

- технічний збірник / Б.А. Ляшенко, Л.А. Лопата, Е.К. Соловых, А.Е. Соловых, А.В. Ворона. – Вып. 41. – Часть 2. – Кировоград, 2011. – С. 73–79.
6. Дубчак, В.С. Опыт Мурманского СПЗ по восстановлению деталей методами газотермического напыления / В.С. Дубчак. – В/О «Мортехинформреклама» // Серия «Судоремонт». – Вып. 20. – Москва, 1987. – С. 1–10.
7. Дорожкин, Н.Н. Применение активированной электродуговой металлизации для нанесения антикоррозионных покрытий / Н.Н. Дорожкин, В.Э. Барановский, А.П. Елистратов, А.С. Прядко // Морской транспорт. Серия «Судоремонт», Э.-И. – Вып. 2(531). – 1985. – С. 9–12.
8. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский – Мн.: Бестпринт, 2004. – 192 с.
9. Похмурська, Г.В. Зносостійкість лазерно модифікованих електродугових поривів з порошкового дроту ФМІ-2 / Г.В. Похмурська, В.М. Довгунік, М.М. Студент // ФХММ – 2003 – № 4. – С. 61–64.

Матеріал поступив в редакцію 16.11.15

**DUDAN A.V., VORONA T.V., AGEEV M.S., LYASHENKO B.A. Application of hybrid technology for renovation an increased resource details of ships and machinery**

It presents various combinations of primary hardfacing technology for the renovation and improvement of the resource details of ship machinery. Currently, promising are integrated or combined methods hard facing (hybrid technology) coating in conjunction with the modification, the application of multi-layer, multi-functional coatings; development of integrated multioperational technologies. In all conditions, increasing scarcity of expensive alloying materials included in the composition of steels requiring high strength properties of the complex, are promising hybrid technology peening (restore) the surfaces of mild steel.

УДК 519.876.5

**Нерода М.В., Наранович О.И., Шах А.В.**

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ЭЛЕМЕНТАХ ТРУБОПРОВОДА

**Введение.** Задача создания трехмерных моделей трубопроводов возникает при проектировании оборудования различных отраслей машиностроения, при создании различных гидравлических систем, в нефтегазовой промышленности при создании трубопроводной обвязки, а также при проектировании различных инженерных коммуникаций, подводок и шлангов.

Широкое распространение трубопроводов в промышленности и быту заставляет проектировщиков более тщательно подходить к выполнению сборки, выбору материала при создании отдельных элементов конструкции и тестированию эксплуатационных характеристик.

Часто под действием различных факторов, таких как износ материала деталей трубопровода, значительный напор жидкости, подаваемой через трубу, внезапное перекрытие крановой задвижки и следующего за ним гидравлического удара жидкости, происходит разрыв труб и деформация функциональных элементов, приводящих к выходу из строя системы (рис. 1).



Рис. 1. Пример повреждения трубопровода в результате гидравлического удара

Одним из распространенных факторов, вызывающим повреждение системы, является гидравлический удар – это скачкообразное изменение давления жидкости, протекающей в напорном трубопроводе, возникающее при резком изменении скорости потока. В более развернутом смысле, гидравлический удар представляет собой быстротечное чередование «скачков» и «провалов» давления, сопровождающееся деформацией жидкости и стенок трубы, а также акустическим эффектом, похожим на удар молотком по стальной трубе.

Актуальность выбранной темы состоит в том, что возникающие переходные режимы и сопровождающие их волновые процессы становятся причиной разрушения трубопроводов, арматуры, поломки насосов или других нарушений нормальной работы установок, и, таким образом, компьютерное моделирование и изучение воздействия гидравлических ударов позволит повысить надежность и эффективность работы гидравлических систем, что, в более широком плане, повысит их конкурентоспособность.

Для защиты трубопроводов от гидравлических ударов решающее значение имеют совершенные методы расчета и надежная конструкция противоударных устройств, а также правильная их эксплуатация. Метод расчета должен позволять получить достаточно точные значения ударных давлений на протяжении всего трубопровода.

Объект исследований. Объектом исследования был выбран линейный трубопровод, оборудованный на одном конце регулирующим органом (насосом или задвижкой), а на другом конце регулирующим резервуаром. Около насосов, как правило, устанавливаются обратные клапаны. Материал изготовления элементов трубопровода – сталь.

Предметом исследования является изучение возможности применения компьютерных систем конечноэлементного анализа для моделирования процессов деформации элементов трубопровода в результате гидравлического удара.

Результаты построения модели в среде Solidworks 2009 представлены на рисунке 2.

**Нерода Михаил Владимирович**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения инженерного факультета Барановичского государственного университета.

**Наранович Оксана Ивановна**, к.ф.-м.н., доцент, заведующая кафедрой информационных систем и технологий инженерного факультета Барановичского государственного университета.

**Шах Александр Васильевич**, м.т.н., преподаватель кафедры информационных систем и технологий инженерного факультета Барановичского государственного университета.

Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская обл.-ть, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

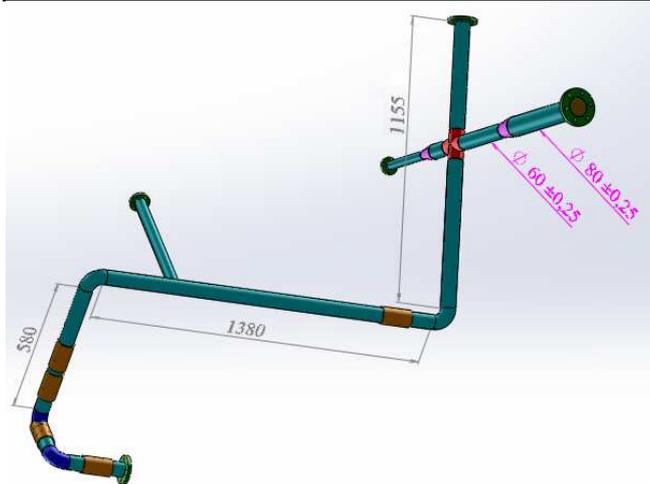


Рис. 2. Общий вид элемента трубопроводной системы

Наиболее точное определение величины максимальных понижений и повышенных давлений и мест их возникновения в трубопроводе в процессе гидравлического удара позволяет предусматривать наиболее эффективные и надежные в данных условиях способы защиты. Полученные в ходе расчета значения помогают предсказать возможные поломки системы, а включение трубопроводной обвязки в трехмерную модель изделия позволяет решить многие проблемы уже на этапе проектирования и избежать ситуаций, когда на этапе монтажа оказывается, что трубы неправильно изогнуты, мешают работе других систем или в существующей конструкции недостаточно свободного пространства для прокладки всех необходимых коммуникаций.

Средства конечноэлементного моделирования. Для проектирования элементов трубопровода в среде SolidWorks существует специальная надстройка Routing. Используя ее в своей работе, инженер может легко и компактно расположить линии обвязки в сборке изделия, исключить возможность взаимного пересечения труб и конструкции, быстро получить данные о длинах труб, тем самым сократить время проектирования, и на его ранних этапах получить точные данные о потребностях в материалах. В SolidWorks Routing автоматизированы многие рутинные процессы по прокладке траекторий осевых линий, маршрутов трубопровода, добавлению арматуры и изоляции, получению документации на трубопровод и информации

для трубогибочного оборудования.

SolidWorks Flow Simulation является модулем гидрогазодинамического анализа в среде SolidWorks. Он позволяет рассчитывать силовое воздействие текучей среды, движущейся относительно некоторого твердого тела, на его конструкцию или ее элементы. В частности силы и моменты, которые необходимо преодолевать при управлении различной трубопроводной арматурой: затворами, вентилями, клапанами. В случае больших размеров этой арматуры данные силы и моменты являются весьма существенными [4].

Полученные результаты расчетов можно вывести в виде всевозможных графиков, диаграмм и анимации, а также экспортировать в CAE-модуль Simulation для просмотра конечно-деформированного состояния твердого тела.

SolidWorks Simulation – это программная надстройка САПР для решения задач расчета на статическую прочность и устойчивость в линейной и нелинейной постановке, выделения собственных частот колебаний, оптимизации формы деталей и сборок, анализа усталости и поведения конструкции при ударе [5].

Основная часть. На начальном этапе расчетов проектировщику требуется указать тип расчетной задачи и дополнительные параметры, которые будут учитываться при расчете, например, гравитация, теплообмен, зависимость расчета от времени.

В качестве типа расчетной задачи в данном случае выбирается внутренняя задача «Internal», поскольку рассматривается течение жидкости внутри неподвижной конструкции. В качестве дополнительных параметров был установлен флаг напротив метки «Time-dependent», поскольку явление гидравлического удара протекает в течение короткого промежутка времени, то есть расчет имеет зависимость по времени [5]. В качестве общего интервала времени расчета было указано значение равно 3,7 с. Для шага по времени, через который будет производиться запись результатов, установлено значение в 0,1 с.

Затем проектировщик выбирает тип среды, с которой он будет работать. При рассмотрении эффекта гидравлического удара, с целью максимально приблизить результаты к действительности, в качестве расчетной среды указывалась сжимаемая жидкость (Water-compressible). Кроме того, требуется задать разновидность течения жидкости: ламинарное, турбулентное или оба вышеуказанных. В качестве расчетного течения было указано только ламинарное, поскольку именно данный вид течения является актуальным при расчетах трубопроводов [4, 5].

Далее указываются шероховатость поверхностей внутренних стенок трубопровода (0,8 мкм), исходное давление в трубе (4 МПа) и



Рис. 3. График изменения давления по времени

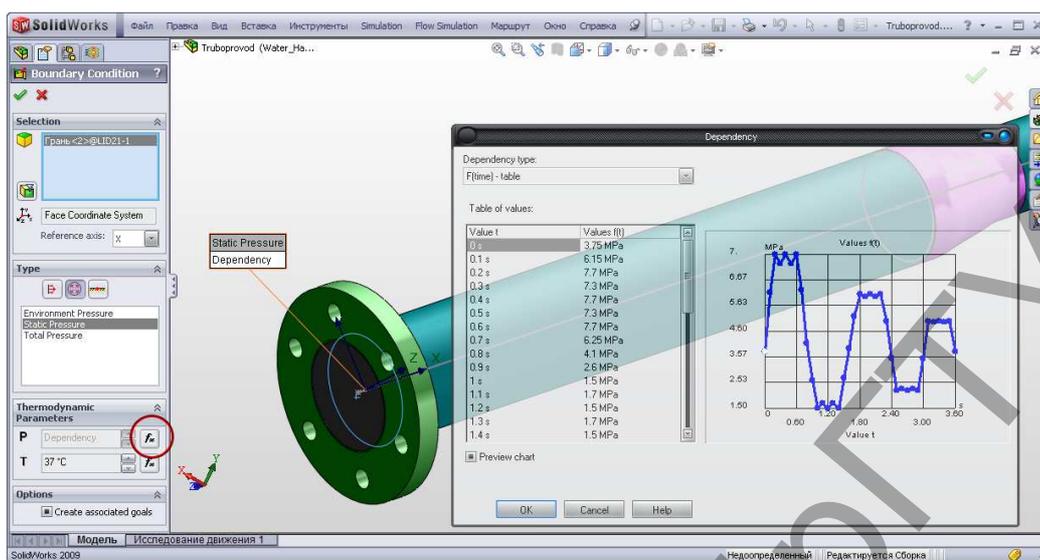


Рис. 4. Задание зависимости давления от времени

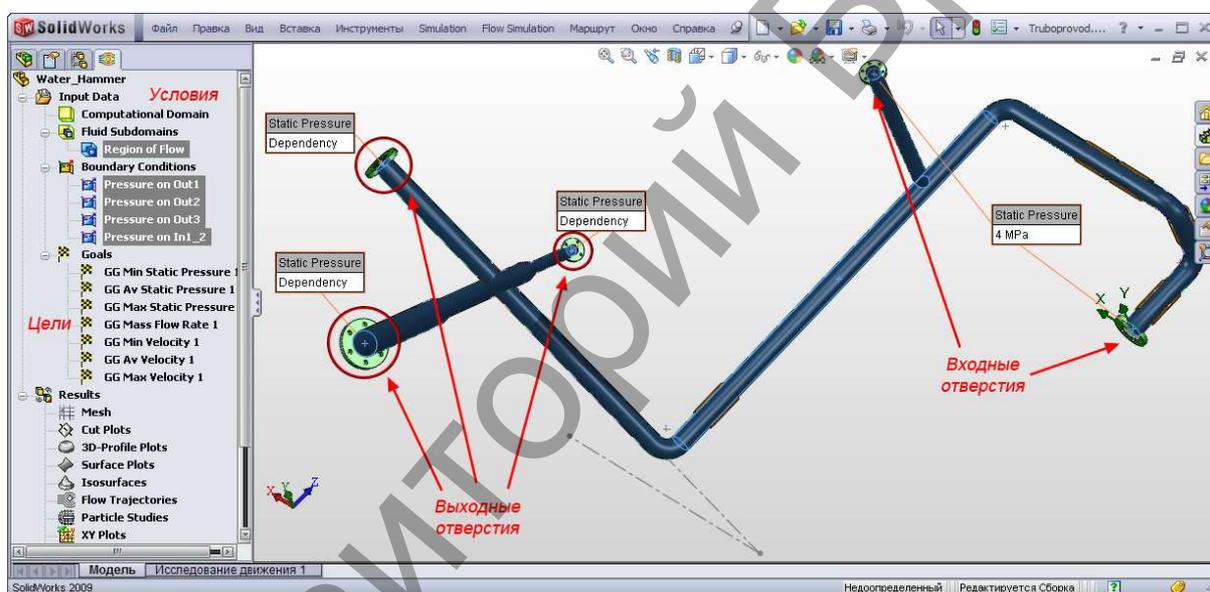


Рис. 5. Общий вид и список заданных граничных условий

температура среды (37 °C). После завершения выбора всех настроек расчетной задачи, к сборке требуется приложить необходимые граничные условия как входные и выходные отверстия. Для каждого из них соответственно необходимо задать статическое давление.

Пусть в конце трубы, по которой движется жидкость, произведено мгновенное закрытие крана. Тогда скорость частиц жидкости, натолкнувшись на кран, будет погашена, а их кинетическая энергия перейдет в работу деформации стенок трубы и жидкости. При этом стенки трубы растягиваются, а жидкость сжимается в соответствии с повышением давления. На заторможенные частицы у крана набегает другие, соседние с ним частицы и тоже теряют скорость. Когда ударная волна переместится до резервуара, жидкость окажется сжатой во всей трубе, а стенки трубы – растянутыми. Ударное повышение давления распространится на всю трубу [2, 3].

Протекание гидравлического удара во времени иллюстрируется графиком изменения давления по времени у «завдвижки», представленном на рисунке 3.

Величина ударного давления волны постепенно затухает, это связано с трением в трубах и рассеиванием энергии в резервуаре. В экспериментальных опытах Н.Е. Жуковского регистрировалось до 12 полных циклов гидравлического удара.

Чтобы узнать, как изменяется картина распределения давления, на выходной «завдвижке» требуется задать зависимость давления от времени. Для этого производится заполнение созданной таблицы парами значений давление/промежуток времени. Задание зависимости давления от времени представлено на рисунке 4.

Аналогичным способом устанавливается давление на входных отверстиях, кроме того, что значение давления остается постоянным 4 МПа.

Далее задаются цели проектирования «Goals». В качестве целей проектирования с учетом расчетов были выбраны статическое давление, массовый расход жидкости и скорость течения. Общий вид и список заданных граничных условий представлен на рисунке 5.

**Результаты расчетов.** После завершения работы конечноэлементного решателя программа загружает и выводит на экран результаты для последней заданной отметки времени. Распределение давления в трубопроводе в момент гидравлического удара представлено на рисунке 6.

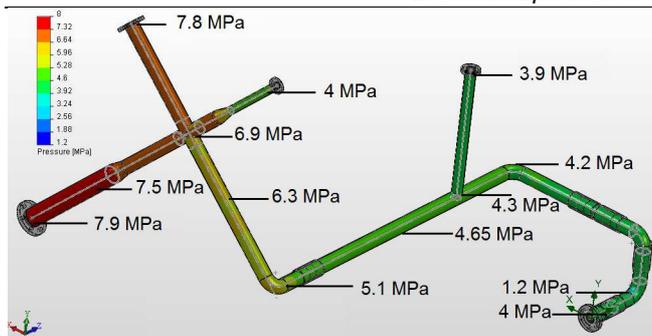


Рис. 6. Распределение давления в трубопроводе в один из моментов времени

После столкновения с «задвижкой» частицы жидкости создают напор и, сохранив некоторую часть энергии движения, меняют направление и движутся в обратную сторону.

Основное напряжение при гидравлическом ударе приходится на ближайшие к «задвижкам» трубы и соединительные элементы. В зависимости от диаметра сечения трубы и применяемого материала деформация стенок может быть разнообразной. При малой толщине трубы, большом диаметре сечения и большом давлении, возникающем при гидравлическом ударе, может произойти разрыв трубы. В то же время при большей толщине трубы и меньшем диаметре сечения (данный случай) можно ограничиться лишь упругими деформациями.

Значение наибольшего давления в трубопроводе по результатам компьютерного моделирования составило 7,929 МПа. Значение минимального давления остановилось на отметке 1,209 МПа. Средняя скорость движения жидкости составила 33,583 м/с.

Далее полученные результаты необходимо экспортировать в SolidWorks Simulation, где производилось построение сетки конечных элементов и выполнялся статический расчет. Результаты деформации трубы в момент гидравлического удара представлены на рисунке 7.

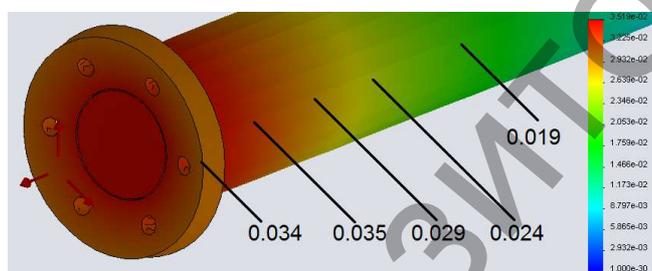


Рис. 7. Эпюра деформации трубы

Согласно полученным значениям, наибольшая деформация конструкции возникает в области закрытой «задвижки» в момент соударения и составляет 0,035 мм.

Для предотвращения и смягчения гидравлического удара, на практике, часто увеличивают время срабатывания задвижек и других устройств.

Аналогичный эффект достигается установкой перед этими устройствами компенсаторов в виде достаточных местных объемов жидкости, гидроаккумуляторов или предохранительных клапанов. Уменьшение скорости движения жидкости в трубопроводах (увеличение диаметра труб при заданном расходе) и уменьшение длины трубопроводов также способствуют снижению ударного давления [1], [2], [3].

**Заключение.** Применяемые в настоящее время различные методы проектирования трубопроводов и разработанные элементы для противоударной защиты показывает, что в целом этот вопрос к настоящему времени во многих случаях разрешен. Однако часто из-за неправильно определенных или недостаточно точных параметров гидравлического удара предусматривается неэффективная либо чрезмерная защита.

Моделирование конструкции с помощью систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа выгодно как с технической, так и с экономической стороны, поскольку оно позволяет существенно сократить период проектирования изделий, снизить финансовые затраты на их производство, а также выполнить быстрый запуск продукции в эксплуатацию.

Предлагаемая методика позволила с достаточной для практики точностью определить напор (7,929 МПа) и скорость потока жидкости (33,583 м/с) в расчетных точках во время протекания удара, а также деформацию стенок трубопровода (0,035 мм). При расчетах имеется возможность учитывать время регулирования потока, профиль укладки водовода, температурные воздействия и особенности поверхности материала труб.

Используя параметрический подход, при внесении изменений в конструкцию изделия, автоматически корректируются размеры сегментов трубопроводов и места расположения арматуры. Таким образом, возможно организовать коллективную работу различных специалистов над единым проектом в единой среде и выявить потенциальные ошибки до того, как они проявятся в производстве, а так же используя созданную ранее модель, провести испытания для нескольких вариантов условий функционирования будущего трубопровода для выявления наиболее оптимальных параметров.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]; под ред. И.Н. Якуниной. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.: ил.
2. Киселев, П. Г. Гидравлика: Основы механики жидкости. Учебное пособие для вузов / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.: ил.
3. Мейерс, М. А. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / А.М. Мейерс.; под ред. Г.Н. Эпштейна. – М.: Металлургия, 1984. – 512 с.: ил.
4. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский [и др.]; под ред. Е.В. Кондуковой. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 1040 с.: ил.
5. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.: ил.

Материал поступил в редакцию 02.10.15

#### NIARODA M.V., NARANOVICH O.I., SHAH A.V. Computer simulation of hydraulic shock in the pipeline elements

This article discusses the process of modeling and research element of pipeline valves at the moment hydraulic shock using CAD-systems SolidWorks and CAE-ons Simulation and Flow Simulation. It is found that with the pressure of 7,9 MPa and flow rate of liquid of 33,5 m/s maximum deformation pipeline wall was 0,035 mm.