

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ
АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА
РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ И
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

ТРУДЫ

XIV Всероссийского научного семинара

г. Белокуриха, Алтайский край

8 – 13 сентября 2014 г.

**Иркутск
2014**

ФГБУН Институт Систем Энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН

ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН

**ФГБОУВПО Российский государственный университет
нефти и газа им. И.М. Губкина**

XIV Всероссийский научный семинар

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Труды семинара

8 – 13 сентября 2014 г.

г. Белокуриха, Алтайский край

Иркутск
2014

УДК 519.6+519.8

Труды XIV Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Белокуриха, Алтайский край, 8-13 сентября 2014 г. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2014. – 410 с.

ISBN 978-5-93908-145-0.

В сборнике научных трудов обсуждаются актуальные проблемы математического моделирования трубопроводных систем (ТПС) энергетики – тепло-, водо-, нефте-, и газоснабжения, а также развития методов теории гидравлических цепей, имеющих межотраслевое значение.

Сборник предназначен для сотрудников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, преподавателей вузов, студентов и аспирантов.

Ответственный за выпуск: к.т.н. Токарев Вячеслав Вадимович

Без объявления.

ISBN 978-5-93908-145-0

© Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2014

УДК 004.942, 532.595.2, 532.5.032, 532.542, 519.688, 621.6

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В РАМКАХ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА "ГИДРОСИСТЕМА"

Юдовина Е.Ф.¹, Лисин С.Ю.¹, Тарасевич В.В.², Ли А.К.², Мороз А.А.³ (1ООО
"НТП Трубопровод", Москва; ²НГАСУ, Новосибирск;
³ЗАО "Ломмета", Новосибирск)

В работе описывается модуль расчета гидравлического удара, разработанный в рамках программного комплекса "Гидросистема" для гидравлического и теплового расчета широкого круга трубопроводов. Модуль может применяться для расчета переходных процессов в транспортирующих жидкость трубопроводных системах произвольной топологии, включая технологические трубопроводы и инженерные сети. Приводится используемая математическая модель и описывается применяемый метод решения для уравнений гидравлического удара - явная схема бегущего счета. Описывается программная архитектура и пользовательский интерфейс модуля, его возможности и ограничения.

Программный комплекс «Гидросистема» [1, 2], разработанный в НТП «Трубопровод», уходит корнями в 70-е годы прошлого века. Чтобы его развитие шло в ногу с потребностями рынка, разработчики время от времени рассылали анкеты пользователям с просьбой обозначить особо важные с их точки зрения усовершенствования. Последние 10 лет гидравлический удар оставался одной из наиболее приоритетных задач.

В настоящей работе описывается дополнительный модуль к «Гидросистеме», предназначенный для расчетов неустановившихся течений (гидравлического удара). Для решения этой задачи используются идеи и результаты работы [4], опубликованных в трудах нашего семинара.

«Гидросистема» предназначена для гидравлического и теплового расчета трубопроводов произвольной конфигурации, в том числе магистральных и технологических трубопроводов, и инженерных сетей.

Целью разработки было создать коммерческий модуль, который был бы в состоянии анализировать переходные процессы в любом трубопроводе, рассчитываемом «Гидросистемой». В качестве источников гидроудара рассматривались следующие виды событий (а также их комбинации):

- Закрытие или открытие задвижек;
- Включение или отключение насосов.

Каждое из этих событий может происходить как мгновенно, так и плавно по следующим законам:

- Линейно,
- Гладко (сплайн- или тригонометрическая аппроксимация).

Кроме того, можно задать запаздывание наступления каждого из событий по отношению ко времени начала расчета.

В будущем планируется расширить спектр возможных аварийных и нештатных ситуаций, вызывающих нестационарный процесс.

Как правило, нестационарный процесс развивается на базе исходного стационарного режима, который определяется стационарным гидравлическим (проектным) расчетом. Расчет гидравлического удара выполняется по методике, изложенной в [4]. Для оценки гидравлических потерь используется так называемая гипотеза «квазистационарности», т.е. потери напора для нестационарного режима рассчитываются по тем же зависимостям, что и для стационарного. Считается, что температура при этом не меняется (изотермический процесс).

Процесс распространения возмущений по трубам описывается известными уравнениями гидравлического удара в виде [3, 4]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\tau \chi}{\rho \omega} - g \frac{dz}{dx}, \quad (2)$$

где p и V – соответственно, давление и средняя по сечению скорость потока жидкости, τ – касательное напряжение трения о стенки, χ – смоченный периметр, g – ускорение силы тяжести, $z = z(x)$ – вертикальная отметка оси трубопровода, a – скорость распространения малых возмущений (скорость волны гидравлического удара по Жуковскому [3]).

Трубопроводная система представляется в виде ориентированного связного графа, дугами которого являются участки труб, а узлами – соединяющие их сопротивления и другие устройства. Если гидравлические сопротивления, отличные от труб, имеют некую длину, то она добавляется к длине соседнего участка. Начальные условия, в частности, исходные распределения давлений и расходов по трубам, задаются по результатам стационарного расчета; помимо того, по результатам стационарного расчета могут корректироваться или уточняться некоторые граничные условия.

Для численного расчета применяется явная схема бегущего счета [5], широко используемая в газовой динамике. Этот метод подразумевает переформулировку задачи в новых переменных, называемых инвариантами Римана.

Как отмечалось в работе [5], инварианты Римана определяются неоднозначно. В данной работе инварианты задаются следующим образом:

$$\varphi = (p + \rho a V + \rho g z) / 2, \quad \psi = (-p + \rho a V - \rho g z) / 2. \quad (3)$$

Исходные «естественные» переменные p и V выражаются через инварианты (1.3) следующим простым образом

$$p = \varphi - \psi - \rho g z, \quad V = (\varphi + \psi) / \rho a. \quad (4)$$

Учитывая, что вклад конвективных слагаемых $V \partial p / \partial x$ и $V \partial V / \partial x$ в общий процесс для значительно дозвуковых скоростей ($|V| \ll a$) весьма мал, и учитывая соотношения (3)–(4), для цилиндрического трубопровода уравнения (1) – (2) сводятся к виду:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + a \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\tau \chi a}{2\omega}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} - a \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{\tau \varphi a}{2\omega}. \quad (6)$$

Данные уравнения представляют собой упрощение общих уравнений неустановившегося течения в трубах для случая изотермического переходного процесса при малых числах Маха и слабой зависимости плотности и скорости звука в жидкости от давления.

Система уравнений (5)–(6) относительно давления и скорости продукта решается методом конечных разностей на прямоугольной сетке с выбранным программой шагом по времени Δt и соответствующими шагами по длине Δx . При этом используется явная схема бегущего счета [5], аппроксимирующая уравнения с первым порядком точности. Эта схема имеет ограничения на шаги (условие Куранта) вида

$$\frac{a\Delta t}{\Delta x} \leq 1. \quad (7)$$

Классы модуля гидроудара и их связь с классами «Гидросистемы»

Система классов модуля гидроудара представлена на рис. 1

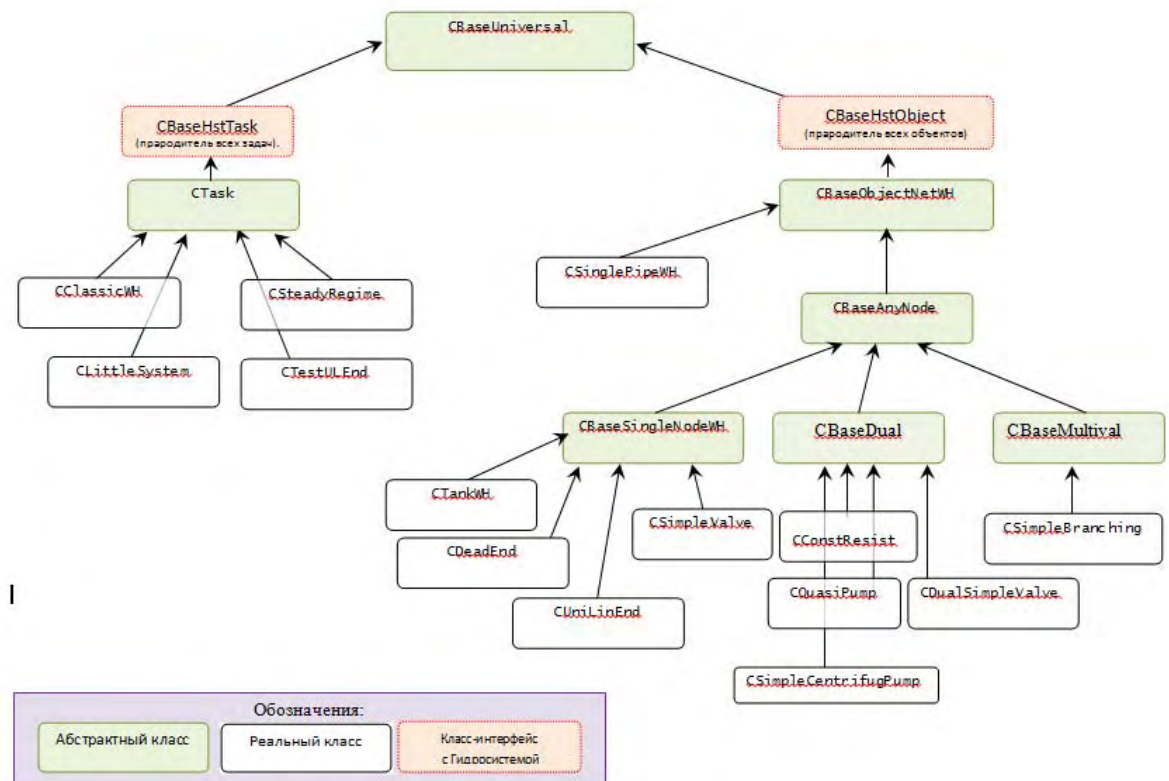


Рис. 1. Классы модуля гидроудара

Класс CTask является прародителем классов для Unit-тестирования модуля. В классе CBaseHstTask осуществляется построение графа расчета гидроудара на основе модели трубопровода программы «Гидросистема».

Участки труб (дуги графа) описываются классом CSinglePipeWH, узлы – производными от класса CBaseAnyNode. CBaseSingleNodeWH, CBaseDual и

СBaseMultival – базовые классы для одно-, двух- и мультивалентных узлов. Более подробно классы узлов описаны ниже. Одновалентные узлы:

- CTankWH – резервуар. Характеризуется высотой столба жидкости, которая принимается постоянной.
- CDeadEnd – заглушка.
- CSimpleValve – задвижка на конце. Характеризуется гидравлическим сопротивлением ζ и внешним давлением. Можно задать открытие/закрытие задвижки, а также закон изменения сопротивления во времени.
- CUniLineEnd – линейный универсальный тупик, задаваемый формулой вида: $aH + b\eta v Q = f(t)$, где $f(t)$ – произвольная функция одного аргумента (задаваемый закон изменения). Здесь H и Q задают, соответственно, напор и расход, коэффициенты при них считаются известными (задаются).

Двухвалентные узлы:

- CConstResist – гидравлическое сопротивление с постоянными (возможно различными) значениями коэффициентов сопротивлений на входе и на выходе.
- CDualSimpleValve – задвижка с трубами на входе и выходе. Может закрываться/открываться, характеризуется определенным при стационарном расчете значением ζ .
- CQuasiPump – «квази-насос», характеризующийся номинальным расходом. Может включаться или выключаться (изменять подачу) в соответствии с заданным пользователем законом. Весьма правдоподобно моделирует работу насосов объёмного типа.
- CSimpleCentrifugPump – центробежный насос, снабженный обратным клапаном. Характеристика насоса задается по трём характерным точкам: напором и расходом в оптимальной точке, в точках с минимальным и максимальным расходом.

Многовалентный узел:

- CSimpleBranching – узел разветвления (без учета потерь в узле).

После выполнения стационарного расчета модель трубопровода Гидросистемы преобразуется в расчетную модель гидравлического удара. Связь между классами-узлами графа и точечными сопротивлениями «Гидросистемы» приведена на рис. 2. Слева на рисунке представлены классы «Гидросистемы» [1], справа – модуля гидроудара.

Далее задается шаг счета, и определяются шаги по длине труб таким образом, чтобы для каждой трубы выполнялось неравенство (1.7). При этом каждая дуга графа делится на равные участки, но длины участков для разных дуг могут быть различны.

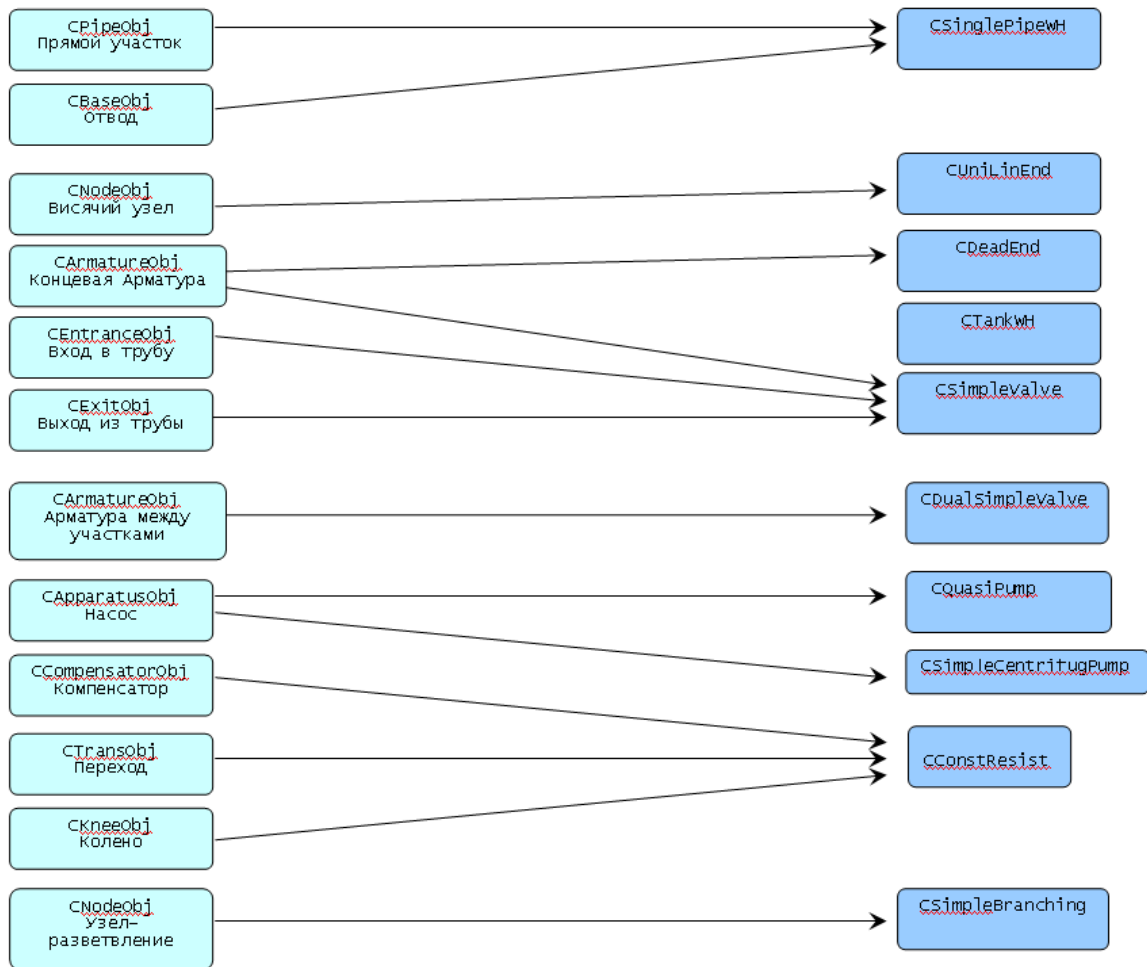


Рис.2. Преобразование классов Гидросистемы в классы модуля Гидроудара.

Пользовательский интерфейс модуля Гидроудара

Так как модуль Гидроудара встроен в программу Гидросистема, то основные элементы его пользовательского интерфейса те же, что и у программы в целом. Для трубопровода в целом можно задать шаг по времени, с которым происходит вывод рассчитанных данных в файл и в графическое окно. Если этот шаг больше, чем шаг счета, то информация будет выводиться не на каждом шаге. Расчет займет меньше времени, но при этом возможно «проскакивание» экстремумов, что может привести к искажению графических результатов.

После запуска расчета гидроудара пользователь может включить визуализацию любого из рассчитываемых параметров – напора, давления, скорости или расхода. Величины параметров в процессе расчета отображаются на схеме цветом в соответствии с приведенной ниже «легендой» (см. Рис. 3). Кроме того, пользователь может задать точки наблюдения на участках труб – и рассчитываемые параметры в этих точках будут отображаться в окне списка в виде таблицы, а также выводиться в виде графиков. На Рис.4 представлены графики расчета гидроудара в точках

наблюдения, заданных на Рис.3. Вид графиков обусловлен тем, что задвижка 1 линейно закрывается за 1 сек.

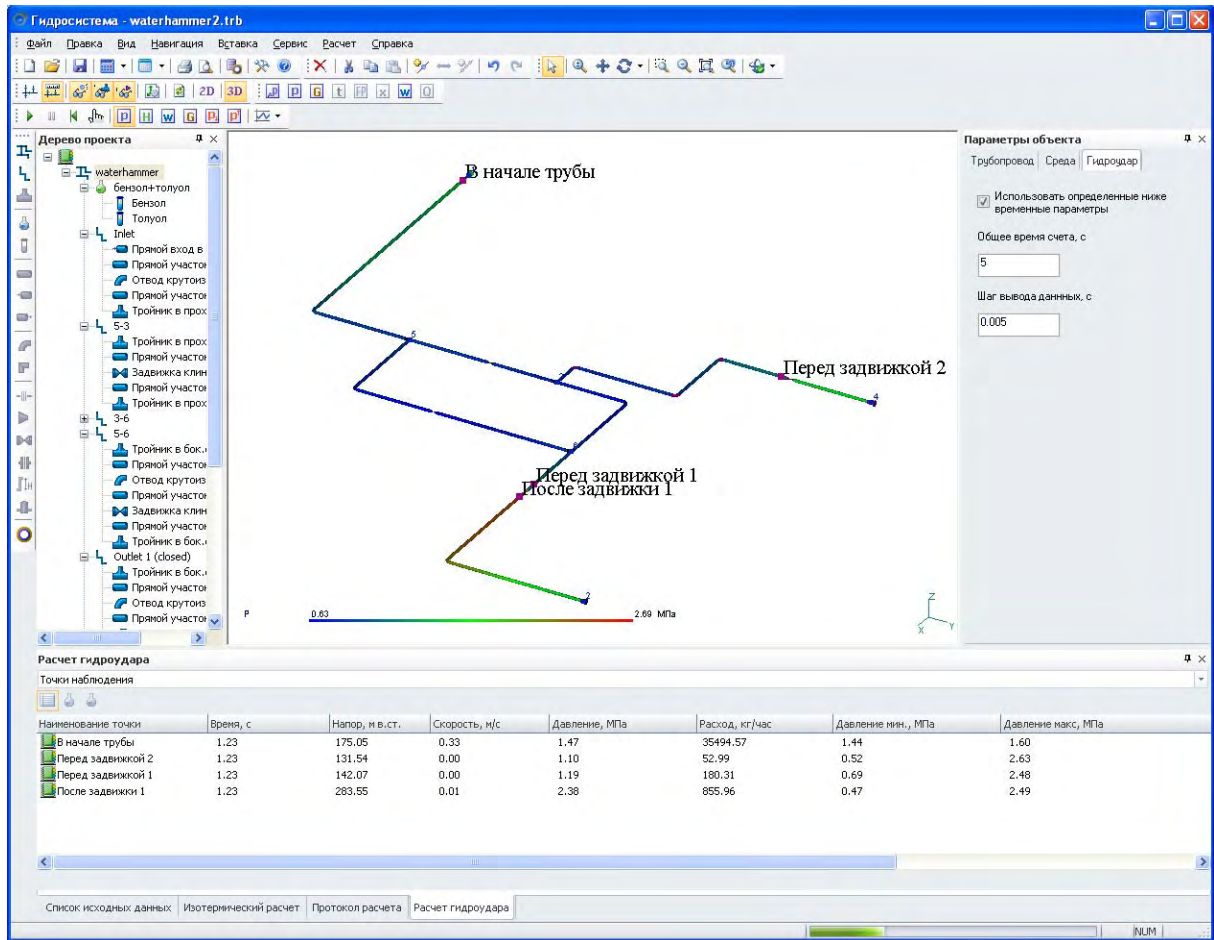


Рис. 3. Пользовательский интерфейс модуля

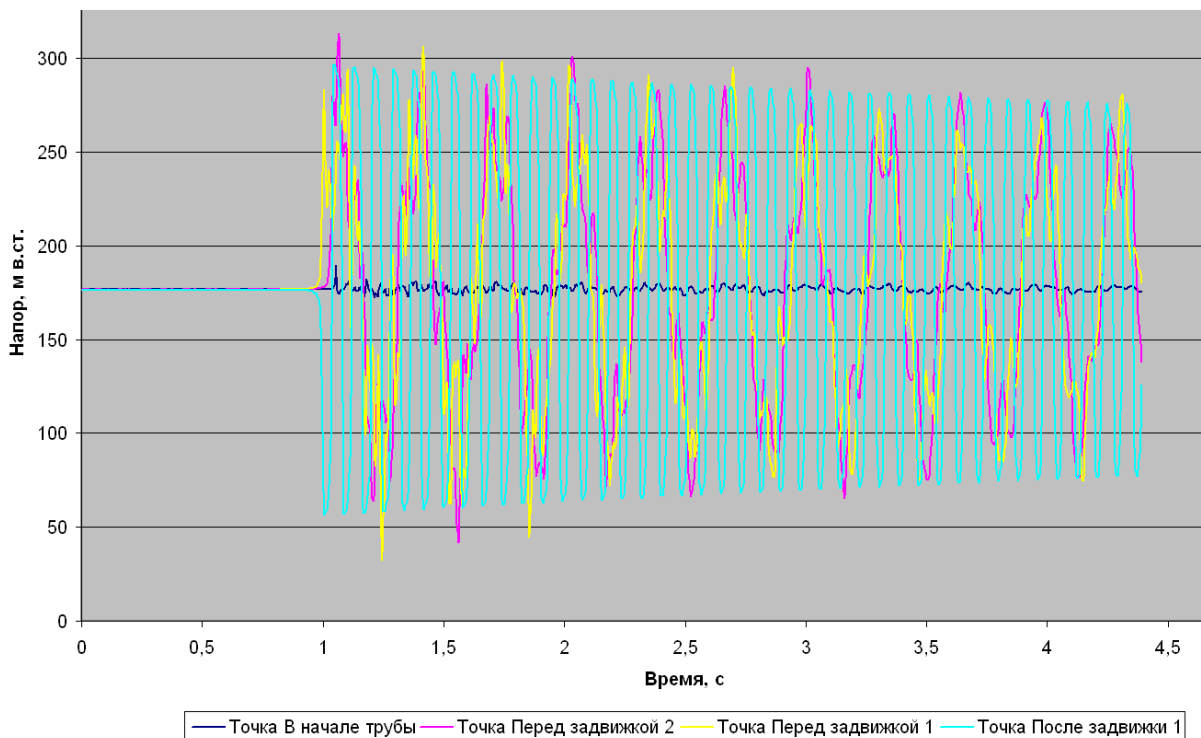


Рис.4. Графики напора в точках наблюдения

Преимущества и недостатки модуля.

Не секрет, что в последнее время на рынке появилось немало программных комплексов, так или иначе рассчитывающих гидравлический удар. В чем же преимущества описываемого модуля?

- Модуль рассчитан на трубопроводные системы произвольной конфигурации, включая кольцевые, причем усложнение топологии не приводит к усложнению расчетов и накоплению ошибок.
- С помощью описываемого модуля можно рассчитывать как магистральные трубопроводы с длинными участками, так и технологические, содержащие участки небольшой длины. При этом используемый подход гарантирует, что будет учтен каждый сколь угодно малый участок.
- В качестве рассчитываемого продукта могут использоваться любые ньютоновские жидкости, свойства которых рассчитываются с помощью используемых в «Гидросистеме» библиотек ТФС.

Ограничения модуля:

- Не учитывается влияние кавитации на процесс гидроудара и, в частности, на скорость распространения волны гидроудара. Поэтому результаты расчета в том случае, когда в процессе расчета получаются отрицательные или очень низкие давления, означают, что неизбежно возникнет кавитация и характер процесса изменится.
- Расчет гидроудара выполняется по уравнениям изотермического течения (при этом, однако, принимается во внимание изменение теплофизических свойств продукта вследствие неодинаковых температур в разных точках трубопровода для исходного установившегося течения). Поскольку характерное время для процессов теплообмена, как правило, существенно больше, чем время прохода волны гидроудара, это ограничение не является существенным для расчета начальной фазы процесса гидроудара (несколько первых проходов волны гидроудара), которое обычно и представляет наибольший интерес для оценки давлений. Однако для длительных процессов (порядка минут) при значительных различиях температуры и теплофизических свойств продукта на различных участках трубопровода это ограничение может быть существенным.
- Используемая гипотеза «квазистационарности» обеспечивает более слабое затухание волн по сравнению с реальностью. Это не является существенным для прочностных расчетов, когда требуется знание максимальных и минимальных значений параметров. Однако при расчетах распространения сигналов в трубопроводных линиях

(например, в управляющей гидроаппаратуре) это может оказаться важным.

- Модели насосов (как объёмного типа, так и центробежных) весьма упрощенные и требуют доработки в отношении их динамики при запуске и остановке.
- Гидравлическое сопротивление тройников при расчете гидроудара не учитывается. В некоторых случаях (для очень коротких трубопроводов или ветвей) это может влиять на результаты расчета.
- Ограничение на шаги счета (1.7) при наличии в трубопроводной системе очень коротких и очень длинных труб одновременно может породить неоправданно мелкий шаг, что ведет к большим затратам вычислительных ресурсов (время счета, используемая оперативная память). Это можно преодолеть усложнением алгоритма (например, применять явно-неявную схему, описанную в [4]).

Большой частью приведенные выше ограничения являются недоработками текущей версии модуля, а не ограничениями самой методики. Работа над модулем продолжается!

Литература

1. Юдовина Е.Ф., Пашенкова Е.С., Корельштейн Л.Б. Программный комплекс «Гидросистема» и его использование для гидравлических расчетов трубопроводных систем. Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: Труды XII Всероссийского научного семинара с международным участием. Иркутск, ИСЭМ СО РАН, 2010. с.475-485.
2. Бабенко А.В., Юдовина Е.Ф., Корельштейн Л.Б., Гартман Т.Н. Программная реализация модуля гидравлических расчетов двухфазных газожидкостных потоков. Программные продукты и системы. 2013, №1, с.141-146.
3. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах.
4. Атавин А.А., Тарасевич В.В. Математическое моделирование нестационарных процессов в трубопроводных системах // Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения. Новосибирск, «Наука», 2000.– С.16-30.
5. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. – М.: Наука, 1978.

Труды XIV Всероссийского научного семинара

«Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем»

8 – 13 сентября 2014 г.
Белокуриха, Алтайский край



Труды изданы в электронном виде и находятся на сайте
<http://www.sei.irk.ru>

