

УДК 621.646

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

ПРЕДПРОЕКТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ МОРСКОГО НЕФТЕНАЛИВНОГО ТЕРМИНАЛА ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ

Предложен инженерный метод предпроектной оценки параметров защиты морских нефтеналивных терминалов от гидравлического удара, возникающего при экстренном закрытии судовых задвижек. Речь идет об определении числа предохранительных клапанов, их пропускной способности, а также о необходимой вместимости сбросной емкости. Такая оценка позволяет определить габариты устройств, входящих в систему защиты, и заблаговременно выделить для них место на причале.

Ключевые слова: морской нефтеналивной терминал, гидравлический удар, система защиты, предохранительные клапаны, объем сбросной емкости.

Система защиты от гидравлического удара (СЗГУ) является неотъемлемой частью любого современного морского нефтеналивного терминала. Она представляет собой крупногабаритный технологический объект причала и состоит из двух основных частей – блока предохранительных клапанов и резервуарной емкости для частичного сброса нефти в случае повышения давления в трубопроводе до предельно допустимого значения. Поскольку причал – сложное гидротехническое сооружение, насыщенное различным оборудованием для обработки судов, то уже на первых этапах его проектирования необходимо оценить размеры площадки, которую нужно выделить под СЗГУ. Оказывается, что предварительная оценка числа предохранительных клапанов, их пропускной способности и объема резервуарной емкости может быть выполнена на основе достаточно простых формул, сразу же после того как будут определены основные параметры терминала. Этими параметрами являются

максимальная проектная производительность погрузки судов, диаметр и протяженность наливного трубопровода, максимально допустимое рабочее давление для самого трубопровода и установленного на нем оборудования – узла учета, запорно-регулирующей арматуры и т.п.

Рассмотрим безнасосный налив судна, при котором требуемая производительность налива обеспечивается гидростатическим напором нефти в трубопроводе, обусловленным высотным расположением резервуарного парка. Предполагается, что СЗГУ расположена непосредственно у наливных стендеров причала, а причиной гидравлического удара является нештатное закрытие судовых задвижек. Задача состоит в определении суммарной пропускной способности предохранительных клапанов, способных защитить терминал от гидроударных процессов, а также в определении достаточной вместимости сбросного резервуара.

Для описания неустановившегося течения слабо сжимаемой жидкости в тру-

бопроводе, возникающего в результате закрытия судовых задвижек, используется известная система уравнений (1)

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

где $v(x,t)$ – скорость течения; $p(x,t)$ – давление; $\Phi = \lambda \rho v |v| / 2d + \rho g \sin \alpha(x)$; $\lambda(v)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\alpha(x)$ – 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 по формуле:

$$c = 1 / \sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho d}{E \delta}},$$

где δ – толщина стенки трубопровода; E – модуль Юнга материала трубы (для стали $E \approx 2 \cdot 10^5$ МПа); K – модуль упругости жидкости (для нефти $K \approx 1,4 \div 1,5 \cdot 10^3$ МПа).

Предположим, что переходный процесс в нефтеналивном трубопроводе вызван мгновенным закрытием судовых задвижек. Тогда краевые и начальные условия для решения системы уравнений (1) состоят в следующем:

- в начальном ($x = 0$) сечении трубопровода давление $p(0, t)$ – определяется уровнем взлива нефти в резервуаре: $p_0 = p(0, t) = \rho g H = const$, причем принимаем, что давление $p(0, t)$ постоянно и равно p_0 ;
- в начальный $t=0$ момент времени распределение давления соответствует стационарному режиму с давлением p_0 и расходом q_0 в начальном сечении ($x=0$) трубопровода;
- в конечном ($x=L$) сечении трубопровода, где находятся секущая задвижка и предохранительные клапаны, давление мгновенно увеличивается от начального значения $p(L, 0)$ давления перед стендерами до максимально разрешенного давления $p_{CЗГУ}^{настп}$ (уставки защиты СЗГУ) и поддерживается таковым для $t > 0$, т.е. во все время процесса, так что $p(L, t) = p_{CЗГУ}^{настп}$, причем расход жидкости равен расходу ее сброса в резервуар.

Для решения системы уравнений (1) воспользуемся хорошо зарекомендовавшим себя методом характеристик [1]. Согласно этому методу, давление $p_M(x_k, t_m)$ и расход $q_M(x_k, t_m)$ жидкости в произвольной точке $M(x_k, t_m)$ плоскости переменных (x, t) определяется как решение системы уравнений

$$\begin{cases} p_M(x_k, t_m) + \frac{\rho c}{F} q_M(x_k, t_m) = p_A(x_{k-1}, t_{m-1}) \\ + \rho c / F \cdot q_A(x_{k-1}, t_{m-1}) - \Phi_A(x_{k-1}, t_{m-1}) \Delta x \equiv J_A^{(+)} \\ p_M(x_k, t_m) - \frac{\rho c}{F} q_M(x_k, t_m) = p_B(x_{k+1}, t_{m-1}) - \\ - \rho c / F \cdot q_B(x_{k+1}, t_{m-1}) + \Phi_B(x_{k+1}, t_{m-1}) \Delta x \equiv J_B^{(-)} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\Delta x = x_k - x_{k-1}$ шаг сетки метода характеристик по оси трубопровода; $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ шаг счета по времени; $\Delta x = c \Delta t$.

Рассмотрим наливной трубопровод AB . В начальном сечении A трубопровода располагается резервуарный парк, в конечном сечении B – предохранительный клапан СЗГУ.

Для использования метода характеристик в рассматриваемом случае примем следующее упрощающее до-

пущение: шаг Δx вычислительной сетки положим равным протяженности L наливного трубопровода (рис. 1). Такое допущение вполне оправдано, поскольку наливные трубопроводы относятся к классу «коротких» трубопроводов, т.е. трубопроводов, имеющих относительно небольшую протяженность.

Допустим, что гидравлический удар произошел в момент времени $t = 0$. Из первого уравнения системы (2) имеем:

$$p_B(L, 0) + \rho \frac{c}{F} \cdot q_B(L, 0) = J_{A, -\Delta t}^{(+)} \quad (3)$$

где

$$J_{A, -\Delta t}^{(+)} \equiv p_{A, -\Delta t} + \rho c / F \cdot q_{A, -\Delta t} - \Phi_{A, -\Delta t} L.$$

Уравнение (3) связывает значения $p_{B, 0} = p_B(L, 0)$ и $q_{B, 0} = q_B(L, 0)$ давления и расхода жидкости в конце трубопровода (перед стендерами) в момент времени $t = 0$ закрытия судовых задвижек с давлением $p_{A, -\Delta t} = p_0$ и расходом $q_{A, -\Delta t} = q_0$ в начале трубопровода (у резервуарного парка) в момент времени, предшествующий начальному на величину Δt .

Возможны два случая в решении уравнения (3):

- $p_B \leq p_{CЗГУ}^{настп}$, т.е. давление перед клапанами СЗГУ меньше настроечного. В этом случае расход $q_B(L, 0) = 0$, и, следовательно, сброс через клапаны отсутствует;
- $p_B > p_{CЗГУ}^{настп}$, т.е. давление перед клапанами СЗГУ превысит настроечное. Тогда клапаны СЗГУ откроются и ограничат давление значением $p_{CЗГУ}^{настп}$, следовательно, нужно положить:

$p_B(L, 0) = p_{CЗГУ}^{настп}$. В этом случае из уравнения (3) определяется расход $q_{П, 0}$ перепуска нефти из внутренней полости наливного трубопровода в сбросной резервуар:

$$\begin{aligned} q_{П, 0} &= \frac{F}{\rho c} (J_{A, -\Delta t}^{(+)} - p_{B, 0}) = \\ &= q_0 - \frac{F}{\rho c} [p_{CЗГУ}^{настп} - (p_0 - \Phi_{A, -\Delta t} L)] \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку расход $q_{П, 0}$ сброса нефти из трубопровода через СЗГУ в момент закрытия судовых задвижек найден, то предохранительные клапаны должны обладать такой пропускной способностью, чтобы при разности $(p_{CЗГУ}^{настп} - p_{ам})$ давлений обеспечивать расход $q_{П, 0}$

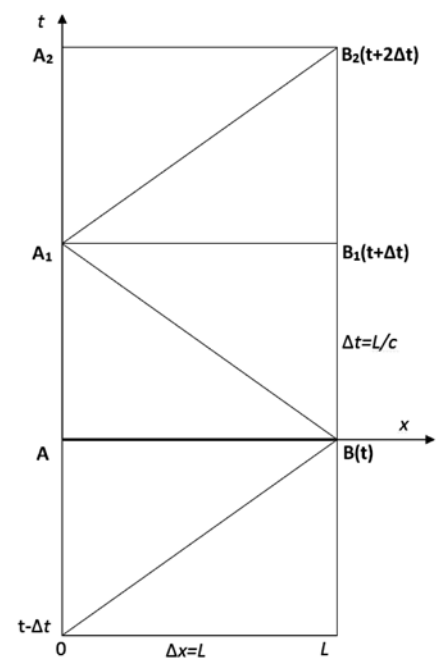


Рис. 1. Упрощенная сетка метода характеристик

($p_{ам}$ – давление в открытом опорожненном резервуаре). Зная типоразмер существующих клапанов, можно выбрать число предохранительных клапанов в составе СЗГУ и пропускную способность каждого из них так, чтобы общая пропускная способность при разности давлений $p_{CЗГУ}^{настп} - p_{ам}$ была не ниже $q_{П, 0}$.

Дадим теперь оценку объема $V_{CЗГУ}$ сброса нефти через СЗГУ, считая его равным минимально необходимому объему сбросного резервуара, обеспечивающему защиту трубопровода от гидравлического удара.

Пусть расход сброса $q_{П, t}$ нефти, перетекающей из трубопровода в сбросной резервуар, известен в произвольный момент t времени: например, в начальный момент он определяется выражением (4). Получим уравнение, выражающее расход $q_{П, t + 2\Delta t}$ в последующий момент $t + 2\Delta t$ времени через расход $q_{П, t}$ нефти в предыдущий момент t времени в предположении, что клапаны СЗГУ все еще открыты. Запишем уравнения системы (2) для характеристик BA_1 и A_1B_2 (рис. 1):

$$\begin{cases} p_0 - \frac{\rho c}{F} q_{A_1, t + \Delta t} = p_{CЗГУ}^{настп} - \frac{\rho c}{F} q_{П, t} + \Phi_{B_1} L, \\ p_{CЗГУ}^{настп} + \frac{\rho c}{F} q_{П, t + 2\Delta t} = p_0 + \frac{\rho c}{F} q_{A_1, t + \Delta t} - \Phi_{A_1, t + \Delta t} L. \end{cases}$$

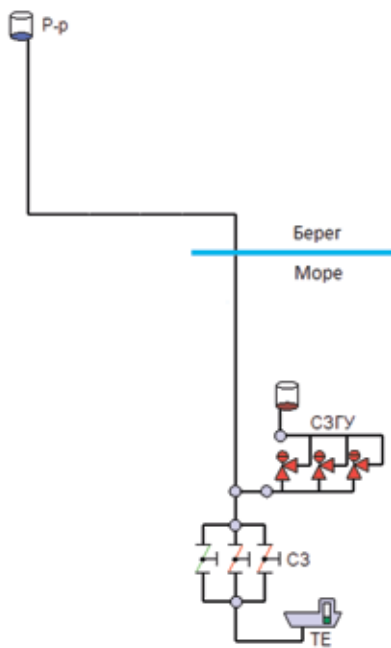


Рис. 2. Упрощенная схема морского нефтеналивного терминала

Из этой системы находим:

$$\begin{cases} q_{A,t+\Delta t} = q_{П,t} - \frac{F}{\rho c} [p_{СЗГУ}^{настр} - (p_0 - \Phi_{B,t}L)], \\ q_{П,t+2\Delta t} = q_{П,t} - \frac{F}{\rho c} \{ [p_{СЗГУ}^{настр} - (p_0 - \Phi_{B,t}L)] + [p_{СЗГУ}^{настр} - (p_0 - \Phi_{A,t+\Delta t}L)] \}. \end{cases} \quad (5)$$

Иными словами, связь расходов $q_{П,t+2\Delta t}$ и $q_{П,t}$ сброса нефти в резервуар в последовательные моменты времени t и $t + 2\Delta t$, где $2\Delta t = 2L/c$ – время двойного пробега волны давления от начала трубопровода к его концу. Формулы (4) и (5) дают решение поставленной задачи: расход $q_{П,0}$ сброса нефти в резервуар известен в начальный момент (формула 4), и известно выражение расхода $q_{П,t+2\Delta t}$ сброса в последующий момент времени через расход $q_{П,t}$ сброса в предыдущий момент времени. Следовательно, объем $V_{СЗГУ}$ нефти, перепускаемой через СЗГУ при гидравлическом ударе, можно определить по формуле:

$$V_{СЗГУ} = 2\Delta t \cdot \sum_{i=0}^n q_{П,t+2\Delta t \cdot i}, \quad (6)$$

где n – количество временных интервалов i перепуска нефти через СЗГУ протяженностью $2\Delta t = 2L/c$, в течение которых расход $q_{П,t+2\Delta t \cdot i}$ сброса нефти остается постоянным.

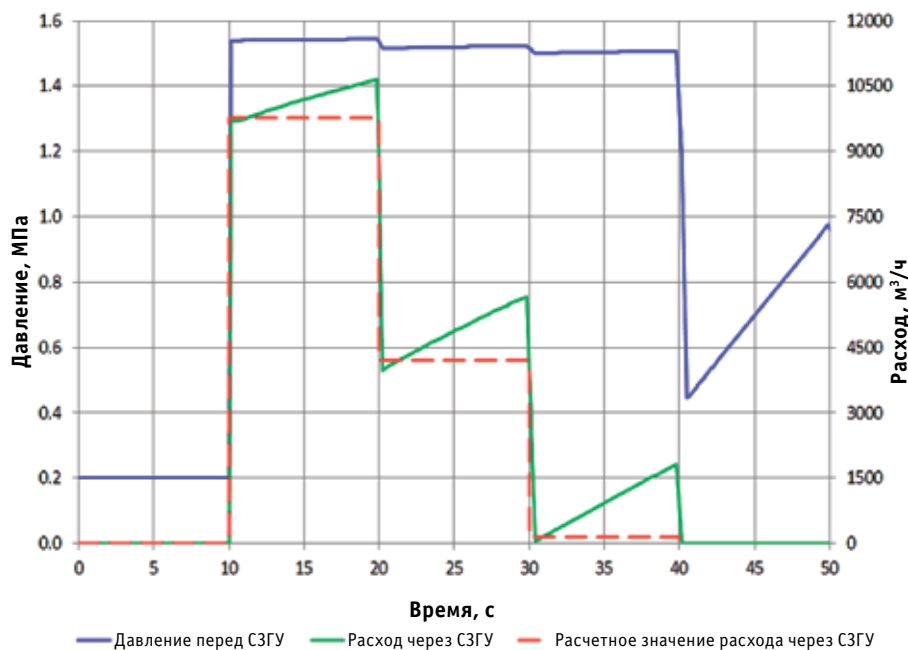


Рис. 3. Сравнение значений давления и расхода нефти через клапаны СЗГУ, найденные по приближенной методике (красная пунктирная линия) и полученные при более точных компьютерных расчетах (зеленая сплошная линия)

Из уравнений (5) следует, что в каждом следующем временном интервале расход сброса нефти через СЗГУ должен уменьшаться. Очевидно, что в общем случае сбросные клапаны СЗГУ должны быть настроены так, чтобы они оставались закрытыми, если давление перед ними меньше или равно гидростатическому $p_0 + \rho gh_{AB}$, где h_{AB} – разность высотных отметок начала и конца трубопровода.

Отсюда следует, что $p_{СЗГУ}^{настр} > (p_0 - \Phi_{B,t}L)$ и $p_{СЗГУ}^{настр} > (p_0 - \Phi_{A,t+\Delta t}L)$, поэтому $q_{П,t+2\Delta t} < q_{П,t}$. Иными словами, доказано, что расход сброса нефти из нефтеналивного трубопровода в сбросной резервуар постепенно уменьшается. Как только вычисленный по формуле (5) расход сброса станет отрицательным, это будет означать, что на соответствующем интервале времени предохранительные клапаны СЗГУ закрылись; при этом давление в трубопроводе будет меньше $p_{СЗГУ}^{настр}$.

В качестве примера дадим оценку максимального расхода $q_{СЗГУ}^{max}$, а также $V_{СЗГУ}$ объема нефти, перепускаемой через СЗГУ при гидравлическом ударе, вызванном мгновенным закрытием судовых задвижек в процессе налива судна. Производительность q_0 погруз-

ки примем равной $14\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$, диаметр наливного трубопровода – 1000 мм , протяженность $L = 5000 \text{ м}$. Погрузка происходит из резервуарного парка с высотной отметкой 100 м , причем $H = 10 \text{ м}$. В качестве физических свойства нефти принимаем значение ρ плотности равным 865 кг/м^3 и значение ν вязкости – равным 10 сСт . Пусть также давление срабатывания предохранительных клапанов СЗГУ (уставка защиты) равно $p_{СЗГУ}^{настр} = 1,5 \text{ МПа}$. Рабочее давление перед судовыми задвижками $p(L,0) = 0,2 \text{ МПа}$. Схема нефтеналивного терминала представлена на рисунке 2.

Выполним расчет переходных процессов с использованием компьютерной программы «Терминал», в которой исходная система уравнений (1) решается методом характеристик, однако при этом шаг Δx вычислительной сетки равен 10 м . Предварительно вычислим значение входящей в эту формулу скорости звука c , а также параметра $\Phi_{A,\Delta t}L$.

В соответствии с приведенной ранее формулой имеем:

$$c = \left(\sqrt{\frac{865}{1,5 \cdot 10^9} + \frac{865 \cdot 1}{2,0 \cdot 10^{11} \cdot 0,001}} \right)^{-1} = 995 \text{ м/с};$$

• по формуле Альтшуля вычисляем коэффициент λ гидравлического сопротивления при расходе $q(x,0) = q_0$.
Имеем:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,0001}{1} + \frac{68}{495150} \right)^{0,25} = 0,01365,$$

где $\text{Re} = vd/\nu$ число Рейнольдса; v – скорость потока нефти в трубопроводе; ν – вязкость;

• определяем $\Delta p_{-\Delta t}$ потери давления в трубопроводе

$$\Delta p_{-\Delta t} = \lambda \rho v |v| L / 2d = 0,01365 \cdot 865 \cdot 4,95^2 \cdot 5000 / (2 \cdot 1) = 0,723 \text{ МПа}.$$

Учитывая, что $p_0 - \Phi_{B,t} L = p_0 + \rho g h_{AB} - \Delta p_{-\Delta t}$, подставив полученные значения $\Delta p_{-\Delta t}$ и c в формулу (4), получаем значение $q_{\text{СЗГУ}}^{\text{max}} = q_{\text{п,0}}$ расхода нефти через СЗГУ:

$$q_{\text{п,0}} = 14000 - \frac{0,785}{865 \cdot 995} [1,5 - 0,2] \cdot 3600 \cdot 10^6 = 9762 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Сравним значение $q_{\text{СЗГУ}}^{\text{max}}$ максимального расхода сброса нефти через СЗГУ, определенное по приближенной формуле (4), с соответствующим значением, полученным при расчете нестационарных процессов с использованием компьютерной программы (рис. 3).

Зеленой линией на рисунке 3 показан график изменения расхода $q_{\text{п,t}}$ через предохранительные клапаны СЗГУ, полученный на основе более точных компьютерных расчетов; красная штриховая линия соответствует изменению этого расхода через СЗГУ, найденного по предлагаемой приближенной методике. Максимальное значение $q_{\text{СЗГУ}}^{\text{max}} = 9762 \text{ м}^3/\text{ч}$ расхода через СЗГУ, полученное по формуле (4),

практически совпадает с расходом, полученным по «точной» модели, в момент $t = 0$ времени закрытия судовых задвижек. Однако максимальное значение $q_{\text{СЗГУ}}^{\text{ДНН}} = 10655 \text{ м}^3/\text{ч}$ расхода через СЗГУ по «точной» модели оказывается несколько выше. Относительная погрешность σ_q определения расхода $q_{\text{СЗГУ}}^{\text{ДНН}}$ сброса нефти по предлагаемой упрощенной методике для рассматриваемого примера составляет примерно 8%:

$$\sigma_q = \frac{10655 - 9762}{10655} \cdot 100 \cong 8,4 \%$$

Оценку объема $V_{\text{СЗГУ}}$ нефти, перепускаемой через СЗГУ, выполняем по формуле (6). Расход $q_{\text{п,0}}$ сброса нефти через СЗГУ в момент закрытия судовых задвижек уже известен $q_{\text{п,0}} = 9762 \text{ м}^3/\text{ч}$. Используя последовательность вычислений, приведенную выше, рассчитываем расходы $q_{\text{п,t}+2\Delta t}$ и $q_{\text{п,t}+4\Delta t}$ сброса нефти для второго $t + 2\Delta t$ и третьего $t + 4\Delta t$ временных интервалов соответственно:

$$q_{\text{п,t}+2\Delta t} = 4209 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ и } q_{\text{п,t}+4\Delta t} = 146 \text{ м}^3/\text{ч},$$

после чего предохранительные клапаны СЗГУ закрываются. Так как для рассматриваемого примера продолжительность $2\Delta t = 2L/c$ интервала сброса составляет $2L/c = 2 \cdot 5000/995 \approx 10 \text{ с}$, то в соответствии с формулой (6) рассчитываем объем $V_{\text{СЗГУ}}$ сброса нефти

$$V_{\text{СЗГУ}} = 10 \cdot (9762 + 4209 + 146) / 3600 = 27,2 + 11,7 + 0,41 = 39,3 \text{ м}^3.$$

Значение $V_{\text{СЗГУ}}$ этого же объема, рассчитанное «точной» компьютерной программой, составляет 44,4 м³. Следовательно, погрешность σ_v оценки объема $V_{\text{СЗГУ}}$ сброса нефти через СЗГУ,

полученного расчетом по предлагаемым приближенным формулам, составляет

$$\sigma = \frac{44,4 - 39,3}{44,4} \cdot 100 \cong 11,5 \%$$

ВЫВОДЫ

Показано, что простые инженерные формулы для предпроектной оценки параметров СЗГУ морского нефтеналивного терминала позволяют с приемлемой точностью определить основные параметры системы защиты. Хотя предлагаемая «упрощенная» методика и дает несколько заниженный результат по сравнению с более точной, компьютерной моделью, погрешность не превышает 12% как по значению максимального расхода сброса, так и по величине объема необходимой резервуарной емкости. Это позволяет рекомендовать изложенную инженерную методику расчетов для предварительной предпроектной оценки параметров и габаритов причальной системы защиты наливных трубопроводов от гидравлических ударов.

Автор благодарит профессора М.В. Лурье за обсуждение результатов работы и продуктивные замечания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа // Нефть и газ. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2012. – 460 с.
2. Левченко Е.Л., Арбузов Н.С., Ходяков В.А., Цариков А.Г. Инженерные методы прогнозирования и профилактики гидроудара // Трубопроводный транспорт нефти. – 1995. – № 11. – С. 24–28.

Transport and storage of oil and gas

N.S. Arbuzov, PhD, department head of IMS Industries ltd, e-mail: Arbuzov@imsholding.ru

Pre-project estimating the parameters of protect systems of the marine oil terminals from the hydraulic shock

An engineering method for pre-project estimating the parameters of the protect system marine oil terminals from the hydraulic shock is presented in this paper. The method allows to calculate a number of safety valves and to find capacity of every from them. Such estimations are necessary to determine the size of the devices in the protect system to allocate a place for them on the jetty in advance.

Keywords: marine oil terminal, hydraulic shock, protect system, safety valves, outlet tank capacity.

References:

1. Lurie M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefti, i gaza (Mathematic modeling of processes of oil, oil products and gas transportation by pipelines) // Oil and gas. - Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas. – 2012. – 460 p.
2. Levchenko Ye.L., Arbuzov N.S., Khodyakov V.A., Tsarikov A.G. Inzhenernye metody prognozirovaniya i profilaktiki gidrouudara (Engineering methods for water hammer forecasting and preventing) // Oil transportation by pipelines. – 1995. – No. 11. – P. 24–28.