судовыми задвижками составит $\Delta p_{\text{гк}} = \rho v^2 = 865 \cdot 5 \cdot 1000 = 4,3$ МПа. Максимально допустимое давление может принимать одно из следующих значений: 1,6; 2,5 или 4,0 МПа.

Из графиков на рисунке 5 видно, что требуемый объем газового колпака будет минимальным (до 0,5 м³), если давление при гидравлическом ударе $p_{\text{м,0}} = \Delta p_{\text{гк}} = 4,7$ МПа незначительно превышает максимально допустимое давление в трубопроводе $p_{\text{max}} = 4,0$ МПа. В этом случае при гидравлическом ударе давление в газовом колпаке увеличивается в 10 раз, от 0,4 до 4,0 МПа, и, как следует из рисунка 3, объем колпака заполняется нефтью на 83%. Однако на практике для большинства существующих морских нефтеналивных терминалов максимально допустимое давление равно 1,6 МПа. В этом случае при гидравлическом ударе почти 40% емкости газового колпака остается заполненной газом. Кроме того, с увеличением диаметра трубопровода увеличивается объем $V_{\text{сзгу}}$ нефти, перепускаемой в колпак. Соответственно, требуемый объем $V_{\text{гк}}$ газового колпака также резко увеличивается от 0,2 м³ для трубопровода Ду200 с производительностью погрузки 565 м³/ч до 4,4 м³ для трубопровода Ду1200 с производительностью погрузки 20 000 м³/ч (рис. 5).

XXI специализированная выставка



ОАО «Тюменская ярмарка»

Адрес: Россия, 625013, г. Тюмень, ул. Севастопольская, 12, Выставочный зал
 телефакс: (3452) 48-55-56, 48-66-99, 48-53-33; e-mail: tyumfair@gmail.com. www.expo72.ru



2014

НЕФТЬ И ГАЗ

Топливо энергетический комплекс

16-19
сентября



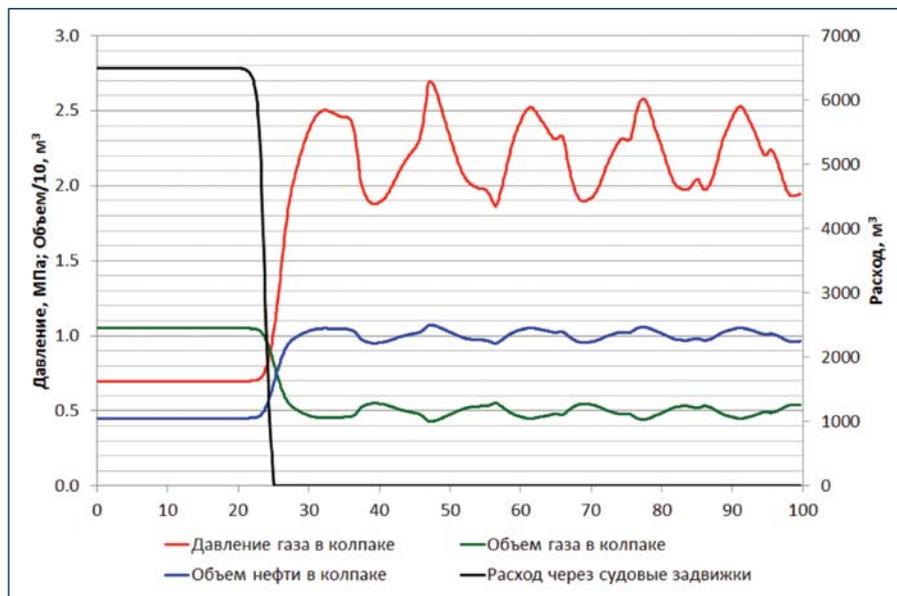


Рис. 6. Изменение объема и давления в газовом колпаке при переходном процессе

Необходимо отметить, что, согласно формуле (4), объем колпака пропорционален протяженности трубопровода между наливной насосной и судовыми задвижками, поэтому увеличение длины трубопровода, например, в 5 раз, с 1000 до 5000 м, приводит к необходимости увеличения требуемого объема колпака также в 5 раз: для трубопровода Ду200 – с 0,2 до 1,0 м³, а для трубопровода Ду1000 – с 4,4 до 22 м³. Кроме того, если погрузка нефти на судно осуществляется за счет высотного расположения резервуарного парка или если насосный агрегат не отключается своевременно, то $t=2L/c$ продолжительность поступления нефти в газовый колпак удваивается, и начальный объем газа в колпаке необходимо как минимум удвоить.

Таким образом, использование систем защиты от гидравлического удара в виде «пакета» промышленно выпускаемых газовых аккумуляторов малого объема целесообразно лишь в случае терминалов с трубопроводами малого диаметра (Ду200 – Ду350) и имеющих небольшую протяженность (до 2000 м). Для наливных трубопроводов с большим диаметром и с большей протяженностью нужна специальная конструкция газового колпака, так как размеры «пакетируемого» газового колпака будут вызывать затруднение в его размещении на причале и тем более – на выносном причальном устройстве.

3. Проверим далее, как согласуются параметры газового колпака, рассчитанные по упрощенной методике, предложенной выше, с параметрами газового колпака, определенными на основе компьютерных расчетов, использующих теорию переходных процессов в полном объеме. На схеме (рис. 1) в качестве СЗГУ вместо предохранительного клапана и сбросной емкости будем использовать газовый колпак. По предложенной упрощенной методике определим параметры газового колпака, устанавливаемого на выносном причальном устройстве башенного типа в качестве СЗГУ. Погрузка нефти с плотностью $\rho=865 \text{ м}^3$ и производительностью $q=6500 \text{ м}^3/\text{ч}$ осуществляется с помощью насосной станции по трубопроводу Ду 700, имеющему протяженность $L=6000 \text{ м}$, рабочее давление перед судовыми задвижками $p_{м,0}=0,7 \text{ МПа}$. Поскольку давление срабатывания разрывного соединения на шлангуемом трубопроводе составляет 2,5 МПа, то в качестве максимально допустимого давления p_{max} принимается значение 2,5 МПа. При повышении давления перед судовой задвижкой до 0,8 МПа насосные агрегаты отключаются.

Сначала по соотношению (3) определим расход сброса нефти при гидравлическом ударе:

$$q_{\text{ПК}} = \frac{6500}{3600} \cdot \frac{0,385}{865 \cdot 1000} \cdot (2,5 - 0,7) \cdot 10^6 = 1,0 \text{ м}^3/\text{с},$$

где 0,7 МПа – давление в сечении подключения к трубопроводу газового колпака.

Затем в соответствии с уравнением (4) определим объем нефти, который необходимо перепустить в сбросную емкость, чтобы ограничить давление перед судовыми задвижками значением 2,5 МПа:

$$V_{\text{СЗГУ}} = q_{\text{ПК}} \cdot L / c = 1,0 \cdot 6000 / 1000 = 6,0 \text{ м}^3.$$

И, наконец, по зависимости (5), полученной в п. 2, найдем требуемый начальный объем $V_{\text{ГК}}$ газа под давлением 0,7 МПа, который должен находиться в газовом колпаке перед гидравлическим ударом:

$$V_{\text{ГК}} = 6,0 / [1 - (0,8/2,6)^{1/1,4}] = 10,5 \text{ м}^3.$$

На рисунке 6 представлены результаты нестационарного процесса, который возникает при наливке судна с производительностью 6500 м³/ч в результате закрытия судовых задвижек за 5 с. Предполагается, что перед задвижками установлен газовый колпак с начальным объемом $V_{\text{ГК}}$ газа, равным 10,5 м³ и давлением $p_{м,0}=0,7 \text{ МПа}$.

Из графиков видно, что в процессе закрытия судовой задвижки производительность погрузки (черная линия) снижается с 6500 м³/ч до 0. Нефть начинает поступать в колпак (синяя линия), поэтому объем газа в колпаке уменьшается с 10,5 до 4,5 м³. Одновременно со сжатием газа в колпаке давление в нем повышается с 0,7 до 2,5 МПа, что находится в хорошем соответствии с приближенными расчетами. Таким образом, предлагаемая упрощенная методика позволяет оценить требуемый объем газового колпака, емкость которого в случае гидравлического удара позволит ограничить давление перед судовыми задвижками в пределах допустимого уровня. Однако на точность получаемой оценки влияет множество параметров. Например, любая задержка с отключением насосных агрегатов при гидравлическом ударе будет сопровождаться увеличением объема $V_{\text{СЗГУ}}$ перепускаемой в колпак нефти и, соответственно, увеличением требуемого объема $V_{\text{ГК}}$ газового колпака. Кроме

того, из графика изменения давления в газовом колпаке при гидравлическом ударе на рисунке 6 видно, что амплитуда второй волны давления, пришедшей от закрывшегося обратного клапана на выходе наливной насосной, достигает 2,7 МПа, что на 8% превышает заданный при расчетах допустимый уровень повышения давления в газовом колпаке 2,5 МПа. Следовательно, предлагаемая упрощенная методика позволяет выполнить лишь предварительную оценку требуемого объема газового колпака. Для точного определения параметров СЗГУ на основе газового колпака необходимо выполнять численные расчеты переходных процессов в полном объеме, моделируя различные нештатные ситуации, которые могут возникать в процессе погрузки судна.

ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная методика, позволяющая оценить требуемый объем газового колпака при его использовании в качестве системы защиты от гидравлического удара в зависимости от производительности погрузки судов и параметров морского нефтеналивного терминала.
2. Показано, что из-за больших размеров газовых колпаков их применение в качестве СЗГУ целесообразно лишь на коротких наливных трубопроводах малого диаметра при низкой производительности погрузки судов.
3. В отличие от предохранительного клапана, ограничивающего давление в трубопроводе на уровне настроенного давления срабатывания клапана, уровень повышения давления в

газовом колпаке при гидравлическом ударе зависит от правильного выбора его начального объема. Недооценка любого из многочисленных факторов, влияющих на требуемый объем газового колпака, особенно при попытке минимизировать его размеры, неминуемо приведет к аварии с проливом нефти в акваторию порта.

4. Предлагаемая упрощенная методика позволяет выполнить лишь предварительную оценку требуемого объема газового колпака. Требуется последующее уточнение размеров газового колпака выполнением расчетов переходных процессов с использованием специализированных программных комплексов. Автор благодарит профессора М.В. Лурье за обсуждение результатов работы и продуктивные замечания.

Литература:

1. Арбузов Н.С. Предпроектная оценка параметров системы защиты морского нефтеналивного терминала от гидравлических ударов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2013. – № 8. – С. 14–17.
2. Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Я.К. Гидравлический удар и уравнительные резервуары. – М.: Наука, 1968. – 248 с.
3. Streeter V.L., Wylie E.B. Hydraulic Transients. Mc Graw-Hill, NY, 1967. – 327 p.
4. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
5. Рахматуллин Ш.И., Гумеров А.Г., Верушин А.Ю. О влиянии параметров клапана-гасителя на величину гидравлического удара в нефтепроводе // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2009. – Вып. 2 (76). – С. 76–78.
6. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2012. – 456 с.

UDC 621.646

N.S. Arbuzov, PhD, department head of IMS Industries Ltd, Arbuzov@imsholding.ru

Comparative analysis of the use the safety valve and the gas cap as systems of protection against hydraulic shock of the marine oil terminal

Methodology of evaluation of parameters of gas caps, which used as protection systems from the water hammer of the marine oil terminals, was proposed. It is shown that due to the large size of the gas caps of their use as a system of protection against hydraulic shock is appropriate only for short liquid pipelines of small diameters and low productivity of loading of ships. Unlike the safety valve, which limited the pressure in the pipeline at the level of the set pressure, the level of increase of pressure in a gas cap in the hydraulic impact depends on the selection of its original volume. Underestimation of any of the numerous localities of factors influencing the required volume of gas cap, especially when you try to minimize its size, will inevitably lead to the accident, the spills of oil into the marine waters of the port.

Keywords: marine oil terminal, hydraulic shock, water hammer, surge relief system, protective system, pipeline safety valves, gas cap, loading pipeline.

References:

1. Arbuzov N.S. Predproektnaya otsenka parametrov sistemy zatshity morskogo neftenalivnogo terminal ot gidravlicheskih udarov (Pre-design evaluation of parameters of the onshore loading terminal safety system against water hammers) // NEFTEGAS Territory. – 2013. – No. 8. – P. 14–17.
2. Aronovich G.V., Kartvelishvili N.A., Lyubimtsev Ya.K. Gidravlicheskiy udar i uravnitelnye rezervuary (Water hammer and surge tanks). – Moscow: Nauka, 1968. – 248 p.
3. Streeter V.L., Wylie E.B. Hydraulic Transients. Mc Graw-Hill, NY, 1967. – 327 p.
4. Fox D.A. Gidravlicheskiy analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodakh (Hydraulic analysis of unsteady flows in pipelines). – Moscow: Energoizdat, 1981. – 248 p.
5. Rakhmatullin Sh.I., Gumerov A.G., Verushin A.Yu. O vliyaniy parametrov klapana-gasitelya na velichinu gidravlicheskogo udara v nefteprovode (On effect of surge relief valve parameters on the water hammer magnitude in oil pipelines) // Issues of oil and oil products collection, treatment and transportation. – 2009. – Issue 2 (76). – P. 76–78.
6. Lurie M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefiti, nefteproduktov i gaza (Mathematic 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 p.