

УДК 629.7.01

Л.І. КНЫШ, О.Г. ГОМАН

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В
ДЛИННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ**

Предлагается методика расчёта возможного гидравлического удара при эксплуатации наземных или подземных трубопроводных систем большой протяжённости. В предложенной математической модели учитывались географические особенности места эксплуатации трубопровода и общие проектные показатели системы. Результаты компьютерного моделирования нестационарных параметров трубопровода являются основой для выбора методов предотвращения гидроудара и способов его компенсации.

Ключевые слова: гидравлический удар, математическая модель, гидравлический уклон, численный алгоритм, компьютерное моделирование

Л.І. КНЫШ, О.Г. ГОМАН

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕЧІЇ В ДОВГИХ ПРОМИСЛОВИХ
ТРУБОПРОВОДАХ**

Запропоновано методику розрахунку можливого гідравлічного удару під час експлуатації наземних або підземних трубопровідних систем великої протяжності. У запропонованій математичній моделі враховувались географічні особливості місцевості функціонування трубопроводу та загальні проектні показники системи. Результати комп'ютерного моделювання нестационарних параметрів трубопроводу є основою для вибору методів запобігання гідроудару та способів його компенсації.

Ключові слова: гідравлічний удар, математична модель, гідравлічний ухил, чисельний алгоритм, комп'ютерне моделювання.

L.I. KNYSH, O.G. GOMAN

Oles Honchar Dnipro National University

**COMPUTER SIMULATION OF THE NON-STATIONARY FLOW IN THE LONG INDUSTRIAL
PIPELINES**

The procedure for the analysis of the water hammer, which may occur during operation of the overground and underground long length pipeline systems, is proposed. In the mathematical model geographic features of the location where pipeline is operated and the general design parameters were taken into account. The results of computer simulation of the pipeline non-stationary characteristics become the basis for choice of the hammer water prevention and compensation methods..

Keywords: water hammer, mathematical model, inclined water, numerical algorithm, computer simulation.

Постановка проблеми

Проблема гидравлического удара является чрезвычайно актуальной во всех областях деятельности, связанной с транспортировкой и использованием капельной жидкости. Течение жидкости по трубопроводам в штатном режиме, как правило, носит стационарный характер. Однако, при возникновении внештатных ситуаций, связанных с различными технологическими или аварийными моментами, режим течения переходит в нестационарный, что приводит к серьёзным проблемам, а часто и к полному разрушению трубопровода. Поэтому важно проводить детальный расчёт трубопроводных систем на предмет предотвращения гидроудара и его компенсации в случае возможного возникновения. Многообразие технических решений трубопроводных систем предопределяет различные подходы к проектированию компенсационных устройств. Проектирование таких устройств базируется на специальных исследованиях, которые могут быть проведены на различном уровне детализации. В работе предлагается методика расчёта гидравлического удара в модельном наземном или подземном трубопроводе значительной протяжённости (свыше 60 км), в которой учитываются общие гидромеханические характеристики системы и географические особенности местности его эксплуатации.

Анализ последних исследований и публикаций. Формулирование цели исследования

Классическим подходом, используемым для расчёта ударного воздействия на трубопроводы, является инженерный метод, предложенный Н.Е. Жуковским [1]. Метод может быть использован лишь для простых, хорошо изученных трубопроводных систем, поведение которых при внестатных режимах предсказуемо. Исследование сложных трубопроводных систем с большим количеством разветвлений, с трубами переменного сечения и множеством регулирующих систем представляет собой комплексную задачу, далеко выходящую за рамки инженерных гидравлических расчётов. Некоторые результаты, ставшие уже классическими, представлены в работах [2,3]. Однако анализ показывает, что многообразие конструктивных решений трубопроводных систем, напрямую связанное с особенностями их функционирования, делает каждый раз уникальным расчёт нестационарного течения в них. Так, научные данные, полученные для нестационарного течения в пневмогидравлических системах жидкостных ракетных двигателей невозможно адаптировать на другие типы трубопроводных систем [4]. Отдельного анализа требуют исследования, базирующиеся на решениях, которые носят сопряжённый характер. Такого рода задача была решена в работе [5], где рассматривалось нестационарное течение в коаксиальных трубах. Гидродинамическая задача для жидкости в канале решалась совместно с прочностной задачей для стенок канала, которые могли обладать как изотропными, так и анизотропными свойствами. Подобные исследования носят обобщающий характер, позволяют сделать выводы о возможностях использования при проектировании сложных трубопроводных систем новых композиционных материалов.

Частая необходимость решать практические задачи, связанные с возможным возникновением и предотвращением гидроудара, привела к тому, что множество научных экспериментальных и численных результатов было обобщено в специализированных расчётных пакетах коммерческого характера. В программном продукте AFT Applied Flow Technology [6] существует специальный раздел AFT Impulse, в котором размещён подраздел Waterhammer & Surge Analysis Software – специализированное программное средство, созданное для расчёта перепада давлений, вызванного гидроударом. Программа моделирует нестационарное течение воды, нефтепродуктов, криогенных жидкостей, жидкостей с особыми химическими и реологическими свойствами. Это позволяет выяснить предельные значения давлений, не приводящие к разрушению трубопровода, провести калибровку и определить место размещения оборудования для компенсации гидроудара, выявить несбалансированные силы в трубопроводе и обозначить место установления опор, мониторить возможные аварии, приводящие к возникновению гидроудара, рассчитать параметры выбранного оборудования с точки зрения возможности возникновения кавитации и пр. Множество практических задач позволяет решить программный продукт PIPE2016 [7], который содержит модуль SURGE 2016 для расчёта гидроударов. Главный недостаток таких программы – их цена, которая является неприемлемой даже для относительно крупных промышленных и коммунальных компаний. Кроме того, адаптация программ под решение конкретных задач сопряжена с определёнными трудностями.

Исходя из этого становится очевидным, что для многих практических задач, возникающих при проектировании конкретных трубопроводов, важно иметь удобную и относительно недорогую методику расчёта гидроударов и определения приемлемого метода его компенсации.

Изложение основного материала исследования

Проблема гидроударов особо остро стоит при проектировании и эксплуатации трубопроводов для перекачки жидкости большой протяжённости. Даже при относительно простой геометрии такие системы нельзя рассчитать, используя демонстрационные версии вышеназванных программ, в которых существуют ограничения по длине трубопровода в 10 км.

В качестве объекта исследований была выбрана типичная модель длинного (свыше 60 км) трубопровода для перекачки воды. Предполагается, что такой трубопровод является частью технологической системы, предназначенной для фильтрации и очистки песчано-водяной смеси с последующей подачей потребителю. Значительная протяжённость трубопровода и географические особенности местности эксплуатации предполагают учёт гидравлического уклона, что делает необходимым введение дополнительного слагаемого в уравнение количества движения системы уравнений гидравлического удара, которые имеют вид [3]:

$$v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + 0 \frac{\partial v}{\partial t} - v \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + 0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v}{\partial t} + \sin \alpha + \frac{\lambda v |v|}{2gd} = 0, \tag{2}$$

где $h = \frac{P}{\gamma} + z$ – потенциальный напор, м; z – высота осевой линии трубы над уровнем начала отсчёта, м; P – давление в трубопроводе, Па; $\gamma = \rho g$ – удельный вес жидкости, кг/м²с²; v – скорость жидкости в трубопроводе м/с; x – продольная координата вдоль основного трубопровода (от насоса до конца трубопровода); α – локальный угол наклона по отношению к горизонтальной плоскости; g и ρ – ускорение свободного падения и плотность, соответственно, м/с² и кг/м³; λ – коэффициент сопротивления трения; d – диаметр трубопровода, м; c – скорость волны, м/с.

Система уравнений (1) – (2) может быть решена аналитически, если пренебречь нелинейными членами и членами, характеризующими трение и гидравлический уклон. В случаи длинных трубопроводов, когда трение существенно влияет на характер течения, такой подход не может быть использован. По этой же причине не представляется возможным использовать методы, основанные на решении так называемых цепных уравнений. Графические методы, в которых с допустимой точностью учитывается трение и особенности геометрии трубопровода, являются слишком громоздкими и сложными для анализа. Поэтому наиболее приемлемым методом решения системы уравнений (1) – (2) является численный метод, который был использован в данной работе.

Непосредственное интегрирование исходной системы гиперболических уравнений конечно-разностными методами при маршевой схеме счёта может привести к неустойчивым решениям [8]. Одним из способов предотвращения такого рода проблем является предварительное приведение уравнений в частных производных к характеристической форме.

Для перехода от системы квазилинейных гиперболических уравнений в частных производных (1) – (2) к системе характеристических уравнений был использован усовершенствованный метод Листера, подробно описанный в [3]. После проведенных преобразований система уравнений (1) – (2) сводится к виду:

$$(3) \quad \text{I семейство кривых:} \quad dx = (v + c)dt, \quad dP + \rho c dv = -F dt,$$

$$(4) \quad \text{II семейство кривых:} \quad dx = (v - c)dt, \quad dP - \rho c dv = F dt,$$

$$\text{где} \quad F = \rho c \left(g \sin \alpha + \frac{\lambda v |v|}{2d} \right).$$

Граничные условия данной задачи определяются из конкретной внештатной ситуации, которая может привести к возникновению гидроудара. На концах трубопровода могут возникать возмущения, связанные с быстрым закрытием клапана в конце трубопровода, с мгновенным отключением насоса в начале трубопровода после получения информации о закрытии клапана в конце основного трубопровода, аварийные остановки насоса с закрытым клапаном, быстрое включение насоса в полностью заполненной неподвижной жидкостью трубопроводе и пр.

Моделирование проводилось для случая, когда закрытие клапана в конце трубопровода привело к полной аварийной остановке насоса в начале трубопровода, т.е. граничные условия имели вид:

$$v|_{x=L} = 0, \quad v|_{x=0} = 0. \quad (5)$$

Начальные условия выбирались в предположении, что абсолютное давление жидкости в начальный момент времени при напорном течении жидкости вдоль трубы распределяется так:

$$P(x)_{t=0} = P_{H_N} + P_A - P_J(x) - P_F(x), \quad (6)$$

где $P_{H_N} = H_N \rho g$ – значение давления, которое соответствует величине полного напора в рабочей точке сети H_N , и включающие общие потери в сети и полный геометрический напор; P_A – атмосферное давление; $P_J(x) = \rho g J x$ – потери давления, связанные с влиянием гидравлического уклона трубы J ;

$P_F(x) = \rho g k x$ – потери давления, связанные с трением; $k = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2}$ – коэффициент, полученный из уравнения Дарси – Вейсбаха при среднерасходной скорости потока.

Скорость течения в трубе в начальный момент времени вычислялась на основании уравнения Бернулли, в котором величина H_g определялась как геометрический напор:

$$v_{t=0} = \sqrt{\frac{2(H_N - H_g)gd}{\lambda l}} \tag{7}$$

Величины, используемые в начальных условиях, определяются на основании общего гидромеханического расчёта всей модельной трубопроводной системы и представляют собой отдельную инженерную задачу.

Система характеристических уравнений (3), (4) с граничными и начальными условиями (5) – (7) была решена конечно-разностным методом с использованием нерегулярной криволинейной и регулярной прямолинейной сетки. Криволинейная сетка рассматривалась как некоторая численная интерпретация графического метода, при котором генерируется погрешность расчёта за счёт нерегулярности на границах. Прямолинейная сетка лишена этих недостатков, но создание такого алгоритма потребовало организации дополнительной интерполяции. Так как в качестве модельной жидкости использовалась вода, текущая по трубопроводу со скоростью, значительно меньшей скорости звука, то два предлагаемых алгоритма дали практически одинаковый результат.

На рис. 1. представлен типичный график распределения давления в начале трубопровода.

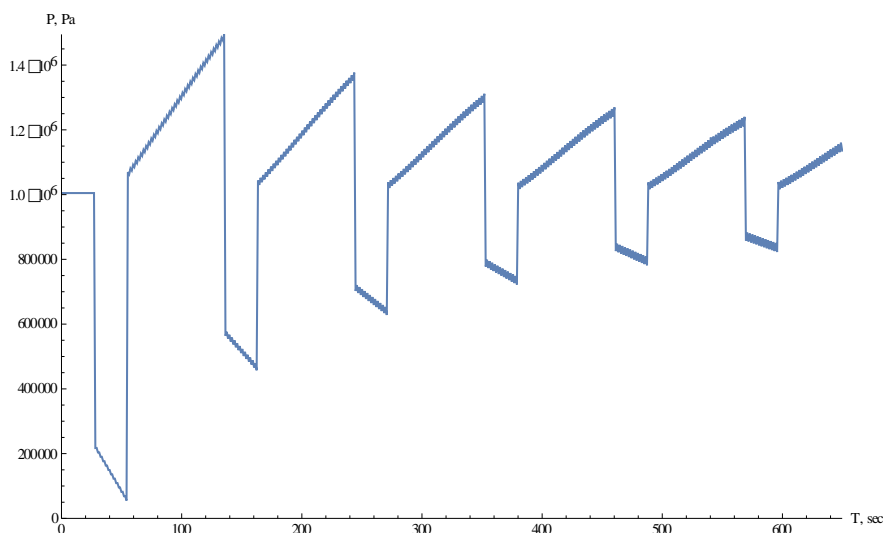


Рис. 1. Изменение давления в начале трубопровода

Как видно из графика, максимальное значение давления соответствует первой фазе прохождения ударной волны, период которой для модельного трубопровода был равен $T_0 = 108,3s$. Подобный качественный вид имеют графики распределения давления и в различных сечениях трубопровода. Их анализ даёт возможность сделать выводы по выбору места расположения компенсационных устройств и технологических опор в случае наземного трубопровода, а также методов компенсации для подземных систем.

Характер изменения скорости жидкости при возникновении гидроудара в середине трубопровода представлен на рис. 2. Именно в середине трубопровода наблюдаются наибольшие колебания скорости.

Представленные результаты являются основой для дальнейших исследований по определению наиболее рациональных гидромеханических параметров трубопроводной системы с точки зрения предотвращения гидроударов, для выбора метода его компенсации и расчёта характеристик компенсационного устройства. Например, при использовании в качестве компенсационного устройства мембранного гидроаккумулятора, его объём может быть рассчитан на основе решения дифференциального уравнения, в которое входят вычисленные величины [2].

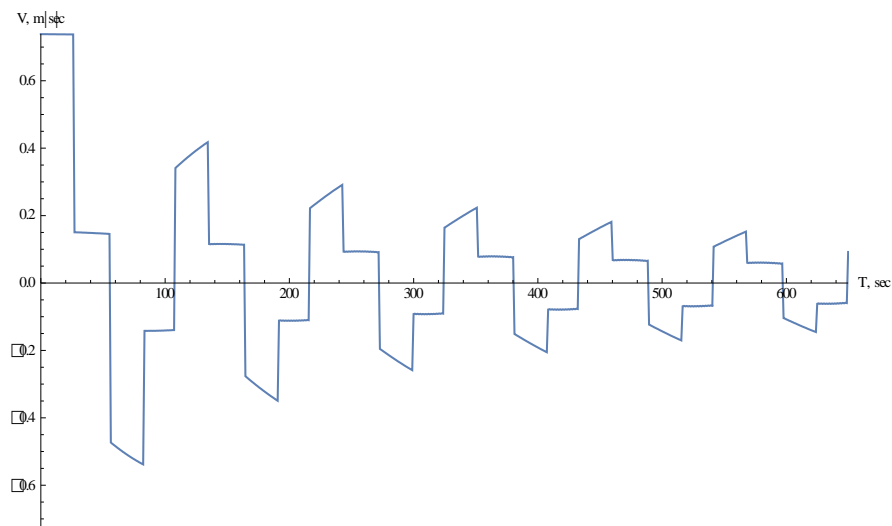


Рис. 2. Изменение скорости в середине трубопровода

Следует отметить, что представленный подход может быть использован в случае, когда скорость ударной волны значительно превосходит скорость течения жидкости и жидкость является однородной. Если это условие не выполняется, то использование нерегулярной сетки приведёт к ошибочным результатам. Особые приёмы нужно применять и в случае использования жидкостей со специфическими реологическими свойствами или жидкостей, имеющих в своём составе пузырьки газа.

Выводы

В работе представлена методика расчёта параметров трубопроводной системы большой протяжённости в случае возникновения в ней гидравлического удара. В математической модели проведён учёт влияния географических особенностей местности и гидромеханических параметров трубопровода. Численный алгоритм позволяет определить максимальные значения давления и скорости в системе, ориентируясь на которые становится возможным провести подбор характеристик компенсационного устройства и место его установки. Методика позволяет установить время затухания ударного воздействия, которое необходимо знать для запуска системы в штатном режиме.

Список используемой литературы

1. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н.Е. Жуковский. – М.-Л., Гостехиздат, 1949. – 103 с.
2. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный. – М., Надра, 1975. – 294 с.
3. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах / Д.А. Фокс. – М., Энергоиздат, 1981. – 248 с.
4. Тимошенко В.И. Неустановившиеся течение жидкости в сложных разветвлённых трубопроводных системах / В.И. Тимошенко, Ю.В. Кнышенко // Авиационно-космическая техника и технология, 2012, №5 (92). – С. 47-57.
5. Pierluigi Cesana, Neal Bitter Modeling and analysis of water-hammer in coaxial pipes. / California Institute of Technology, USA, 2015 – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1501.07463v1>
6. <http://www.aft.com>
7. <http://kypipe.com>
8. Самарский А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. – М., Наука, 1992. – 424 с.