

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НЕФТЕПРОВОДЕ

Луценко М.Е.

Научный руководитель - профессор П.В. Бурков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Гидравлический удар в нефтепроводе – это явление резкого возрастания давления перекачиваемой жидкости в нефтепроводе, вызванное быстрым изменением скорости потока этого продукта за малый отрезок времени.

В случае столь стремительного изменения скорости потока в системе, сам нефтепровод, запорная арматура и ее составные элементы подвергаются воздействию сверхнормативного давления жидкости, что при длительной эксплуатации приводит к выведению из строя элементов магистрального нефтепровода.

Факторы, влияющие на величину избыточного давления:

- 1) Степень сжимаемости жидкости;
- 2) Скорость потока жидкости до изменения параметров течения;
- 3) Время гидравлического удара.

Жесткость стали, которая используется для изготовления нефтепровода, также является значительным фактором при определении силы гидравлического удара. Энергия потока перекачиваемого продукта не имеет возможности быстро преобразования в потенциальную энергию деформации нефтепровода или же сжатия перекачиваемой среды, отсюда следует быстрое изменения давления в месте расширения или сужения (преграды) и возникновению ударной волны. Давление в нефтепроводе напрямую воздействует на напряжения, возникающие в стенках нефтепровода, поэтому при достижении сверхнормативных значений давления и напряжения нефтепровод может потерять свою целостность.

В качестве объекта исследования выбран нефтепровод с наружным диаметром $DH = 1020$ мм, длиной 12 м из стали 09Г2С. Производительность нефтепровода и рабочее давление были подобраны в соответствии с [3]. Для каждого давления с шагом 0,1 МПа был произведен расчет толщины стенки нефтепровода в соответствии с [4].

$$\delta = \frac{n \times p \times DH}{2 \times (R1 + n \times p)}, \text{ где}$$

n – коэффициент надежности по внутреннему рабочему давлению в трубопроводе. В соответствии с [4] для данного нефтепровода $n = 1,15$; p – рабочее давление; DH – наружный диаметр трубы; $R1$ – расчетное сопротивление растяжению.

$$R1 = \frac{R1H \times m}{k1 \times kH}, \text{ где}$$

$R1H$ – нормативные сопротивления растяжению металла труб и сварных соединений. $R1H = 470$ МПа для стали 09Г2С в соответствии с [1]; m – коэффициент условий работы трубопровода. В соответствии с [4] $m = 0,99$; $k1$ – коэффициент надежности по материалу. Для выбранного нефтепровода $k1 = 1,34$; kH – коэффициент надежности по ответственности трубопровода. Для выбранного нефтепровода $kH = 1,1$.

Для компенсации коррозионного повреждения и неравномерности проката трубы толщина стенки в каждом случае была увеличена в среднем на 3 мм, при этом величина толщины стенки нефтепровода будет больше 12 мм, что удовлетворяет условию, указанном в [4].

Для вычисления повышения давления при гидроударе использована формула Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p = \rho \times c \times \Delta v, \text{ где}$$

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 . Принимаем плотность нефти $\rho = 850$ кг/м^3 ; c – скорость фронта ударной волны, м/с ; Δv – изменение скорости жидкости при гидравлическом ударе, м/с .

$$c = \frac{\sqrt{E0 \times \rho}}{\sqrt{1 + \frac{E0 \times d}{E \times \delta}}}, \text{ где}$$

$E0$ – модуль упругости жидкости. Для нефти $E0 = 1350$ МПа; d – внутренний диаметр трубы; E – модуль упругости материала стенок трубы. Для стали $E = 2 \times 10^5$ МПа.

$$\Delta v = \frac{4 \times Q}{\pi \times d^2}$$

С помощью табличного редактора MS Excel рассчитаем величину гидравлического удара при различных значениях рабочего давления и производительности нефтепровода с $DH = 1020$ мм, перекачивающего нефть с плотностью $\rho = 850$ кг/м^3 .

Таблица 1

Основные параметры гидравлического удара при текущих параметрах нефтепровода

Рабочее давление (МПа)	Производительность нефтепровода (млн. т./год)	Толщина стенки нефтепровода (мм)	Изменение скорости потока жидкости (м/с)	Величина перепада давления при гидроударе (МПа)
5,3	23	13	0,94	0,7
5,4	28	13	1,14	0,85
5,5	33	13	1,35	1
5,6	38	13	1,55	1,15
5,7	43	14	1,76	1,32
5,8	48	14	1,97	1,47
5,9	53	14	2,17	1,63

Моделирование производилось в системе автоматизированного проектирования SolidWorks 2020.

СЕКЦИЯ 16. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА

Для моделирования гидравлического удара были последовательно проведены следующие этапы: создана модель трубопровода с заданными параметрами, торцы трубы неподвижно зафиксированы, приложено давление во внутреннюю полость трубы и проведено исследование напряженно-деформированного состояния нефтепровода.

Параметры напряженно-деформированного состояния были рассчитаны для давлений 5,3-5,9 МПа с шагом 0,1 МПа. Сравнение возникающих в нефтепроводе напряжений с нормативными позволяет дать оценку надежности нефтепровода при возникновении гидравлического удара, что может найти отражение при строительстве новых линий магистральных нефтепроводов для обеспечения безопасности при его длительной эксплуатации, что является приоритетным направлением для всех компаний, обеспечивающих транспортировку нефти и нефтепродуктов. При оценке рисков возникновения гидравлического удара в нефтепроводе необходимо учитывать не только режим перекачки продукта, но и характеристики труб, применяемых при строительстве нефтепроводов.

Таблица 2

Параметры напряженно-деформированного состояния нефтепровода при различных режимах перекачки

Рабочее давление (МПа)	МАХ эквивалентное напряжение по Мизесу (МПа)	МАХ продольное напряжение (МПа)	МАХ кольцевое напряжение (МПа)	MIN коэффициент запаса прочности
5,3	260,9	262,4	134,9	1,341
5,4	271,8	273,4	140,8	1,288
5,5	282,7	284,4	146,4	1,238
5,6	293,6	295,3	151,9	1,192
5,7	263,0	284,2	150,5	1,331
5,8	329,4	288,0	149,1	1,063
5,9	341,2	298,3	154,5	1,026

Из полученных результатов были сделаны следующие выводы:

- избыточное давление при гидравлическом ударе в первую очередь зависит от параметров транспортируемой жидкости и скорости ее течения по трубопроводу;
 - для нефтепровода DN = 1020 мм при нормативных показателях перекачки рабочей среды только рабочее давление $p = 5,3$ МПа удовлетворяет условию надежности нефтепровода ($k_1 > 1,34$) и не требует использования более жестких материалов или утолщения стенки трубы, в остальных случаях нефтепровод не удовлетворяет условию надежности;
 - при стандартных условиях течения нефти по трубопроводу с нормированными показателями производительности, рабочего давления и механических характеристик трубопровода обеспечивается защита от возникновения пластической деформации при гидравлическом ударе, однако его возникновение оказывает негативное влияние на состояние трубопровода, запорной арматуры и ее элементов;
 - существует такой набор параметров и характеристик нефтепровода, перекачиваемого продукта и режима перекачки, при котором в соблюдении вышеперечисленной нормативной документации не выполняется условие надежности и условие прочности нефтепровода при гидравлическом ударе, что может привести к аварийной ситуации на участке магистрального нефтепровода, для чего требуется установка на участке нефтепровода средств защиты от гидравлического удара, таких как предохранительные клапаны, система сглаживания волн давления и т.д.

Литература

1. ГОСТ 32678 – 2014 Трубы стальные бесшовные и сварные холоднодеформированные общего назначения. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200114192>
2. Лурье М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: Учебник. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2017. – 477с.: ил.
3. РД 153 – 39.4 – 113 – 01 Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200032108>
4. СП.36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06 – 85* (с Изменениями N 1, 2) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200103173>