

ИЗОЛИРОВАННЫЙ ГИДРОУДАР. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Geanette Polanco, Muhammad Shakeel Virk, Umair N. Mughal, Sojo Victor, Da Paixao José, Vidal Antonio, Aguillón Orlando

перевод Усенко К. Ю.

Явление гидроудара связано с преобразованием кинетической энергии в энергию давления, это преобразование происходит по мере того, как условия текучести изменяются внутри трубы за довольно короткое время. В промышленности часто встречаются случаи прерывания потока в трубопроводных системах, из-за закрытия клапанов или остановки насосного оборудования. Это явление может привести к серьезным повреждениям, таким как разрушение труб, включая утечку рабочей жидкости в окружающую среду. Если система работает в тяжелых условиях, например, в холодных регионах, количество утечек рабочей жидкости увеличивается из-за изменения физических свойств жидкости, а также материала трубы в зависимости от температуры. Эффект гидроудара можно контролировать, фокусируя усилия на уменьшении приращения давления, которое происходит после создания гидроудара. Некоторые методы пытаются сократить время закрытия или скорость изменения закрытия поперечного сечения с помощью специальных клапанов, другие устанавливают дополнительные элементы для поглощения давления и рассеивания энергии, другие устанавливают предохранительные клапаны для снятия давления, а другие пытаются разделить трубопровод на небольшие секции, устанавливая обратный клапан с демпфером или обратным клапаном. Разделение трубопровода на более короткие участки часто используется для предотвращения возврата жидкости вниз по трубопроводу после остановки насоса. В этой работе численные результаты максимальных и минимальных значений давления на обоих концах замкнутого сечения сравниваются с экспериментальными данными. Численные результаты соответствуют экспериментальным данным.

1. Введение

Теоретически процесс гидроудара включает в себя преобразование кинетической энергии в энергию давления, это преобразование происходит, когда состояние жидкости изменяется внутри трубы за довольно короткое время. Давление появляется в виде волны давления, которая движется внутри

трубы от места, где клапан внезапно открывается или закрывается по направлению в обе стороны течения [1]. Время, когда эта волна должна достигнуть другого конца трубы, связана с длиной и скоростью звука в среде жидкости, которая обычно считается постоянной.

Эффекты гидроудара можно контролировать, фокусируя усилия на уменьшении величины приращения давления, которое может иметь место после появления явления. Некоторые из методов пытаются уменьшить время закрытия или уменьшить скорость изменения до закрытия через надлежащие скорости закрытия клапана (клапанами с медленным закрытием), другие пытаются уменьшить поток в системе (установление предела потока для конкретной системы), другие устанавливают дополнительные элементы в качестве аккумуляторов или аналогичным им, поглощающие скачок давления и рассеивающие энергию (волновые камеры или резервуары с диафрагмой), другие устанавливают предохранительные клапаны для снятия давления, другие модифицировали исходную систему с помощью обводных секций [2], а другие фокусировались на разделении трубопровода на небольшие секции (установка обратных клапанов с демпфером или обратным клапаном). Разделение трубопровода на разные секции, поскольку водяной молоток является предметом озабоченности, часто используется на круто поднимающихся насосных магистралях. Они помогают предотвратить возврат жидкости вниз по трубопроводу после остановки насоса.

Управление частыми прерываниями потока жидкости в трубе - обычная ситуация в отрасли и для одного потока это явление широко изучено и названо феноменом гидроудар. Эти перерывы приводят к резким изменениям скорости и, следовательно, изменениям давления внутри трубы. Часто это явление возникает между двумя секциями или внутри линии из-за закрытия клапанов или остановки насосного оборудования. Из-за значимости негативных последствий этого явления усилия сосредоточены не только на снижении негативных эффектов, но и на определении уровня надежности этих систем [3]. В этой статье будут представлены и обсуждены экспериментальные результаты закрытого участка трубопровода с пневматическим клапаном в начале и конце испытательного участка.

2. Характеристики гидроудара

Трубы, установленные в системах водоснабжения, ирригационных сетях, гидроэлектростанциях и промышленных предприятиях, должны отвечать некоторым требованиям надежности, безопасности и экономичности.

Текущие гидравлические системы работают в широком диапазоне режимов работы на протяжении всего их срока службы, включая изменения скорости потока, а также изменения давления.

Выбор подходящих средств для уменьшения эффекта явления гидроудара среди нескольких возможностей является очень важным фактором для надежного определения системы труб. Окончательный выбор будет наилучшим образом удовлетворять соответствующим требованиям конкретной системы. Идентификация связей между различными этапами явления, начало и завершение явления могут быть выражены когнитивным способом, а также с помощью математических инструментов, используемых для проведения необходимых вычислений.

Расчет переходных процессов через характеристический метод (МОС) основан на том, что уравнение баланса общего импульса можно упростить вдоль направления потока, и поэтому вместо системы дифференциальных уравнений необходимо решить однонаправленное дифференциальное уравнение [4]. После применения уравнение баланса импульса для переходной системы уравнение имеет вид (1):

$$L_s = \frac{dV}{dt} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{dp}{dt} + g \sin(\theta) + \frac{fV|V|}{2D} \quad (1)$$

Метод математического разрешения вводит схему дискретизации, которая разбивает дифференциальное уравнение на систему линейных уравнений для переменных: давление и поток для общей конфигурации, которая содержит три позиции «Р», «А» и «В» [4]. Окончательный набор уравнений позволяет систему уравнений (2) и (3):

$$H_P = H_A - B'(Q_P - Q_A) - RQ_P|Q_A| \quad (2)$$

$$H_P = H_B + B'(Q_P - Q_B) - RQ_P|Q_B| \quad (3)$$

где: H_P - напор в положении «Р»; H_A - напор в положении «А»; H_B - напор в положении «В»; Q_P - расход в положении «Р»; Q_A - расход в положении «А»; Q_B - расход в положении «В»; а R - коэффициент потерь.

Для определения времени, за которое волна давления дойдет от одного конца трубы до другого примем длину трубопровода L и скорость звука в жидкости C , как это видно из уравнения (4).

$$t_{\text{ref}} = L/c \quad (4)$$

Скорость волны давления связана со свойствами жидкости, а также с свойствами материала трубы и взаимодействия между этими переменными в переходном процессе, которые вместе определяют упругость системы, как показано в уравнении (5):

$$c = \sqrt{(K/\rho)/(1+(K.D)/(K'.e))} \quad (5)$$

где t_{ref} – время прохождения волны; L - длина трубы; C - скорость волны, ρ – плотность; K - модуль упругости жидкости; K' - модуль упругости материала трубы; D - внутренний диаметр трубы; e - толщина стенки трубы; V – скорость; p – давление; g - ускорение силы тяжести; θ - угол наклона сегмента трубы; f - коэффициент трения; B - локальный коэффициент потерь в сегменте. Важно подчеркнуть тот факт, что свойства текучей среды, а также свойства материала трубы зависят от температуры, поэтому, если температура системы изменится, то также изменится скорость.

3. Эксперименты и экспериментальный комплекс

Лаборатория механической конверсии энергии в Университете Симона Боливера (LABSEM-USB), Каракас, Венесуэла, разработала систему, способную выполнять измерения изменения давления внутри трубопроводной системы. Временное состояние, моделируемое во время эксперимента, состоит в резком закрытии клапанов с различными конфигурациями. Этот объект площадью около 50 м² расположен внутри лабораторного здания площадью 800 м², доступного для студентов, профессоров и исследователей на разных уровнях. Схематическое изображение испытательного объекта вместе с изображением, показывающим часть внутренних лабораторных объектов, представлено на рис. 1

Пневматическая система подключается к коллектору, который управляет электромагнитными клапанами, чтобы гарантировать одинаковое давление воздуха в обоих местах клапанов при закрытии.

Тестовая секция

Секция тестирования состоит в основном из трубы U-образной формы, ориентированной горизонтальной плоскостью, параллельной полу, где две

прямые части ограничены клапаном с обоих концов. Трубы в этом разделе представляют собой в основном прозрачный поливинилхлорид (ПВХ) с номинальным диаметром 24,5 мм. На обоих концах формы «U» длина разработки составляет 1350 мм (53 диаметра). Дисплейные секции, расположенные между двумя клапанами, имеют длину 3850 мм (в 151 раз больше диаметра), в которых можно оценить полностью развитый узор монофазного или двухфазного потока. Наконец, размер криволинейной секции составляет 1500 мм (в 59 раз больше диаметра). Тестовый участок можно наблюдать на рисунке 2.

В зависимости от выбранной конфигурации закрывающего клапана система смоделировала инкапсулированную секцию трубы типичной ситуации с гидроударом [5]. Выбранная конфигурация соответствовала закрытию обоих клапанов за время, равное 0,24 с.

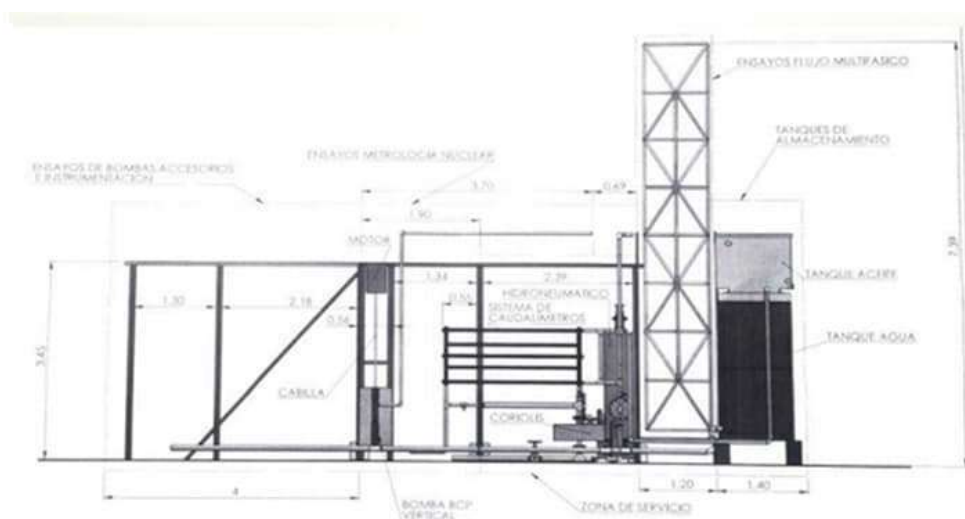


Рисунок 1 – Универсальное двухфазное устройство для временных исследований в трубах LABCEM-USB

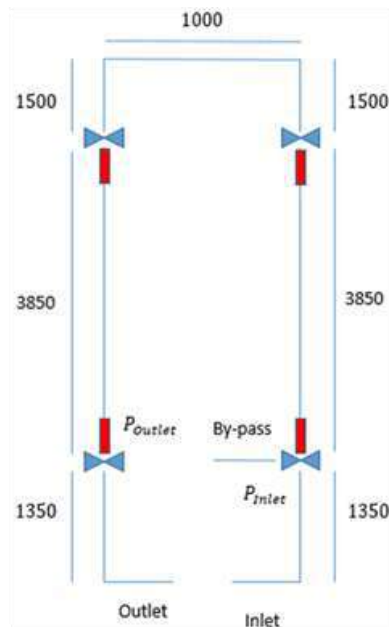


Рисунок 2 – Тестовая секция, указывающая местоположение прибора.
Размеры в [мм]

4. Изолирование потока

Разделение трубопровода с помощью нескольких клапанов вдоль трубопровода повсеместно распространено. Эту секцию можно организовать с помощью регулирующих клапанов или обратных клапанов, что позволит избежать обратного потока в поднимающихся секциях, защитить механические элементы, такие как насосы, представленные на трубопроводе, или просто соединять или разъединять трубопровод в разных местах. Когда происходит закрытие клапана, поток внутри этой секции, ограниченный обоими клапанами, будет испытывать гидравлический удар. Эта секция может быть представлена как в горизонтальных, так и в вертикальных системах. Первоначальное понимание этого явления может быть выполнено без влияния гравитации на систему.

В этой работе специально испытательная секция соответствует горизонтальной секции, ограниченной двумя управляемыми клапанами, работающими одновременно.

5. Результаты

Численный расчет охватывает типичный случай резервуара, подключенного к трубопроводу, заканчивающимся клапаном, но имеющего потери давления по длине, включая потери на трение, а также локальные потери, представленные в разрезе. Максимальные и минимальные

безразмерные значения давления на обоих концах, полученные для числовой модели испытательного участка, представлены в таблице 1. Как и ожидалось, максимальное значение давления на выходе тестовой секции больше максимального давления восходящего потока (вход). Это можно объяснить тем, что перенос волны давления внутри трубы теоретически будет проходить с одинаковой скоростью, однако тот факт, что клапан, расположенный во впускном положении, также закрывается, останавливает постоянное давление, подаваемое насосом, расположенным перед изученным участком.

Разница в величинах между максимальным избыточным давлением и вакуумметрическим давлением также может быть связана с этим фактом, поскольку волна будет двигаться в том же направлении, что и поток, создаваемый большей площадью всасывания после впускного клапана.

Модель включает в себя эквивалентные потери в системе только через трение. Это предположение означает, что потери линейно распределены вдоль трубы. Проверялась зависимость результатов от числа используемых элементов. Значения, определяющие цельность, включают свойства материала труб из ПВХ.

Представленные экспериментальные данные сфокусированы на переменной давления в разных местах испытательной секции и в стационарном состоянии, и в переходном состоянии. В таблице 2 показано начальное состояние стационарного состояния экспериментов. На рисунке 3 представлено записанное максимальное и минимальное давление, достигнутое на обоих концах испытательной секции.

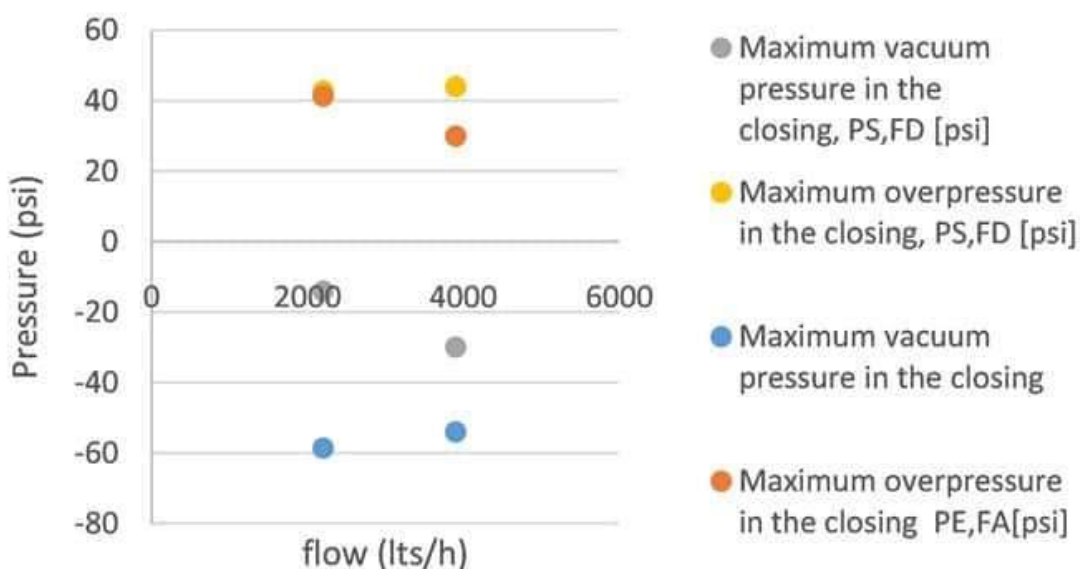


Рисунок 3 – Максимальное манометрическое давление и вакуумметрическое давление на обоих концах испытательной секции

Таблица 1 – Численное относительное максимальное и минимальное давление в начале и в конце тестового участка.

Flow [l/h]	Steady state conditions		Steady state conditions	
	P_{\max_inlet}/P_{inlet} [-]	P_{\min_inlet}/P_{inlet} [-]	$P_{\max_outlet}/P_{inlet}$ [-]	$P_{\min_outlet}/P_{inlet}$ [-]
2200	1.85	-1.72	1.98	-0.98
3900	1.23	-1.92	2.31	-1.24

Таблица 2 – Условия течения и давления.

Flow [l/h]	Steady state conditions	
	P_{inlet} [psi]	P_{outlet} [psi]
2200	34	25.6
3900	32.0	24.0

Также безразмерные приращения давления и уменьшение давления на входе и выходе. Исходным количеством, используемым для примененного безразмерного определения, было давление в месте входа (максимальное давление в установившемся режиме), представлены в таблице 3.

Данные, приведенные в таблице 3, относятся к входному давлению как к максимальному давлению в секции при установившемся состоянии. Различия между теоретическими и экспериментальными данными могут быть связаны с несколькими аспектами того факта, что модель предположения о желательности заключается в том, что свойства и толщина стенок поддерживаются постоянными вдоль длины трубы или модель закрытия клапана не представляет достаточно точно фактическая работа клапанов. Известно, что значение давления под давлением обратно пропорционально времени закрытия, а также в зависимости от типа закрытия, за которым следует клапан [6]. Численные результаты, полученные при моделировании участка испытания, переоценивают фактические значения изменения давления, однако результаты расчетов следуют тем же тенденциям, что и экспериментальные данные.

6. Выводы

Основные выводы из этой работы показывают, что модель с использованием MoC воспроизводит ситуацию с ограничением раздела двумя клапанами на соответствующих концах тестовой секции. Из результатов

можно заметить, что максимальное приращение давления расположено в нижнем по течению месте испытательной секции (выпускного отверстия), в то время как минимальное давление расположено в месте (входе) в восходящем направлении испытательной секции. Уровень вакуума по сравнению с начальным давлением в установившемся режиме больше, чем приращение при сравнении с, тем же параметром. Дальнейшие исследования необходимы для завершения параметрического исследования этого явления.

Таблица 3 – Экспериментальное относительное максимальное и минимальное давление в начале и конце испытательного участка.

Flow [l/h]	Inlet location		Outlet location	
	$P_{\max_inlet}/P_{inlet} [-]$	$P_{\min_inlet}/P_{inlet} [-]$	$P_{\max_outlet}/P_{inlet} [-]$	$P_{\min_outlet}/P_{inlet} [-]$
2200	1.22	-1.72	1.26	-0.41
3900	0.94	-1.69	1.38	-0.94

Список источников

1. Parmakian, J. (1955) Waterhammer Analysis. Prentice-Hall, New York. [Citation Time(s):1]
2. Choon, T.W., Aik, L.K., Aik, L.E. and Hin, T.T. (2012) Investigation of Water Hammer Effect through Pipeline System. International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, 2, 48-53. [Citation Time(s):1]
3. Wang, R., Wang, Z., Wang, X., Yang, H. and Sun, J. (2014) Water Hammer Assessment Techniques for Water Distribution Systems. Procedia Engineering, 70, 1717-1725. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.189> [Citation Time(s):1]
4. Streeter, V.L. (1966) Fluid Mechanics. McGraw-Hill. [Citation Time(s):2]
5. Alejandro, S.P.V. (2015) Rediseño y adaptación para el estudio de golpe de ariete en el banco de pruebas de flujo multifásico del LABCEM-USB. Bachelor in Mechanical Engineering Bachelor, Mechanical Engineering, Simon Bolivar University, Caracas, Venezuela. [Citation Time(s):1]
6. Polanco, G. (2014) Cognitive Selection Strategy for Rapid Closing Valves. 5th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2014), Vietri sul Mare, 5-7 November 2014, 543-548. <http://dx.doi.org/10.1109/coginfocom.2014.7020516> [Citation Time(s):1]