

ГИДРОУДАРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА МОРСКИХ НЕФТЕНАЛИВНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Н. С. Арбузов, В. А. Поляков

(РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина)

Ключевые слова: безопасность, морской нефтеналивной терминал, гидравлический удар, комбинированная система защиты

Key word: safety, marine oil loading terminal, hydraulic impulse, combined protection system

В настоящее время, когда увеличение экспортных объемов перевалки нефти и нефтепродуктов происходит в основном при строительстве новых морских нефтеналивных терминалов, обеспечение условий безопасной погрузки судов от волн гидравлического удара особенно актуально. Причиной возникновения волн повышенного давления в подводящих коммуникациях морского нефтеналивного терминала может послужить несанкционированное закрытие судовых задвижек в процессе погрузки судна или закрытие причальных задвижек дрейфовой безопасности в случае, если усилие на швартовочных канатах превышает допустимую величину, в связи с чем возникает опасность расшланговки стендеров. Кроме того, гидравлический удар может быть обусловлен самопроизвольным закрытием кранов узла редуцирования или кранов регулятора расхода узла учета нефти.

Защита трубопроводов морского терминала и установленного на них оборудования от волн гидравлического удара выполняется с помощью специальной системы защиты, включающей предохранительные клапаны, ограничивающие давление в трубопроводе заданной величины. Обычно ограничение давления достигается перепуском части нефти в причальную сбросную емкость.

Как правило, установка системы защиты от волн гидравлического удара непосредственно на причале у стендеров сопряжена с дефицитом места для размещения сбросной емкости, поэтому систему защиты вместе с этой емкостью выносят на берег. Поскольку, однако, протяженность технологического трубопровода от береговой системы защиты до стендеров может достигать нескольких километров (например, в Новороссийском морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума протяженность подводного участка трубопровода составляет 6 км), то береговая система защиты не может обеспечить необходимое ограничение давления в причальном участке трубопровода.

В другом варианте защиты морского терминала от волн гидравлического удара устройства защиты устанавливают непосредственно перед стендерами. Такой вариант хорошо обеспечивает безопасность причального участка трубопровода, однако, береговой участок с установленным на нем оборудованием, в первую очередь узлом коммерческого учета нефти, остаются защищенными слабо. Кроме того, при большой протяженности технологического трубопровода, использование одной только причальной системы защиты требует значительной вместимости сбросного резервуара, что вызывает трудности с ее размещением на причале.

Проблемы, возникающие при индивидуальном использовании причальной или береговой систем защиты от гидравлического удара, могут быть легко устранены с помощью использования комбинированной системы. Комбинированная система защиты оборудования от волн гидравлического удара включает береговую и причальную системы. Настройка этих систем выполняется специальным образом, позволяющим разделить технологический трубопровод морского терминала на два независимых участка (причальный и береговой). В результате достигается значительное снижение объема причальной сбросной емкости и обеспечивается надежная защита трубопроводного оборудования на причале и на берегу. В настоящее время подобные комбинированные системы защиты от волн гидравлического удара установлены на морских нефтеналивных терминалах портов Новороссийска и Козьмино.

Оба терминала, в Новороссийске и в Козьмино, работают по безнасосной схеме погрузки, поэтому остановимся более подробно на переходных процессах, возникающих в трубопроводе морского нефтеналивного терминала при остановке налива судна по безнасосной схеме погрузки.

Общее устройство системы защиты морского нефтеналивного терминала от волн гидравлического удара. Общее устройство системы защиты нефтеналивного терминала от гидравлического удара при безнасосной схеме погрузки судов представлено на рис.1.

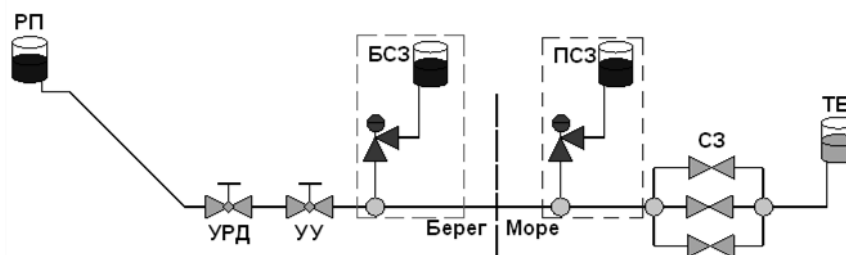


Рис.1. Общая схема безнасосной погрузки судна

Согласно безнасосной схеме погрузки судна, подача нефти по технологическому трубопроводу обеспечивается резервуарным парком (РП), расположенным на возвышении. Подача происходит через кран узла редуцирования (УРД), далее через узел учета нефти (УУ), стендеры и судовые задвижки (СЗ) в танкерную емкость (ТЕ). Кран УРД работает в режиме удержания давления после себя (перед узлом учета) на уровне, обеспечивающем заданную производительность погрузки. Для обеспечения безопасности погрузки технологический трубопровод морского нефтеналивного терминала может быть оборудован причальной системой защиты (ПСЗ), либо береговой системой защиты (БСЗ) или комбинированной системой защиты (КСЗ), включающей ПСЗ и БСЗ.

В случае прекращения погрузки, вызванного несанкционированным закрытием судовых задвижек, возникает волна давления, которая распространяется по технологическому трубопроводу в направлении резервуарного парка. ПСЗ и БСЗ ограничивают давление в трубопроводе на месте их установки на допустимом уровне при перепуске нефти в сбросные

емкости [1-3]. Одновременно с повышением давления перед стендерами выше определенного уровня система автоматики дает команду на закрытие крана узла редуцирования давления.

При использовании на трубопроводе морского терминала КСЗ настроечные давления ПСЗ и БСЗ выбираются так, что в случае закрытия судовых задвижек, сначала срабатывает ПСЗ, которая настраивается на более высокое давление, чем БСЗ. Волна давления от ПСЗ движется по трубопроводу в направлении БСЗ. Так как БСЗ настроена на низкое давление, то при срабатывании ее предохранительных клапанов давление в трубопроводе снижается, и в направлении ПСЗ начинает распространяться волна разрежения. С приходом этой волны клапаны ПСЗ закрываются, перепуск нефти в причальную сбросную емкость прекращается. Таким образом, для надежной работы КСЗ необходимо настроить давления срабатывания предохранительных клапанов БСЗ и ПСЗ так, чтобы давление перед стендерами с приходом волны разрежения от БСЗ снижалось до уровня, обеспечивающего закрытие клапанов ПСЗ. Только в этом случае можно минимизировать объем причальной сбросной емкости.

Моделирование переходных процессов, возникающих в трубопроводе морского терминала в случае прекращения погрузки судна. Для настройки и моделирования работы подводящего нефтепровода, оснащенного системой защиты от гидравлического удара, используются дифференциальные уравнения, описывающие волновые процессы в трубопроводе:

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

где $p(x,t), v(x,t)$ – давление и скорость нефти; d – внутренний диаметр трубопровода; ρ – плотность нефти; g – ускорение силы тяжести; $z(x)$ – профиль трубопровода ($dz/dx = \sin \alpha$, где α – угол наклона оси трубопровода к горизонту); λ – коэффициент гидравлического сопротивления; c – скорость распространения волн давления; x, t – координата и время. Решение этой системы осуществляется численно методом «характеристик» [4]. Рассмотрим результаты расчета в нескольких случаях.

Защита морского нефтеналивного терминала с использованием БСЗ. Если из схемы (см. рис. 1) исключить ПСЗ, выделенную штриховой рамкой, то получается схема безнасосной погрузки танкеров с использованием БСЗ. В качестве примера рассмотрим погрузку судна на причале морского нефтеналивного терминала с производительностью $12000 \text{ м}^3/\text{ч}$ из резервуарного парка, расположенного на возвышенности с высотной отметкой 315 м. По технологическому трубопроводу Ду 1200 и протяженностью 7000 м нефть поступает к УРД, расположенному на береговой линии с высотной отметкой 1 м. Затем по трубопроводу Ду 1000 протяженностью 2000 м нефть течет к стендерам, расположенным на причале с высотной отметкой 20 м, и далее поступает в танкер.

Даны графики изменения давления и расхода перед стендерами и узлом учета при гидроударе, вызванном закрытием судовых задвижек в процессе погрузки судна при работе БСЗ (рис. 2).

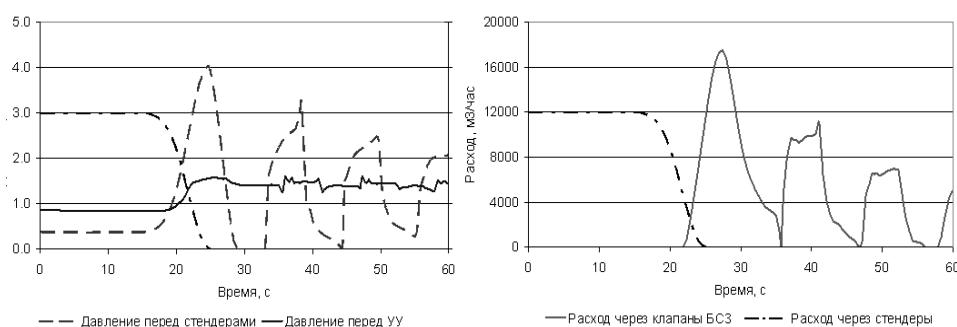


Рис.2. Изменение давления перед стендерами и узлом учета при гидроударе, вызванном закрытием судовых задвижек в процессе погрузки судна при работе БСЗ

При гидравлическом ударе, вызванном закрытием судовых задвижек в процессе погрузки судна, БСЗ ограничивает давление перед узлом учета на допустимом уровне 1,6 МПа. Однако давление перед стендерами достигает 4,0 МПа, что значительно превышает допустимый уровень 1,6 МПа (см. рис. 2). Таким образом, вынесенная на берег система защиты не обеспечивает защиты причального участка технологического трубопровода морского терминала и установленного на нем оборудования. Из графика изменения расхода через клапаны БСЗ видно, что перепуск нефти в береговую сбросную емкость продолжается в течение всего времени закрытия крана узла редуцирования (см. рис. 2). Суммарный объем сброса нефти составил 75 м^3 , причем максимальный расход нефти через предохранительные клапаны БСЗ составил $17500 \text{ м}^3/\text{ч}$ при производительности погрузки $12000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Действительно, с приходом к БСЗ волны давления от стендеров через предохранительные клапаны начинается сброс нефти, напесованной в причальном участке трубопровода. Кроме того, к предохранительным клапанам БСЗ продолжает поступать нефть от резервуарного парка с производительностью $12000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Если при выборе числа предохранительных клапанов, входящих в состав БСЗ, не учитывать эту особенность, то срабатывание БСЗ будет сопровождаться повышением давления в береговом участке трубопровода выше допустимого уровня.

Защита морского нефтеналивного терминала с использованием ПСЗ. Если из схемы (см. рис. 1) исключить БСЗ, выделенную штриховой рамкой, то получается схема безнасосной погрузки танкеров с использованием ПСЗ.

На рис. 3 представлены результаты расчета переходных процессов, возникающих при одновременном закрытии судовых задвижек за 10 с. При повышении давления перед стендерами до 1,2 МПа происходит автоматическое закрытие крана УРД за 2 мин.

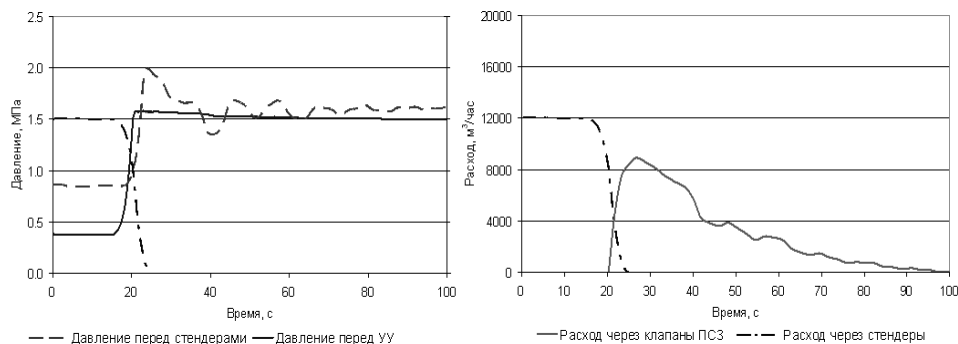


Рис. 3. Изменение давления перед стендерами и узлом учета при гидравлическом ударе, вызванном закрытием судовых задвижек в процессе погрузки судна при работе ПСЗ

Из графиков следует, что при гидравлическом ударе в случае погрузки судна с производительностью $12000 \text{ м}^3/\text{ч}$ предохранительные клапаны ПСЗ ограничивают давление перед стендерами на уровне $1,6 \text{ МПа}$. Однако давление перед узлом учета (см. рис.3) повышается до $2,0 \text{ МПа}$ при допустимом значении давления $1,6 \text{ МПа}$. Таким образом, в рассматриваемом случае ПСЗ не обеспечивает защиту узла учета и оборудования, установленного на береговом участке трубопровода. Сброс нефти через предохранительные клапаны ПСЗ продолжается до закрытия крана УРД. Объем сброса нефти составляет 75 м^3 . Учитывая, что для обеспечения возможности возобновления погрузки после гидроудара емкость резервуара должна вмещать нефть, сбрасываемую при двух последовательных гидроударах, на причале в данном случае пришлось бы устанавливать емкость более 150 м^3 , что в стесненных условиях причала сложно осуществить.

Защита морского нефтеналивного терминала с использованием комбинированной системы защиты. Схема безнасосной погрузки танкеров с использованием комбинированной системы защиты от гидроудара приведена на рис. 4, где представлены результаты расчета переходных процессов, возникающих при одновременном закрытии судовых задвижек за 10 с в процессе погрузки судна с производительностью $12000 \text{ м}^3/\text{ч}$. При повышении давления перед стендерами до $1,2 \text{ МПа}$ происходит автоматическое закрытие крана УРД за 2 мин .

В расчете клапаны береговой системы защиты настроены на срабатывание при $1,3 \text{ МПа}$, а клапаны ПСЗ - на $1,5 \text{ МПа}$.

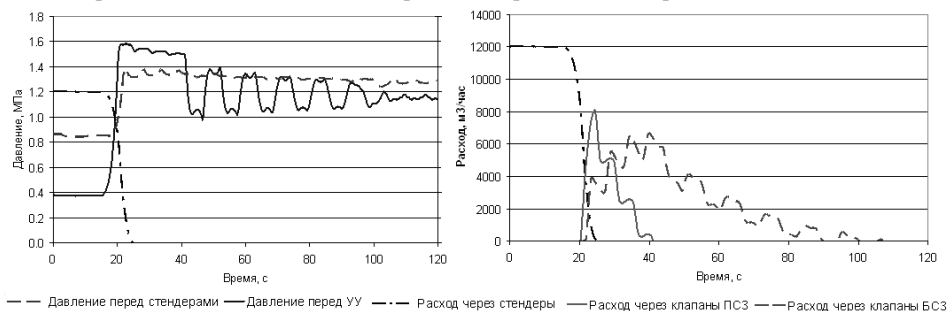


Рис. 4. Изменение давления перед стендерами и узлом учета при гидравлическом ударе, вызванном закрытием судовых задвижек в процессе погрузки судна при работе КСЗ

При закрытии судовых задвижек первыми срабатывают предохранительные клапаны ПСЗ. В результате волна давления с амплитудой $1,6 \text{ МПа}$ движется по трубопроводу в направлении БСЗ. Через 3 с после срабатывания ПСЗ срабатывают клапаны БСЗ и волна пониженного до $1,4 \text{ МПа}$ давления возвращается к ПСЗ, заставляя ее предохранительные клапаны закрыться. В итоге, объем нефти, перепускаемый в причальную сбросную емкость, составил 20 м^3 вместо 75 м^3 в предыдущем варианте с использованием одной только ПСЗ. Из графиков (см. рис. 4) видно, что перепуск нефти через ПСЗ продолжался 10 с , в то время как предохранительные клапаны БСЗ отработали 80 с , в течение которых происходило закрытие крана узла редуцирования.

Комбинированная система защиты морского нефтеналивного терминала от волн гидравлического удара, включающая береговую и причальную подсистемы, значительно уменьшает необходимую вместимость причальной сбросной емкости, не снижая при этом эффективности защиты.

Список литературы

1. E. Wylie, V. L. Streeter//Fluid Transients. – McGraw-Hill Int.Co. -1978 – 327 с.
2. Инженерные методы прогнозирования и профилактики гидроудара / Е. Л. Левченко, Н. С. Арбузов, В. А. Ходяков, А. Г. Цараков//Трубопроводный транспорт нефти. – 1995.- №11.-С. 24-28.
3. Учет наличия сосредоточенного отбора части жидкости при расчете гидроудара в трубопроводе на основе принципа суперпозиции/ А. Ю. Верушин, Ш. И. Рахматуллин, Н. П. Захаров/ Нефтяное хозяйство. – 2010 - №2. – С. 112-113.
4. М. В. Лурье. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. - М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. – 2003.- 335 с.
5. Фокс Д. А. / Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах: Пер. с англ. - М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.

Сведения об авторе

Арбузов Н. С., начальник лаборатории расчета переходных процессов в трубопроводах, РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, тел.: 8-916-901-75-28, e-mail: nsa55@mail.ru

Arbuzov N. S., Head of Laboratory for Designing transient processes in pipelines, Russia State University of Oil and Gas named after I.M.Gubkin, phone: 8-916-901-75-28, e-mail: nsa55@mail.ru