

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ В ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ ДВИЖЕНИИ В НИХ СМЕСИ ЖИДКОСТИ С ВОЗДУХОМ

Овсянников В.П., Оверко В.М., к-ты техн. наук, доценты,
Кудсие С.И., проф. (Сирия)
Донецкий государственный технический университет

Рассмотрены вопросы создания средств предотвращения гидравлических ударов в трубопроводах путем впуска воздуха в гидросистему. Приведены результаты экспериментальных исследований переходных процессов в водо-воздушной смеси, рассмотрены математическая и имитационная модели динамических процессов трубопроводах при движении в них смеси жидкости с воздухом.

The problems of creation of means of an avoidance of hydraulic shocks in pipe lines are reviewed by an air admission in a hydraulic-circuit system. The outcomes of experimental researches of transients in an air-and-water mix are adduced, are reviewed mathematical and imitative model of dynamic processes pipe lines at motion in them of a mix of a liquid with air.

Проблема борьбы с гидравлическими ударами в гидротранспортных системах и в том числе на шахтных водоотливных установках исследуется давно, но не имеет однозначного решения к настоящему времени.

Это приводит к тому, что защита от гидравлического удара во многих случаях решается неэкономично, путем повышения запаса прочности труб. Сказанное в значительной мере объясняется несовершенной конструкцией устройств, предложенных для защиты трубопроводов от периодических повышений давления.

Защиту гидравлических систем от гидравлических ударов в общем случае можно осуществить двумя путями: непосредственным воздействием на устройство, вызывающее изменение скорости потока в переходном процессе, и применением специальных устройств, которые вызывают искусственное снижение модуля ускорения движения жидкости. Первый путь, как профилактический, следует считать предпочтительным при разработке защитных мероприятий, однако он применим только при плановых переходных режимах.

Защита гидравлических систем путем сброса части транспортируемой жидкости является самым распространенным и универсальным приемом искусственного снижения величены гидравлического удара. Клапанные устройства для защиты от гидравлических ударов можно разделить на предохранительные клапаны и специальные гасители гидравлических ударов. Предохранительные клапаны всех типов обладают рядом характерных недостатков. Это большая разница давлений открытия и закрытия (гистерезис) клапана, резкое захлопывание затвора и генерирование дополнительного удара в момент подхода отрицательной волны давления, как правило, ручная настройка на рабочее давление и связанная с этим необходимость пробных срабатываний.

Применение воздушно-гидравлических колпаков в качестве надежных средств борьбы с гидравлическими ударами получило широкое распространение в инженерной гидравлике, но в системах гидротранспорта, они не всегда могут работать в связи с наличием в потоке твердой фракции. Кроме того, в стесненных шахтных условиях их применение затруднительно.

В результате приведенного выше анализа была сформулирована задача создания системы защиты от гидроударов, совмещающая в себе достоинство клапанных устройств – компактность и воздушных колпаков – высокую надежность.

В теории гидравлического удара известен способ защиты от гидроударов, заключающийся во впуске воздуха в водовод. Такой метод используется в местах образования возможных разрывов сплошности потока и эффективно работает. Известны устройства, так называемые вантузы, которые при снижении давления в трубе ниже атмосферного соединяют ее внутренний объем с атмосферой. Это простые устройства узкого назначения. Учитывая то, что геометрическая высота водоотливных установок значительна, разрывы сплошности потока в них вряд ли возможны. Поэтому на шахтах вантузы для защиты от гидроударов не применяются.

Настоящее предложение состоит в том, что бы осуществлять выпуск сжатого воздуха в трубопровод для снижения повышенных давления при переходных режимах работы.

Для достижения этого у места возникновения изменения скорости потока должна быть установлена емкость со сжатым воздухом, давление которого намного превышает давление жидкости в трубо-

проводе и применена система управления, позволяющая своевременно вводить в поток определенное количество этого воздуха.

Не вызывает сомнения, что заранее впущенное нужное количество воздуха погасит удар. Однако в случае внеплановой остановки потока заранее подать воздух невозможно.

Было предложено использовать импульс, приводящий к переходному режиму (например, отключение электроэнергии) для начала подачи воздуха. Технически это организовать не сложно. Однако возникают сомнения, будет ли в таком случае эффективное снижение ударного давления? Для качественной оценки данной идеи был проведен эксперимент на стенде, схема которого приведена на рисунке 1.

Данный стенд состоит из открытого резервуара 1; всасывающего трубопровода 2 (использованы сварные водопроводные стальные трубы наружным диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм); задвижек 3, 7; мановакуумметра 4; насоса 2К4 5; манометров 6, 9; напорного трубопровода 8; индукционного датчика давления 10; электромагнитного нормально открытого клапана 11; крана 12; электромагнитного нормально закрытого клапана 13; редуктора 14; вентиля 15 и баллона со сжатым воздухом 16. Кроме того, на нагнетательном трубопроводе установлен расходомер 17, с помощью которого проверялся расход воды при дросселировании потока с помощью задвижки 7. Приборы позиции 4, 6, 9, 10 подключены к трубопроводу через трехходовые бронзовые краны, не показанные на схеме. Стандартный редуктор, устанавливаемый на кислородный баллон (14), имеет свои манометры, которые так же не показаны.

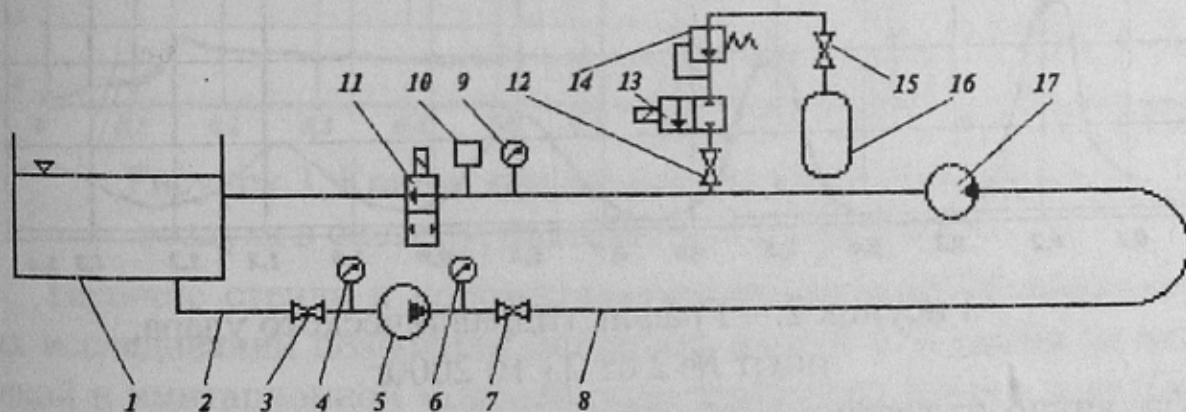


Рисунок 1. – Экспериментальный стенд

Для записи колебаний давления использовался светолучевой осциллограф типа Н-117 в комплекте с прибором ИД-2И. Запись производилась на светочувствительную самопроявляющуюся бумагу. Та-

рировка датчика была произведена на прессе типа МП-600 с использованием образцового манометра. Скорость протяжки бумаги была 100 мм/с.

В качестве рабочей жидкости использовалась вода из коммунальной системы водоснабжения.

Вначале были проведены опыты при перекрытом кране 12.

При работающем насосе последовательно включалась протяжка осциллографа и подавался импульс на закрытие клапана 11. Запись производилась до окончания колебания давления в системе (об этом можно было судить по манометру 9 и экрану осциллографа). Таким образом, были получены осциллограммы гидравлического удара без каких-либо защитных мероприятий.

Затем кран 12 был открыт и электрическая линия управления клапанами 11 и 13 сблокирована. Фиксировались давления воздуха в баллоне (около 60 бар) и за редуктором 14. Последнее было установлено на уровне 5 бар.

Далее при работающем насосе последовательно включалась протяжка осциллографа и подавался импульс на изменение позиций клапанов 11, 13. Запись производилась до окончания колебания давления в системе. Так были получены осциллограммы переходных процессов при впуске воздуха в систему в момент срабатывания клапана, перекрывающего поток воды.

Осциллограмма гидравлического удара без впуска воздуха в систему приведена на рисунке 2.

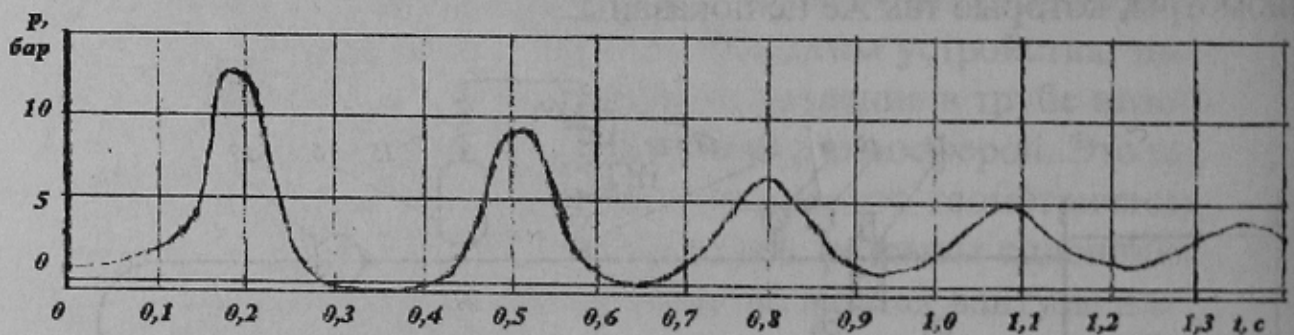


Рисунок 2. — График гидравлического удара, опыт № 2 от 23.10 2000г.

Как видно из графика рабочее давление в месте установки датчика составляет 0,5 бара, максимальное повышение давления у закрытого клапана 13 бар. Период гидравлического удара составляет $T = 0,29$ с. Учитывая длину нагнетательного трубопровода от насоса до

клапана $L = 90$ м, легко определить скорость распространения ударной волны (c): $c = 4L/T = 4 \cdot 90/0,29 = 1241$ м/с.

Скорость распространения ударной волны для проверки может быть рассчитана по формуле [1] в результате получим - 1255 м/с,

Таким образом, расчетная и определенная опытным путем величина скорости распространения ударной волны практически совпадают, что косвенно свидетельствует о достоверности полученных результатов.

По формуле Н.Е. Жуковского можно проверить и величину повышения давления при гидравлическом ударе: $\Delta p = \rho c \Delta v$, Па.

Здесь Δv – изменение скорости потока, которое в нашем случае равно полному расходу воды (по показаниям расходомера в установленном режиме) отнесенному к площади проходного сечения.

Расход Q по расходомеру равен 100 л/мин, что дает изменение скорости 1,05 м/с.

$$\Delta p = 1000 \cdot 1255 \cdot 1,05 = 1318000 \text{ Па} = 13,18 \text{ бар.}$$

Такой результат так же не отличается существенно от опытного значения (13 бар), что позволяет говорить об гидроударе, как о близком к прямому.

При подключенном устройстве впуска воздуха в трубопровод получены осциллограммы, одна из которых приведена на рисунке 3.

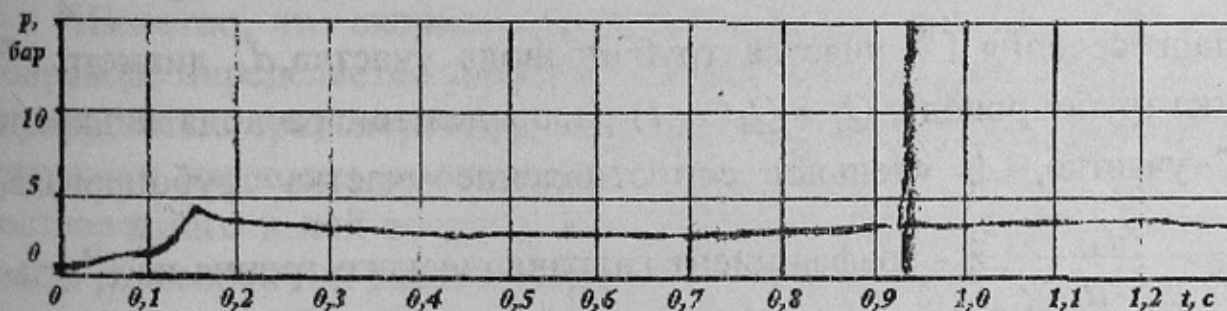


Рисунок 3. Кривая изменения давления при впуске воздуха в систему, опыт №13 от 23.10. 2000г.

Наличие стенда и положительные результаты экспериментальных исследований позволили поставить задачу уточнения математической и имитационной моделей гидравлических ударов в трубопроводах при движении в них смеси жидкости с воздухом.

Как известно, первые работы по изучению неустановившегося движения жидкости в трубах выполнены Н.Е. Жуковским в конце прошлого столетия. В настоящее время, в этой области проводятся многочисленные исследования, периодически издаются библиогра-

фические указатели литературы. Анализ этих работ показывает, что исследования явления гидравлического удара развивается по двум направлениям:

- уточнение одномерной модели Н.Е. Жуковского;
- построение принципиально более точных, но менее наглядных двух- и трех мерных моделей течения.

Абсолютное большинство технических задач, связанных с изучением неустановившегося течения жидкости в трубах с высокой точностью могут быть рассмотрены в рамках одномерной модели, в этом случае неустановившееся течение жидкости по конструктивному участку трубопровода описывается системой гиперболических уравнений в частных производных - движения и неразрывности потока:

$$\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\rho_i}{S_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial t} + (A_i \cdot Q_i \cdot |Q_i| + k) \cdot \rho_i \cdot g = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} + \rho_i \cdot C_i^2 \cdot S_i^{-1} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} = 0.$$

где $P_i = P_i(x_i, t)$ распределение избыточного давления на i^m участке трубопровода; x_i координата сечения i^{ro} участка трубопровода, L_i общая длина i^{ro} участка трубопровода, t - время, $S_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$ - площадь сечения i^{ro} участка трубопровода участка, d_i диаметр i^{ro} участка трубопроводе, $Q_i = Q_i(x_i, t)$ распределение расхода жидкости на i^m участке, A_i удельное сопротивление участка трубопровода, $A_i = \frac{\lambda_i}{2 \cdot S_i^2 \cdot d_i \cdot g}$, λ_i - коэффициент гидравлического трения на i^m участке трубопровода; g - ускорение свободного падения, ; C_i - скорость распространения ударной волны по i^{mu} участку трубопровода, k_i - удельное приращение геометрической высоты i^{ro} участка трубопровода.

Под конструктивным участком в данном контексте понимается часть трубопроводе с неизменными геометрическими характеристиками, постоянными свойствами материала стенок, причем заранее известно, что в пределах этих участков нет и невозможно возникновение существенных особенностей, изменяющих характер пока жидкости, таких как разрывы сплошности или какие либо технические уст-

ройства, существенно влияющие на характеристики потока. Такой подход к моделированию динамических процессов получил наименование «метод контрольных точек» и с нашей точки зрения, является наиболее приемлемым при построении имитационных моделей

Состояние потока на каждом участке трубопровода может быть найдено из уравнений движения и неразрывности, если определены связь скорости распространения ударной волны с давлением, а также зависимость между величиной коэффициента гидравлического трения и средней по сечению скоростью потока.

Известно, что при тех давлениях, которые встречаются в технической гидравлике жидкости можно считать капельной, а ее упругость учитывать только при вычислении скорости распространения ударной волны. Плотность воды, транспортируемой по трубопроводам стенда, принимается равной 1000 кг/м^3 .

Таким образом, параметры, входящие в уравнения гидравлического удара (1) разбиваются на две группы:

- первая, постоянные, не зависящие от текущего состояния потока жидкости в трубопроводе;

- вторая группе, это коэффициент гидравлического трения и скорость распространения ударной волны C_i , значения, которых зависят от мгновенного распределения давления и расхода в трубопроводе.

Известно, что скорость распространения ударной волны в трубопроводе определяется упругими свойствами материала стенок труб и упругостью транспортируемой жидкости. В свою очередь модуль упругости жидкости изменяется в зависимости от концентрации нерастворенного в ней воздуха, который появляется вследствие выделения растворенных газов из жидкости или при искусственном впуске воздуха в трубопровод. Приведены исследования процесса выделения растворенного в жидкости газа при неустановившемся движении и соответствующие зависимости для определения его количества. Однако большинство исследователей при решении этой задачи считают, что при уменьшении давления ниже критического весь растворенный в жидкости газ выделяется мгновенно [2]. Такой подход позволяет существенно упростить расчеты без заметного снижения точности результатов. К.Л. Вишнеvский также предлагает считать, что при вариациях давления скорость распространения ударной волны изменяется скачком [2], что эквивалентно применению той же гипо-

тезы. С учетом этого допущения, величину объемной доли выделившегося из газа в жидкости будем определять следующим образом:

$$\varepsilon_v = \begin{cases} \varepsilon_1 & \text{при } p_i \geq p_{kr} \\ \varepsilon_2 & \text{при } p_i < p_{kr} \end{cases},$$

где ε_v объемная доля газа, выделившаяся из жидкости в виде свободных пузырьков при атмосферном давлении ε_1 объемная доля газа при его полном выделении из жидкости, ε_2 остаточная, объемная доля газа после его растворения в жидкости; p_{kr} критическое давление, при котором происходит выделение газа. Величина p_{kr} определена в работе [1], а значения ε_1 ε_2 приведены в этой монографии.

Для определения доли газа в жидкости в виде свободных пузырьков при произвольном давлении будем предполагать, что изменение объема газа происходит без изменения температуры. Эта гипотеза обоснована в [2]. В соответствии с законом Бойля Мариотта:

$$\varepsilon_g = \frac{\varepsilon_v}{p_i + p_a} \quad \text{где } p_a - \text{атмосферное давление.}$$

При впуске воздух в трубопровод, например с целью предотвращения гидравлических ударов, объемная доля газа в жидкости складывается из двух частей

во-первых, объемной доли газа выделившегося из жидкости
во-вторых, из той объемной доли газа, которая обусловлена впуском воздуха в трубопровод.

Таким образом, $\varepsilon_s(x_i, t) = \varepsilon_g + \varepsilon_d(x_i, t)$,

где $\varepsilon_s(x_i, t)$ - суммарная объемная доля газа в жидкости,

$\varepsilon_d(x_i, t)$ - объемная доля газа, которая обусловлена впуском воздуха в трубопровод.

Как показано в работе [1] для потока жидкости, с учетом нерастворенного в ней воздуха, величина скорости C_i определяется из выражения:

$$C_i = \left[\sqrt{\left(\frac{g \cdot (1 - \varepsilon_g)}{E_v} + \frac{\varepsilon_s}{p_i + p_a} + \frac{d_i}{\delta_i \cdot E_{cl}} \right)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где E_v - объемный модуль упругости жидкости, δ_i толщина стенок $i^{\text{го}}$ участка трубопровода,

E_{ct} - модуль упругости второго рода материала стенок трубопровода. То есть считается, что в пределах участка постоянно (можно, например, принимать в качестве ε_s - его среднее значение на i^m участке).

Если сравните скорость распространения ударной волны, которую дает выражение (2) при $p_i \approx p_a$ с экспериментальными данными, то оказывается, что рассчитанная величина скорости ударной волны значительно меньше фактического значения. Известна зависимость минимально возможной скорости распространения ударной волны от давления в трубопроводе. Рекомендуется при анализе неустановившегося движения жидкости проверять выполнение ограничения: $C_i \geq C_{\min}(p_i)$, где $C_{\min}(p_i)$ экспериментально определенная минимально возможная скорость распространения ударной волны в трубопроводе с жидкостью, содержащей нерастворенный газ. А если это неравенство не выполняется, то считается $C_i = C_{\min}(p_i)$. Таким образом, можно определить скорость распространения ударной волны в трубопроводе при произвольном давлении жидкости в трубопроводе.

Существует много эмпирических формул для расчета коэффициентов гидравлического трения λ_i . Имеется обширная библиография по данному вопросу. Наиболее точными считаются формулы Колбрука и А.Д. Альшуля :

$$-0,5\sqrt{\lambda_i} = 2 \cdot \lg\left(\frac{2,51}{\text{Re}_i \cdot \sqrt{\lambda_i}} + \frac{0,27 \cdot \Delta_i}{d_i}\right) \quad \lambda_i = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{\text{Re}_i} + \frac{d_i}{\Delta_i}\right),$$

где Δ_i шероховатость стенок трубопровода $i^{\text{го}}$ участка,

$$\text{Re}_i = \frac{v_{\text{ср}i} \cdot d_i}{\nu} \quad \text{число Рейнольдса; } v_{\text{ср}i} \text{ - средняя скорость потока}$$

на i^m участке, ν - кинематическая вязкость жидкости.

Эти и другие подобные им формулы найдены путем обработки экспериментальных данных полученных при изучении установившегося течения жидкости. Для их использования в случае нестационарных течений С.А. Христианович ввел гипотезу квазистационарности в соответствии, с которой напряжение трения жидкости о стенки трубы при неустановившемся течении зависит только от мгновенной средней в сечении скорости потока и эта связь такая же, как и для установившегося течения. Проверкой и обоснованием гипотезы квазистационарности занимались многие исследователи.

В стационарных состояниях жидкости, а так же во время переходных процесс число Рейнольдса для потока в трубопроводах может принимать нулевое значение, то есть при моделировании нужно рассматривать течение жидкости во всех трех режимах: ламинарном переходном и турбулентном. С нашей точки зрения целесообразно воспользоваться результатами, ориентированными на применение ЭВМ для расчетов гидравлических ударов в трубопроводах. В соответствии с этой методикой:

$$\lambda_i = \begin{cases} \lambda_{li} & \text{Re}_i > \text{Re}_n \\ \lambda_{lpi} & \text{Re}_n \leq \text{Re}_i \leq \text{Re}_v \\ \lambda_t & \text{Re}_i > \text{Re}_v \end{cases}, \quad (3)$$

где λ_{li} - коэффициент трения в зоне ламинарного режима течения;

Re_n - максимальное значение числа Рейнольдса, при котором в потоке сохраняется ламинарный режим течения:

$$\text{Re}_n = 1000^{0,00465 \cdot d_i \cdot \Delta_i};$$

λ_{lpi} - коэффициент гидравлического трения в переходной зоне:

$$\lambda_{lpi} = \lambda_{lli} \cdot (1 + \gamma_{pi}) + \lambda_{lti} \cdot \gamma_{pi},$$

где γ_{pi} - коэффициент перемежаемости потока в переходной зоне:

λ_t - коэффициент трения в зоне турбулентного режима течения; число Re_v Рейнольдса, при котором происходит переход к турбулентному режиму течения $\text{Re}_v = 1600 \cdot \left(\frac{d_i}{\Delta_i}\right)^{0,16}$.

Определение коэффициента λ_i в соответствии с () обеспечивает непрерывность функции $\lambda_i = f_\lambda(\text{Re})$ во всем диапазоне изменения чисел Рейнольдса, что наблюдается во всех опытах по ее определению. Воспользовавшись полученными выше выражениями можно учесть зависимость λ_i от Re , хотя численное значение λ_i в зоне турбулентного режима течения определяется исходя из гипотезы квазистационарности.

Описанная выше замкнутая система уравнений для определения состояния потока жидкости в пределах любого участка трубопровода

лежит в основе рассматриваемой программы для моделирования динамических процессов в гидросистемах.

Алгоритмизация расчетов динамических процессов в трубопроводах

Известно много методов решения уравнений гидравлического удара. В монографии [1] содержится общий обзор этих методов.

Для определения гидродинамических параметров неустановившегося течения жидкости в трубопроводах иногда используются аналитические методы. Эти методы применяются для решения линейных или линеаризованных уравнений. Основным методом анализа неустановившихся процессов в трубопроводах являются различные варианты разностных схем и решение задач на ЭВМ.

Третье направление в развитии методов анализа неустановившегося движения жидкости в трубопроводах связано с применением методов математической физики. В частности это методы, основанные на представлении решения в виде двойного ряда по координате и времени (метод Фурье) или на использовании метода конечных элементов с последующим решением полученных в результате алгебраических преобразований линейных систем уравнений на ЭВМ.

В переходных процессах в трубопроводах возникают ударные воля, то есть так называемые "разрывные" течения. При определенных условиях происходят переходы от "непрерывного" к "разрывному" течению. Такие переходы можно объяснить следующим образом: из выражения (2) видно, что скорость распространения ударной волны зависит от давления жидкости, то есть: $C_i = f_c(p_i)$. Так как $\frac{\partial f_c}{\partial p_i}$ то

любая элементарная волна, движущаяся из области большего давления имеет большую скорость и догоняет волну, распространяющуюся из области, где давление меньше. В конечном итоге это приводит к тому, что при движении волны движущейся вдоль трубопровода ее фронт становится крутым. Но распределение давления в трубопроводе $p_i(x_i, t)$ не может описываться неоднозначной функцией. А это значит, что при изучении гидравлических ударов необходимо учитывать возможность разрывов в решении системы (1) и выбирать такие методы решения, которые позволяют правильно определять положение фронтов ударных воля.

Универсальным способом решения уравнений гидравлического удара служит метод характеристик, который является разновидно-

стью метода сеток. Так же известно, что для анализа «разрывных» течений жидкости целесообразно рассматривать уравнения гидравлического удара в характеристической форме. Этот метод и был принят в качестве способа интегрирования систем уравнений (1) при создании новой программы для расчета динамических процессов.

Проведенный анализ показал, что в трубопроводах, как правило, формируются четыре типа граничных условий:

Первый тип: граничные условия в начале трубопровода, они, как правило, определяется видом напорных характеристик насосов, которые в общем случае описываются нелинейным уравнением: $p_1(0, t) = p_n(Q_n, t)$ и тождеством: $Q_1(0, t) = Q_n(t)$

где $p_n(Q_n, t)$ - давление, создаваемое насосом, $Q_n(t)$ подача насоса.

Второй тип граничных условий: в точках, где происходит изменение какого-либо конструктивного параметра трубопровода, справедливы соотношения: $p_i(L_i, t) = p_{i+1}(0, t)$ и $Q_i(L_i, t) = Q_{i+1}(0, t)$ ()

Третий тип граничных условий формируется в тех точках трубопровода, где находятся местные сопротивления, в этом случае граничные условия определяются системой уравнений:

$$p_i(L_i, t) = p_{i+1}(0, t) + \rho \cdot g \cdot a_i \cdot Q_i(L_i, t) \cdot |Q_{i+1}(0, t)| \quad Q_i(L_i, t) = Q_{i+1}(0, t)$$

где a_i - величина сосредоточенного сопротивления между участками трубопровода.

В конце трубопровода давление и расход связаны соотношениями вида:

$$p_N(L_N, t) = \rho \cdot g \cdot a_N \cdot Q_N(L_N, t) \cdot |Q_N(L_N, t)|, \quad (4)$$

где a_N эквивалентное сопротивление потребителей гидравлической энергии в конце трубопровода, N - номер последнего участка трубопровода.

Уравнение (4) справедливо только в том случае, когда $Q_N(L_N, t) > 0$ иначе давление в конце трубопровода принимается равным нулю, то есть $p_N(L_N, t) = 0$ при $Q_N(L_N, t)' \leq 0$

При расчетах в так называемых "контрольных точках" проверяется условие сохранения сплошности потока:

$$p_i(L_i, t) \geq 0 \text{ и } p_{i+1}(0, t) \geq 0. \quad (5)$$

Если эти ограничения не выполняются, то давление в конце i -го и в начале $i+1$ -го участков принимается равным давлению насыщенных паров воды при температуре

$$T_{\infty} K^{\circ} - p_i(L_i, t) = p_{i+1}(0, t) = p_v. \quad (6)$$

где p_v - избыточное давление насыщенных паров воды.

Тождество (6) является граничным условием в конце i -го в нача-

ле $i+1$ -го участков до тех пор, пока: $V_i = \int_{t_n}^{t_k} (Q_i(L_i, \tau) - Q_0(0, \tau)) d\tau > 0$,

где. V_i - объем каверны, t_n - момент, когда условия (5) не выполняются, t_k - момент исчезновения каверны. Этот момент определяется из условия $V_i \equiv 0$.

"Контрольными точками" являются все точка в трубопроводе, которые выделены при определении параметров гидросистемы в качестве граничных .

Начальные условия в трубопроводах определяются тождествами: $p_i(x_i, 0) = f_{poi}(x_i); Q_i(x_i, 0) = f_{Qoi}(x_i);$

$f_{poi}(x_i)$ - функция, отображающая начальное распределение давления в трубопроводе,

$f_{Qoi}(x_i)$ -функция, отображающая начальное распределение расхода в трубопроводе.

При изучении переходных процессов в гидросистемах, как правило, можно считать, что переходные процессы начинаются из стационарного режима течения жидкости. В этом случае $f_{Qo} = Q_o$. Величина Q_o может быть определена из уравнения:

$$P_n(Q_o, 0) = \rho \cdot g \cdot \left\{ \left(\sum_{i=1}^N A_i \cdot L_i + \sum_{i=2}^{N-1} a_i \right) \cdot Q_o^2 + \sum_{i=1}^N L_i \cdot R_i \right\},$$

а начальное распределение давления в трубопроводе определяется выражением:

$$f_{po}(x_i) = P_n(0, 0) - \rho \cdot g \cdot \left\{ \left(\sum_{j=1}^{i-1} A_j \cdot L_j + \sum_{j=1}^{i-1} a_j \right) \cdot Q_o^2 + \sum_{j=1}^{i-1} L_j \cdot R_j \right\} + A_i \cdot x_i \cdot Q_o^2 + R_i \cdot x_i$$

где i номер участка, а при всяком x_i выполняется неравенство

$$\sum_j^{i-1} L_j \leq x_i \leq L_i + \sum_j^{i-1} L_j, \quad j = 1 \dots N.$$

Если начальные распределения давления и расхода в трубопроводе являются результатом воздействия на поток, каких либо факто-

ров в моменты времени предшествующие $t = 0_-$, то они определяются из решения системы (1). Такой способ определения начальных условий позволяет анализировать процессы, происходящие в трубопроводах при изменении нескольких параметров гидросистем в различные моменты и рассмотреть состояние потока жидкости за длительные промежутки времени, когда происходит ряд событий, таких как включение и выключение насосов, манипуляции с задвижками, выпуск воздуха на различных участках и так далее. При таком подходе можно учесть то обстоятельство, что очередное событие происходит в такой момент, когда состояние потока еще не установилось, а такие случаи достаточно часто встречаются в практике эксплуатации гидросистем, например, автоматически отключается электродвигатель насосного агрегата при его запуске.

Уравнения гидравлического удара в характеристической форме. Сетка характеристик

Очевидно, что интегрирование системы уравнений (1) с учетом зависимостей λ_i от числа Рейнольдса, скорости распространения ударной волны от давления жидкости, нелинейного характера граничных условий, для каждого конструктивного участка трубопровода, возможно только численными методами. Как отмечалось выше метод характеристик является универсальным способом решения нелинейных уравнений гидравлического удара [1]. Для использования этого метода от уравнений гидравлического удара в частных производных нужно перейти к их характеристической форме [2].

Известны два метода перехода от системы уравнений (1) к уравнениям характеристик и соотношением между параметрами потока на характеристиках: матричный метод и метод неопределенного множителя. Оба метода дают уравнения связывающие координаты точек трубопровода с такими моментами времени, что изменения параметров потока в этих точках и в эти моменты времени характеризуется обыкновенными дифференциальными уравнениями. После соответствующих преобразований получим уравнения направлений характеристик:

$$\pm \frac{dx_i}{dt} = C_i^\pm + \frac{Q_i}{S_i}, \quad (6)$$

и уравнения, связи между приращением давления и расхода на характеристиках:

$$\pm \frac{d\tilde{p}_i}{at} + m_i \cdot \frac{d\tilde{Q}_i}{dt} + C_i \cdot (A_i \cdot \tilde{Q} \cdot |\tilde{Q}| + R_i). \quad (7)$$

Уравнения (6) определяют два семейства линий в системе координат - x, t , прямые C_i^+ и обратные C_i^- характеристики.

$\tilde{p}_i = \tilde{p}(\tilde{x}, \tilde{t})$ - распределение давления на характеристиках,

$\tilde{Q}_i = \tilde{Q}(\tilde{x}, \tilde{t})$ - распределение расхода на характеристиках, при-

чем: $\tilde{x}_i \in C_i^+$ и $C_i^- \tilde{t}_i \in C_i^+$ и C_i^- .

Система уравнений (7) совместно с (6) эквивалентна (1) а поскольку уравнения (7) справедливы только на характеристиках то решение системы уравнений (1) нужно искать на сетке образованной в системе координат (x, t) линиями C_i^+ и C_i^- (рис. 4).

Так как предполагается, что при переходных процессах в трубопроводах возможно возникновение ударных волн, то при построении сетки характеристик нужно обеспечить устойчивость соответствующих алгоритмов расчета. Для этого необходимо выполнение условия Куранта - Фридрикса: $\Delta x \cdot \Delta t^{-1} \geq C_{\max} + v_{\max}$,

где Δx - шаг по пространственной координате сетки характеристик,

Δt - шаг по временной координате сетки характеристик,

v_{\max} - максимально возможная скорость распространения ударной волны в трубопроводе,

C_{\max} - максимально возможная скорость волны в трубопроводе.

Очевидно, что $C_{\max} = \max\left(\sqrt{\rho\left(\frac{1}{E_{жс}} + \frac{d_i}{\delta_i \cdot E_c}\right)}\right)^{-1}$.

При решении уравнений гидравлического удара в форме (7) на сетке характеристик дифференциалы заменяются конечными приращениями. При этом в зависимости от способа вычисления интеграла

$$\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} A_i \cdot Q_i \cdot |Q_i| d\tau, \text{ определяющего потери давления за счет}$$

трения, разностные схемы для решения уравнений (7) делятся на схемы первого, второго, третьего порядка точности. Как показали исследования, при моделировании переходных процессов можно считать

$$\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} A_i \cdot Q_i \cdot d\tau \approx A_i \cdot Q_{cp} \cdot |Q_{cp}| \cdot \Delta x,$$

где Q_{cp} - определяется как $Q_{cp} = \frac{\tilde{Q}(\tilde{x}, \tilde{t}) + \tilde{Q}(\tilde{x} + \Delta x, \tilde{t} - \Delta t)}{2}$.

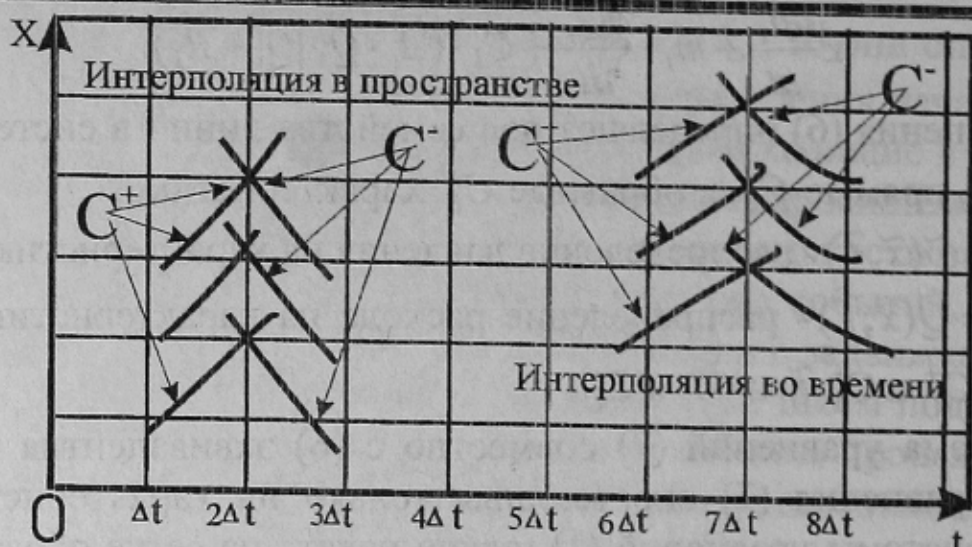


Рисунок 4 Сетка характеристик и способы интерполяции при расчетах динамических процессов в трубопроводах

Для вычисления Q_{cp} с определенной, заранее заданной точностью организуется итерационный процесс.

Поскольку скорость распространения ударной волны определяется из (5), то характеристики C_i^+ , C_i^- не являются прямыми линиями в системе координат (x,t) , так что, при расчетах гидравлических ударов необходима интерполяция при определении параметров потока в узлах сетки характеристик, рисунке 4.

Существуют два различных способа интерполяции при использовании метода характеристик: - пространственная и временная. С нашей точки зрения наиболее приемлемым способом является пространственная интерполяция, поскольку контроль за точностью расчета в этом случае осуществлять намного эффективнее, поэтому именно этот прием используется в разрабатываемой программе.

Особенности имитационной модели динамических процессов в трубопроводах для автоматизированного рабочего места проектировщика гидросистем

Современные средства создания программ позволяют разрабатывать автоматизированные рабочие места для проектирования гидросистем, в которых анализ динамических процессов в трубопроводах является неотъемлемой частью процесса разработки гидросистемы в целом [4].

Основные, обязательные требования к таким программам заключаются в необходимости визуализации, как гидравлической схемы разрабатываемой гидросистемы, так и результатов моделирова-

ния, обеспечения интерактивного доступа к отдельным элементам гидравлической схемы при помощи какого либо манипулятора (например «мышки»).

Желательным так же является обречение дистанционного доступа к результатам работы, что позволяет при использовании интернет - технологий представить проекты для рассмотрения их широкой аудиторией.

Всем приведенным выше требованиям удовлетворяет программа, написанная на языке «Java» с выдачей результатов моделирования в апплет [3]. Кроме того, на этом языке в полной мере обеспечена реализация объектно-ориентированной парадигмы создания программ, что дает возможность создавать расширяемые приложения. Преимущества объектно-ориентированных имитационных моделей динамических процессов в гидросистемах отмечались еще в статье //, а проведенный нами анализ типов граничных условий в трубопроводах позволил создать сигнатуры минимально необходимого числа интерфейсов.

Наиболее общая характеристика потока интерфейс "voda" – содержит только данные о физических параметрах жидкости, а также о свойствах материала стенок труб и относительных размерах изображений элементов гидросистемы на апплете.

/* интерфейс, поддерживающий параметры потока воды в трубопроводе */

```
interface voda {
    double g = 9.81; // ускорение свободного падения
    double ro = 1000.0; // плотность жидкости
    double Eg = 2.05E9; // модуль упругости жидкости
    double E = 2.05E12; // модуль упругости материала стенок
    // размеры элементов схемы при визуализации гидросистемы
    double V_width = 0.02; // ширина секции 007
    double V_height = 0.015; // высота секции
    double NS_width = 0.1; // ширина секции в изображении насоса
    double NS_height = 0.1; // высота секции в изображении насоса
    int R_radius = 3; // радиус окружности при рисовании графика
}
```

Этот интерфейс поддерживается всеми классами и воспринимается всеми процедурами для расчета параметров потока жидкости.

Интерфейс для граничных точек трубопровода **Start_Finish_Middle_Point** наследует параметры интерфейса "voda"

вместе с тем определяет, что всякий класс, описывающий какое либо устройство, определяющее граничную точку, должен содержать определение гидравлической характеристики " **Gidro** ", и методы опережения текущего и предшествующих состояний потока в точки расположения рассматриваемого устройства.

```

interface Start_Finish_Middle_Point extends voda {
  voda Gidro ( voda q_t );
  // напорная характеристика источника  $p=f(q)$  гидравлической
  энергии
  voda Read () ; // чтение текущего состояния
  voda Read (int D_i ) ; // чтение текущего состояния
  D_i - количество временных слоев, на которое осуществляется
  запаздывание при чтении
  void Write ( voda p_q ) ;
  // запись нового состояния потока в граничных точках
  // p_q - новое состояние потока в рассматриваемой крайней точке
  трубопровода
  double [] Parametr () ;
  // чтение параметров источника гидравлической энергии харак-
  теристика  $P = P_0 + a * Q - b * Q^2$ 
  // [0] -  $P_0$ , [1] - a, [2] - b и т.д.
  int K_Time () ;
  // определение количества временных слоев, в которых уже оп-
  ределено состояние потока }
  /* интерфейс для нестационарных граничных точек трубопрово-
  да */
interface Start_Finish_Middle_Point_Time extends
Start_Finish_Middle_Point {
  voda Gidro ( voda q , Setka setka ) ; W_L value ( Setka setka ) ;
  // расчет нестационарного параметра в характеристике источни-
  ка
  // гидравлической энергии  $p= f(q,w)$  ( w - независимый параметр
  // например частота вращения ротора насосного агрегата) }
  /* интерфейс для граничных точек трубопровода с
  ИСТОЧНИКОМ РАСХОДА */
interface Start_Finish_Middle_Point_Qo extends
  Start_Finish_Middle_Point
  { voda Gidro () ; // расход создаваемый источником }

```

Сетка характеристик и алгоритм расчета строится на взаимодействии интерфейсов. Это дает возможность под одним и тем же интерфейсом рассматривать различные устройства, например, бак и насос, которые отличаются только напорной характеристикой. Такой достаточно абстрактный подход, позволяет, не меняя алгоритма расчета, моделировать множества подобных гидравлических систем.

При этом удастся не только избежать повторной разработки новых алгоритмов расчета, но и автоматически получать изображения рассматриваемой гидравлической схемы, поскольку кожных рассматриваемый элемент должен строить свое условное изображение на аплете.

Не претендуя на законченность разработки, предлагается основной, с нашей точки зрения, работающий модуль АРМ разработчика гидросистем, учитывающий возможность использования воздуха для защиты от гидравлических ударов и их предотвращения в проектируемых гидросистемах.

На рисунке (5) показан соответствующий аплет и даны все не-

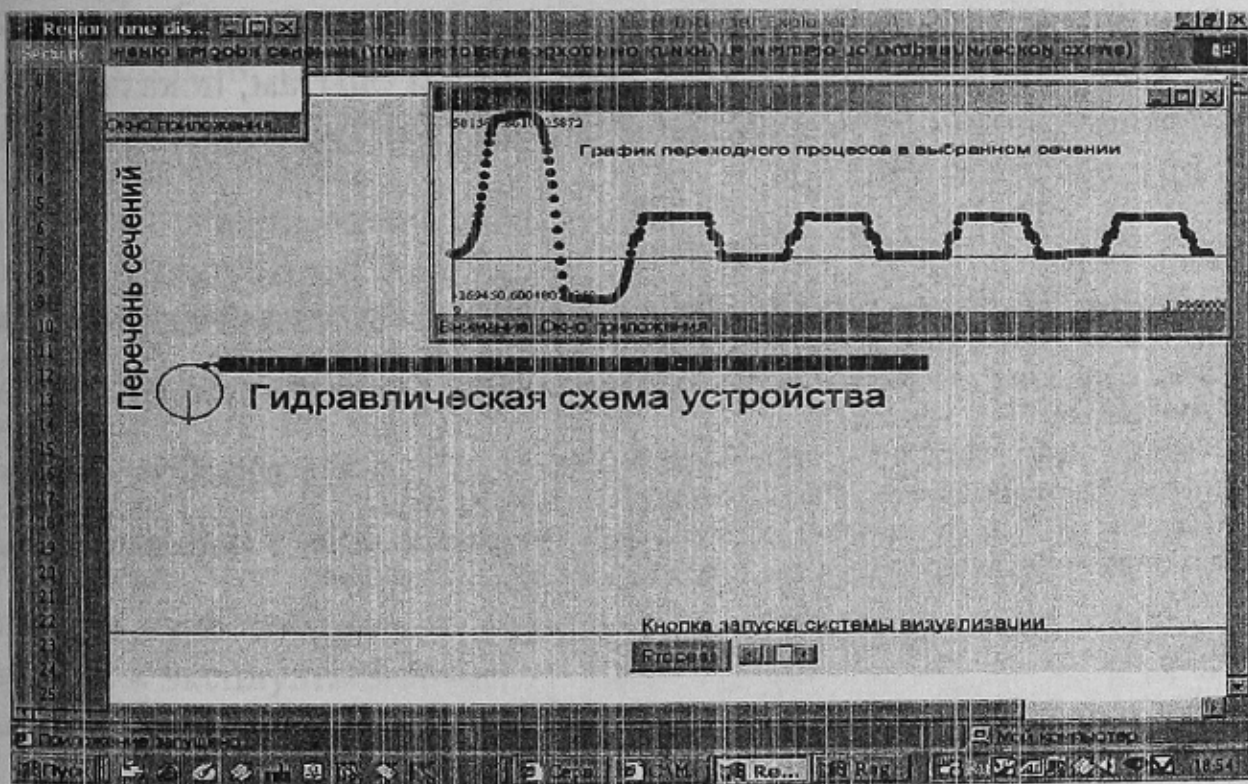


Рисунок 5 Результаты имитационного моделирования неустановившегося напорного течений двухфазной жидкости на стенде
 обходимые пояснения по его использованию. Соответствующий аплет можно найти по адресу:

<http://www.mine.dgtu.donetsk.ua/fm/ovp/udar.html>

Авторы обладают всем необходимым, чтобы, при наличии заказчика, довести рассматриваемый проект до состояния законченного, коммерческого программного продукта а так же разработать эффективные средства предотвращения гидравлических ударов в трубопроводах и методы корректировки параметров динамических процессов, при плановых и внеплановых изменениях параметров гидросистем.

Выводы

Впуск воздуха в трубопроводную систему, который производится одновременно с началом изменения скорости потока, способен существенно снизить и сделать не опасным гидравлический удар.

Для дальнейшего исследования и определения количественных величин необходимого объема вводимого воздуха, требуется уточнить математическую модель происходящих процессов и ввести ее как составную часть в программу расчета переходных процессов.

Необходимо также разработать устройство, позволяющее с достаточной точностью, вводить требуемый объем сжатого воздуха.

Таким образом, благодаря проведенным опытам, показана целесообразность выполнения указанных работ ввиду явной эффективности предложенного метода.

Список источников

1. Гейер В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: Учебник для вузов М. : Недра, 1987. – 270с.
2. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. –М.: Энергоиздат, 1981. –248 с.
3. Морган, Майкс. Java 2. Руководство разработчика. : Пер. с англ. : Уч. Пос. – М. : Издательский дом «Вильямс» 2000.-720 с.: ил. – Парал. тит. англ.
4. Овсянников В.П. Объектно-ориентированное программирование в имитационных моделях динамических процессов шахтных гидросистем.