

Визуализация параметров течения в разветвленных системах с помощью графиков с древовидной структурой (на примере течения в трубопроводе)

С.А. Губин¹, С.И. Сумской², А.М. Сверчков^{3*}, А.А. Агапов^{4*}, Д.Ю. Окунев⁵

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

* ЗАО НТЦ ПБ (ЗАО «Научно-технический центр «Промышленная безопасность»)

¹ ORCID: 0000-0001-7211-1103, gubin_sa@mail.ru

² ORCID: 0000-0001-8308-7356, sumskoi@mail.ru

³ ORCID: 0000-0002-7643-6543, sverchkov@safety.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-6778-3068, inform@safety.ru

⁵ ORCID: 0000-0001-6402-3349, dyokunев@mephi.ru

Аннотация

В работе предложен подход к визуализации параметров течений в разветвленных системах, описываемых в одномерном приближении. Для этого предлагается рассматривать зависимости соответствующих параметров во всех ветвлениях как функцию от одной переменной – расстояния от начала системы. В этом случае непрерывные в местах ветвления функции графики обретают древовидную структуру, которая позволяет в удобной форме воспринимать всю пространственно-временную картину течения.

Предложенный подход применен к визуализации данных, полученных при решении задачи о гидроударах в ветвящихся трубопроводах. Приведена модель, описывающая это течение, также приведены основные результаты расчетов, визуализированные как в виде графиков для определенных моментов времени, так и в динамическом виде (анимации).

Ключевые слова: древовидные графики, визуализация данных, трубопроводные системы, гидроудар, схема С.К.Годунова.

1. Введение

В природе и технике, на транспорте часто встречаются пространственные разветвленные системы, характеризующиеся теми или иными параметрами, изменяющимися как в пространстве, так и во времени.

Типовыми примерами таких систем в природе являются кровеносные системы живых организмов. Кровеносная система имеет ветвящуюся, древовидную структуру: сначала крупные артерии ветвятся до капиллярных сосудов, а потом капиллярные сосуды собираются в крупные венозные сосуды. Движение крови по такой системе характеризуется различными параметрами – давлением, скоростью, расход, диаметр и форма поперечного сечения кровеносного сосуда и т.д.

В технике к наиболее известным примерам такого рода объектов относятся трубопроводные системы: существуют

магистральные трубопроводы для перемещения продуктов на сотни и тысячи километров, промышленные трубопроводы для сбора продукта с мест добычи в магистральные трубопроводы, технологические трубопроводы для перекачки веществ в пределах предприятия, тепловые, водопроводные и газовые сети, обеспечивающие снабжение населения. Все эти трубопроводы в общем случае имеют разветвленную систему. Движение среды по трубопроводам характеризуется давлением, температурой, скоростью, составом, содержанием парогазовой фракции, полнотой перекрытия сечения и т.д.

Наконец, еще одним примером ветвящихся систем являются транспортные системы, дороги. Их основными характеристиками являются интенсивность трафика и скорости транспортных средств.

Все перечисленные выше примеры обладают одной характерной особенностью, в них протяженность объекта намного превосходит его поперечный размер. Например, у магистральных трубопроводов характерный диаметр потока (трубы) составляет порядка 1 м, а протяженность - порядка 1000 км.

Описание систем с таким соотношением пространственных размеров сегодня наиболее эффективным образом проводится в рамках одномерного подхода путем решения одномерных уравнений, где параметры, описывающие состояние системы, изменяются только в продольном направлении. В поперечном направлении все параметры считаются неизменными. Например, при течении в трубопроводе все параметры потока в любой площади поперечного сечения считаются постоянными, хотя с точки зрения многомерной гидродинамики скорость на оси трубопровода отлична от скорости в пристеночном слое. Такое «выравнивание» по сечению скорости достигается путем осреднения.

Соответственно, при решении одномерных уравнений получаются одномерные распределения профилей тех или иных параметров в зависимости от расстояния. Такие распределения обычно визуализируются в виде одномерных графиков, которые легко воспринимаются и интерпретируются в практических реализациях.

Однако, в случае, если одномерными распределениями описываются параметры в ветвящейся системе, то возникает проблема удобства восприятия многочисленных зависимостей параметров от пространственной переменной не на одном пространственном интервале, а во всей совокупности основных и ответвляющихся элементов.

В данной работе эта проблема рассматривается на примере визуализации параметров течения в ветвящейся трубопроводной системе, по которой в изотермическом режиме транспортируется сжимаемая жидкость.

2. Подход к визуализации данных, описывающих пространственно-временное распределение параметров в ветвящихся системах

Для визуализации параметров течения в ветвящихся системах можно использовать зависимости тех или иных параметров от единственного аргумента - расстояния. Это можно сделать как в режиме «фотоснимок» для одного момента, так и в режиме «видео» для определенного интервала времени.

В простейшей ситуации, когда имеется единственный пространственный интервал, параметры на котором необходимо визуализировать, не возникает никаких проблем ни с построением, ни с восприятием визуализированных данных: функции одной переменной являются привычным представлением данных.

Однако если имеется разветвленная сеть, например такая, как представлена на рис. 1 (в ней 23 линейных участка), то возникает вопрос, как наиболее удобным для восприятия образом представить распределение параметров по такой системе.

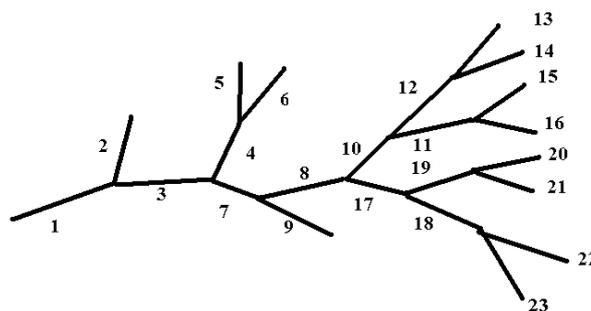


Рис. 1. Пример разветвленной системы из 23 линейных элементов.

Наиболее простым и очевидным способом является соотнесение каждому линейному участку своего графика, иллюстрирующего изменение соответствующего параметра вдоль этого отдельно взятого участка. В случае реализации та-

кого подхода получается набор графических зависимостей. Эти зависимости могут быть представлены либо на отдельных рисунках, либо на одном рисунке. При небольшом количестве ветвлений можно более-менее легко составить себе представление о распределении параметров во всей системе. Однако при возрастании ветвлений делать это представляется всё более сложным. Пример такой формы представления для системы, изображенной на рис. 1, приведен на рис. 2а, где представлена зависимость некоторой соответствующей определенному моменту времени функции $f(x)$ в каждом из линейных элементов, составляющих ветвящуюся систему. Расстояние x на этом графике, отсчитывается от точки ветвления (для элемента 1 – от начала системы). На рис. 2а для соотнесения различных зависимостей с соответствующим элементом ветвящейся системы использовалась цветовая раскраска. Трудно не признать тот факт, что восприятие всей совокупности данных, визуализированных на рис. 2а крайне затруднительно.

Другой возможный вариант визуализации состоит в использовании следующего приема: отображать непосредственно на схеме ветвлений значения параметров. Это может быть сделано различными способами:

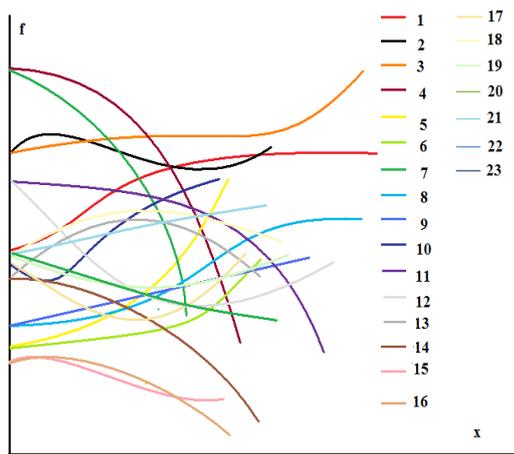
- с использованием цветовой шкалы на плоской схеме разветвленной системы;
- с использованием цветовой шкалы на пространственной конфигурации разветвленной системы;

- с использованием трехмерной графики на пространственной конфигурации разветвленной системы.

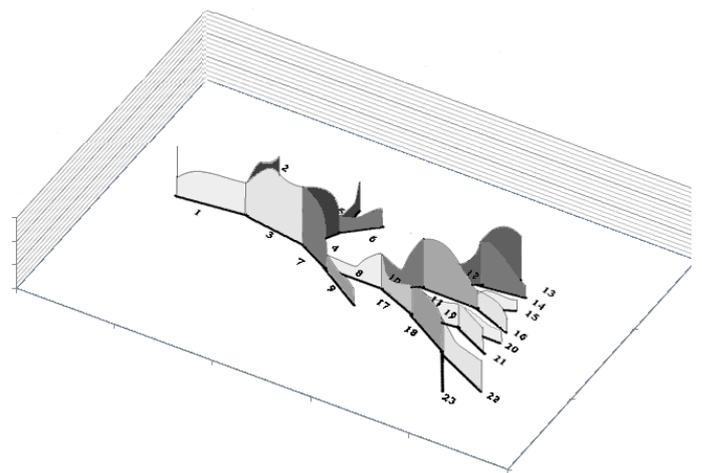
Последний вариант визуализации представлен на рис. 2б. Такой вариант визуализации, безусловно, облегчает восприятие по сравнению с вариантом, представленным на рис. 2а.

Визуализация с привязкой к схеме ветвлений облегчает цельное восприятие всей картины течения, и визуальный образ различных участков с параметрами в них складывается практически без усилий, автоматически. Однако при таком подходе в трехмерной перспективе сложнее (по сравнению с графической зависимостью от одного параметра) проводить сравнение значений параметров в различных точках. Кроме того, учитывая значительную вариацию протяженности системы в различных направлениях, неизбежно возникнет проблема восприятия различных масштабов в трехмерной визуализации.

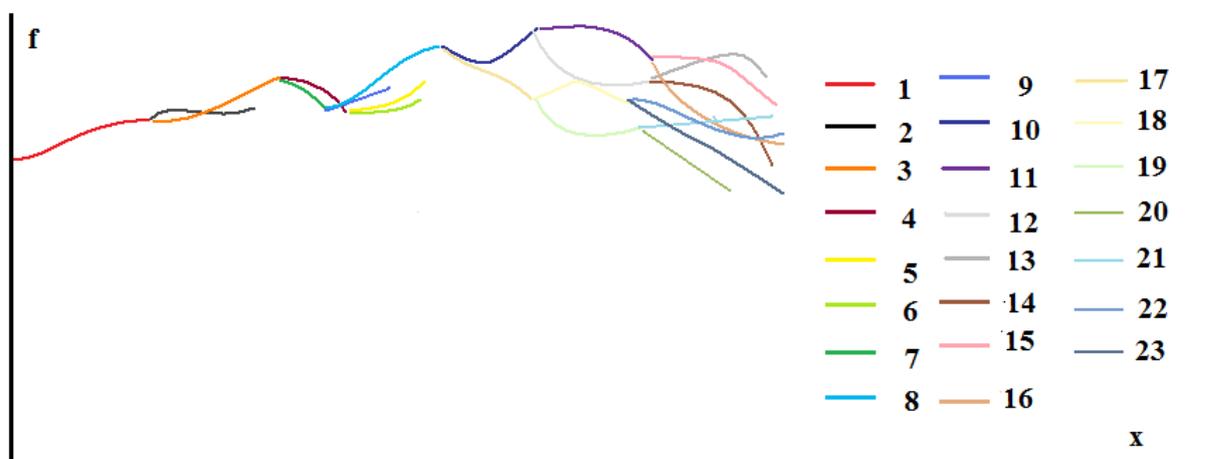
В данной работе предлагается решить эту задачу с помощью графиков с древовидной структурой. В качестве объекта исследования выбрана ветвящаяся трубопроводная система для транспортировки слабосжимаемой жидкости. Основными параметрами, характеризующими течение в такой системе, являются давление, скорость, расход, диаметр трубопровода, температура, коэффициент трения. Особую практическую важность представляет собой расчет давления, поскольку именно превышение давлением некоторых допустимых величин влечет разрушение трубопровода.



a)



б)



в)

Рис. 2. Возможные варианты визуализации распределения параметра $f(x)$ в некоторый момент времени в разветвленной системе (на примере системы, изображенной на рис. 1): в виде совокупности зависимостей от пространственной переменной (а), в виде трехмерной графики с привязкой к пространственной ветвящейся системе (б), в виде древовидного графика (в).

2.1. Визуализация с использованием древовидных графиков

Древовидные графики представляют собой совокупность зависимостей соответствующего параметра от расстояния в определенный момент времени. При этом на одном графике отображаются зависимости сразу для всех линейных участков в единой системе координат, где началу координат соответствует начало трубопровода, а собственно координатой является расстояние от конкретной точки до начала координат. Таким

образом, для каждой ветвящейся системы строится древовидный график, полностью соответствующей ее топологии. Пример визуализации такого типа приведен на рис. 2в. Этот пример также относится к системе, изображенной на рис. 1. Для соотнесения той или иной зависимости с конкретным элементом разветвленной системы используется различная цветовая окраска, однако, можно легко заметить, что это практически не сказывается на восприятии: в черно-белом варианте визуализация 2в также оставалась бы достаточно информативной.

Сравнивая три подхода к визуализации, представленные на рис 2, можно

сделать вывод, что наибольшую наглядность в сочетании с простотой имеет подход с использованием древовидных графиков.

Следует отметить, что данная форма представления обладает определенным достоинством: в местах ветвлений тех функции, что являются непрерывными, графики ветвятся наподобие древовидной структуры. Соответственно, визуализация параметров происходит в наиболее естественном виде: в удобном для восприятия виде (зависимость функции от одного параметра) представляется распределение параметров по всей системе с четкой привязкой ко всем местам ветвления.

При моделировании процессов в разветвленных системах интерес представляют, как правило, определенные интегральные характеристики потока. Например, при расчете течений в трубопроводах, важно не только знать текущие значения давления, но и максимально достигаемые по всем участкам давления за все время развития процессов. Не менее важно определить те участки, на которых были превышены допустимые значения давления.

В связи с этим древовидный график может быть дополнен визуализацией некоторых интегральных характеристик:

- на график древовидной функции, соответствующей определенному моменту времени, может быть нанесен график максимальных (или минимальных) достигнутых к этому моменту величин соответствующего параметра в той или иной точке; для трубопроводов это обычно зависимость от координаты максимальных давлений, достигнутых за соответствующее время;

- на график древовидной функции, соответствующей определенному моменту времени, может быть нанесен график максимально допустимых значений соответствующей величины; для трубопроводов в качестве такой величины обычно задаются максимально допустимые значения давления, выше которых эксплуатация трубопровода может вызвать его разрушение;

- на графике древовидной функции, соответствующей определенному моменту времени, могут быть отображены опасные пространственные интервалы, на которых к этому моменту времени уже превышены максимально допустимые значения; в случае рассмотрения трубопроводной системы места превышения максимально допустимого давления на данный момент времени могут быть выделены, например цветом, непосредственно на самой линии функции.

В заключении следует особо отметить, что изложенный подход к визуализации с помощью древовидных графиков применим не только к отображению в заданные моменты времени, но и в виде анимированных фильмов. В этом случае, на наш взгляд, наглядность предложенного подхода в представлении данных увеличивается за счет непрерывного восприятия всей пространственно-временной картины течения.

Кроме того, анимационная визуализация может оказаться более наглядной. В случае ее реализации в системах реального времени, когда все изменения отражаются в реальном или опережающем времени, например, в диспетчерских пунктах, с которых ведется контроль за реальными трубопроводными системами, анимационная визуализация незаменима при анализе возникновения и развития аварийных ситуаций.

2.2. Программная среда, использованная для визуализации результатов моделирования течения в трубопроводной системе

Для визуализации параметров течения в разветвленной системе трубопроводов использовалось программное средство "ТОХИ+Гидроудар" [1]. Программное средство "ТОХИ+Гидроудар" создано для проведения расчетов параметров в трубопроводных системах произвольной конфигурации, включающей в себя все стандартные типы оборудования, необходимого для функционирования трубопровода: задвижки различных

типов, насосы, предохранительные клапаны различных принципов действия и параметров, обратные клапаны, ветвления, стыки труб различного диаметра, емкости. "ТОХИ+Гидроудар" позволяет описывать стационарные, переходные и аварийные процессы при транспортировке по трубопроводам стабильных слабосжимаемых жидкостей (нефть, бензин, вода).

Для работы "ТОХИ+Гидроудар" не требуется специального аппаратного оборудования, расчеты с необходимой для практических нужд точностью могут

быть выполнены на стандартных персональных компьютерах.

Для обеспечения наглядного отображения результатов моделирования движения жидкости по разветвленным трубопроводным системам в программном средстве "ТОХИ+Гидроудар" реализована специальная подсистема — визуализации результатов моделирования (Рис. 3). Данная подсистема позволяет отображать различные параметры среды (плотность, скорость, давление, расход и т.д.) на любой момент времени моделирования, либо в динамике с различной скоростью смены времени.

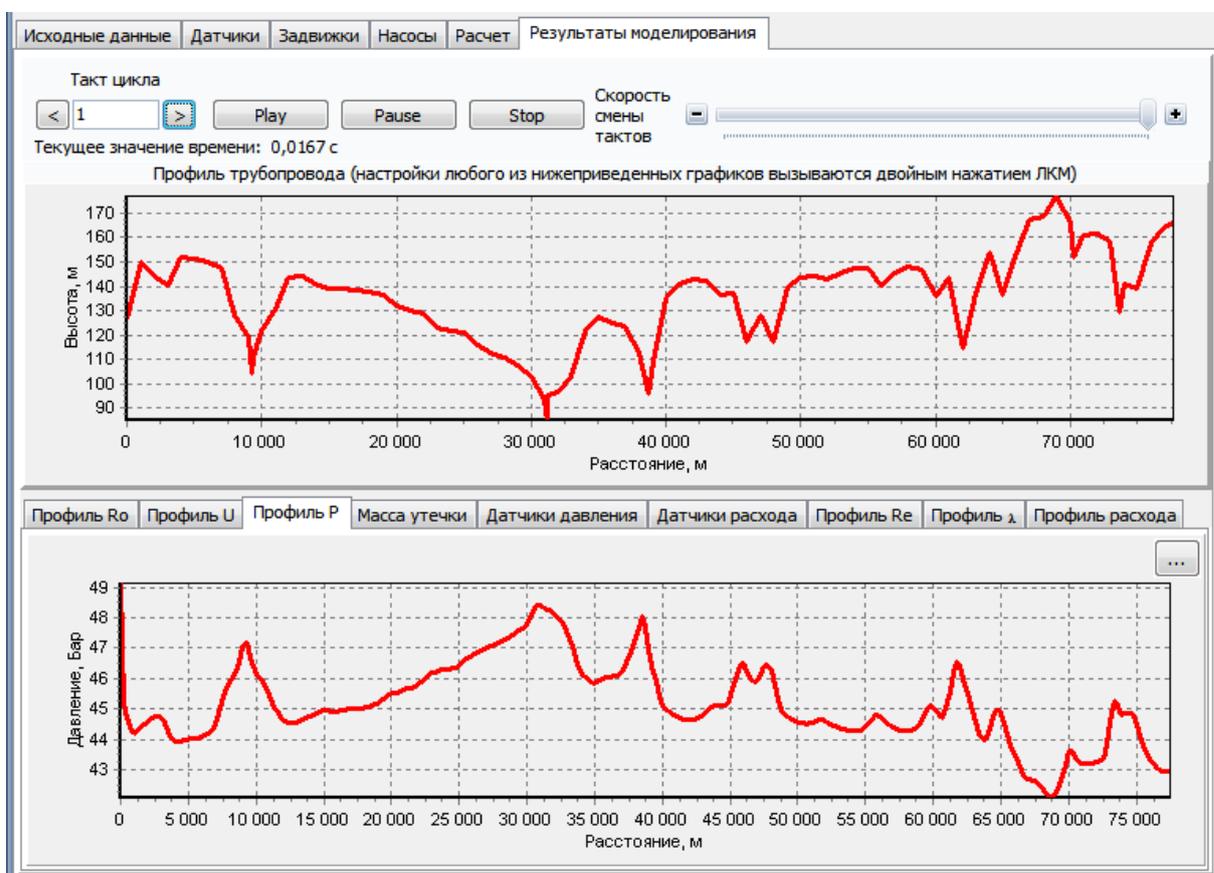


Рис. 3. Вкладка для визуализации результатов моделирования.

3. Описание математической модели процесса

В изотермическом приближении движение жидкости в трубе с изменяющимся за счет упругой деформации сечением описывается

системой следующих уравнений для одномерного нестационарного изотермического потока [2-5]:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(A \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial(A \cdot \rho \cdot u)}{\partial t} + \frac{\partial(A \cdot \rho \cdot u^2)}{\partial x} = -A \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - A \cdot \frac{\lambda(\text{Re})}{2 \cdot D} \cdot \rho \cdot u \cdot |u| - A \cdot g \cdot \rho \cdot \beta, \quad (2)$$

уравнение связи давления и плотности (уравнение состояния)

$$p - p_0 = c^2(\rho - \rho_0) \quad (3)$$

где ρ , p , u — осредненные по сечению плотность, давление и скорость движения жидкой среды; t — время; x — расстояние от начала трубопровода; $\lambda(\text{Re})$ — коэффициент трения (коэффициент гидродинамического сопротивления) как функция числа Рейнольдса $\text{Re} = Du/\nu$; A — площадь поперечного сечения трубопровода, D — диаметр трубопровода, g — ускорение силы тяжести; β — синус угла наклона трассы, который определяется по высотным отметкам трубопровода $h(x)$, ν — кинематическая вязкость; ρ_0 — плотность жидкости при давлении p_0 и температуре транспортировки (обычно $p_0 = 10^5$ Па), c — скорость распространения возмущений.

В рассматриваемой модели учтены следующие факторы:

- нестационарность процесса;
- изменение сечения трубопровода при его деформации;
- конвективное движение среды (вторые слагаемые в левых частях (1) и (2));
- появление и циркуляция волн при остановке/пуске насосов, закрытии задвижек (первое слагаемое в правой части (2));
- наличие трения о стенки трубы (второе слагаемое в правой части (2));
- действие на поток силы тяжести при прохождении трассы трубопровода по местности со сложным рельефом (третье слагаемое в правой части (2)).

Уравнения (1)–(3) дополняются начальными и граничными условиями. В качестве граничных условий задается давление на входе и выходе трубопровода, это давление соответствует давлению находящихся на концах трубопровода емкостей или насосов. В качестве начальных данных задаются параметры стационарной

перекачки, которые могут быть получены аналитически из решения системы (1)–(3).

При перекрытии задвижкой потока граничным условием является нулевая скорость потока.

Система (1)–(3) описывает движение в одном линейном участке. В случае разветвленной системы трубопроводов, когда отдельные линейные участки сочетаются в определенной последовательности, система уравнений (1)–(2) записывается для каждого линейного участка. Граничные условия в местах стыка двух линейных участков задаются таким образом, чтобы сохранялись потоки массы и импульса из одного участка в другой.

Для определения $\lambda(\text{Re})$ в данной работе используется зависимость Коулбрука — Уайта [6], связывающую коэффициент трения λ с числом Рейнольдса Re и характеристиками трубопровода (диаметром D и шероховатостью k)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda(\text{Re})}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda(\text{Re})}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right], \quad (4)$$

где k — размер шероховатости трубопровода.

Таким образом, система уравнений (1)–(4) позволяет в достаточно полном объеме учитывать реальные характеристики действующего на трубопроводе оборудования: труб, насосов, задвижек, и т.д.

Для решения системы уравнений (1)–(4) использовался метод на основе подхода С.К.Годунова, ранее описанный в [3, 7–8].

Метод Годунова применяется к системам уравнений, записанным в дивергентном виде. Например, для системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

при её численном решении строится её разностный аналог в виде:

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \Delta t \frac{\Phi_{i-1/2}^n - \Phi_{i+1/2}^n}{\Delta x}, \quad (6)$$

где U – вектор искомых величин, представляющих собой функцию пространства x и времени t , Φ – поток величин U , U_i^n – разностный аналог величин U , отнесенных к i -ой разностной ячейке пространства (координаты её центра составляют $(i+1/2) \cdot \Delta x$) на n -ом временном слое (в $n \cdot \Delta t$ момент времени), $\Phi_{i+1/2}^n$ – разностный аналог величин Φ , отнесенный к границе i -ой разностной ячейке с координатой $i \cdot \Delta x$ (правая граница ячейки), Δt и Δx – дискретные шаги по времени и пространству.

Таким образом, используя (6) можно находить на каждом новом $n+1$ -ом временном слое значения величины $U(n \cdot \Delta t, (i+1/2) \cdot \Delta x)$ (U_i^{n+1}), зная ее значение на n -ом временном слое (U_i^n) и зная потоки этой величины через границы соответствующей ячейки $\Phi_{i-1/2}^n$ и $\Phi_{i+1/2}^n$.

Так вот в подходе С.К.Годунова величины $\Phi_{i+1/2}^n$ находятся из решения задачи Римана, задачи о распаде разрыва. При решении этой задачи в начальный момент времени одна часть полупространства занята средой с параметрами U_i^n , а другая – с параметрами U_{i+1}^n . В последующие моменты времени в каждое из двух полупространств начнет распространяться своя волна. И каждая из этих двух волн будет переводить исходные состояния U_i^n и U_{i+1}^n в новые состояния, причем эти новые состояния «сшиваются» по определенным параметрам (в газовой динамике это давление и скорость). Задача о распаде разрыва может быть решена аналитически либо точно, либо

приближенно. При известных параметрах в области «сшитого» течения становится возможным рассчитать и потоки $\Phi_{i-1/2}^n$ и $\Phi_{i+1/2}^n$, т.е. фактически решить (6).

Следует отметить, что метод Годунова на сегодня является одним из самых распространенных методов численного решения систем гиперболических уравнений, что обусловлено его высокой физической обоснованностью.

4. Постановка задач

При срабатывании задвижек в трубопроводе, а также при остановке или изменении режима работы перекачивающего насоса происходит замедление или полная остановка движения среды в трубопроводе. В свою очередь торможение среды перед задвижками или перед насосом ведет к росту давления, формированию области повышенного давления в трубопроводе и последующему распространению этой области повышенного давления по трассе трубопровода. Такое распространение волн повышения давления в трубопроводах называется гидроударом [9].

Гидроудар представляет существенную опасность для целостности трубопроводов, поскольку рост давления может привести к разрыву трубы или образованию опасных дефектов [10].

Так, гидроудар послужил одной из причин аварии с разрывом трубопровода на нефтебазе «Шесхарис» (г. Новороссийск) и загрязнением акватории порта [11].

Опасность гидроудара в трубопроводных системах усугубляется тем фактом, что в трубопроводах, как правило, реализуются одномерные потоки. А поскольку имеет место одномерная геометрия, то волны сжатия, распространяющиеся по трубопроводу затухают достаточно медленно, что приводит к созданию зон потенциальной опасности на протяжении десятков километров.

Исследования гидроудара проводились на протяжении десятков лет, начиная с работы Н.Е.Жуковского [9] и заканчивая современными монографиями, диссертациями и статьями [1, 10, 12, 13, 14]. Обычно рассматривается гидроудар в одностороннем трубопроводе. Однако реальные трубопроводные системы нередко имеют более сложную топологию, включающую ветвления и ответвления с возвратом в основной трубопровод (лупинги).

Ветвящаяся структура трубопровода может оказывать существенное влияние на развитие гидроудара.

Постановка задачи о гидроударе в ветвящейся системе крайне актуальна с практической точки зрения. Действительно, последствия гидроудара наиболее опасны в случаях быстрого срабатывания запорной арматуры. Такое быстрое (за 3-5 секунд) срабатывание запорной арматуры и полное перекрытие потока часто имеют место при отгрузке на морских терминалах. Там важно быстро отсечь поток, поскольку выброс может попасть в водную среду, что чревато огромными экологическими ущербами. Отгрузка же больших объемов с высокой скоростью нередко проводится через несколько трубопроводов с целью сокращения общего времени отгрузки. В результате возможно возникновение гидроудара в разветвленной системе.

Ниже рассматривается задача возникновения и развития гидроудара в трубопроводе с одним и несколькими ветвлениями.

4.1. Трубопровод с единственным ветвлением

Рассмотрим следующую модельную конфигурацию ветвящегося трубопровода (см. рис. 4). От начала трубопровода (точка А) до точки ветвления (точка О) труба протяженностью 20 км имеет диаметр 1 м, в точке О трубопровод ветвится на две одинаковые трубы длиной 20 км и диаметром $1/(2)^{0,5}$ м каждая, т.е. пло-

щадь поперечных сечений двух ответвлений равна площади поперечного сечения главной трубы. Все трубы имеют одинаковую шероховатость - 0,3 мм и проложены по ровной местности. В начале трубы поддерживается давление 1,0 МПа. В конце труб-ответвлений поддерживается давление 0,3 МПа, а также стоят шибберные задвижки, которые полностью перекрывают поток за 0,1 сек.

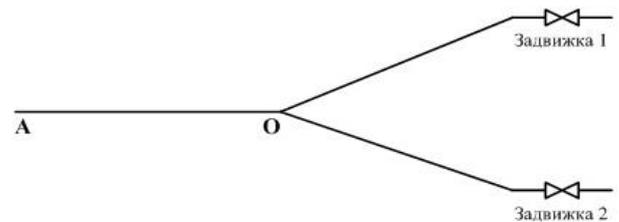


Рис. 4. Схема модельной ветвящейся трубопроводной системы (одно ветвление).

Рассматривается сценарий при котором срабатывает задвижка №2.

При расчете предполагалось, что скорость распространения возмущений совпадает со скоростью звука и составляет 1300 м/с. Плотность транспортируемой среды при $p_0=10^5$ Па – 840 кг/м³, вязкость – $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Задача решалась на сетке с пространственным шагом 400 м.

4.2. Трубопровод со множественным ветвлением

При решении второй задачи рассматривалась следующая конфигурация трубопровода с тремя ответвлениями (см. рис. 5). Основной трубопровод состоял из 4 секций (№№ 1, 3, 5 и 7 на рис.5), каждая протяженностью 10 км. Диаметр этого основного трубопровода уменьшался от секции к секции:

- секция №1 имела диаметр 1 м;
- секция №3 имела диаметр 0,7071 м;
- секция №5 имела диаметр 0,5 м;
- секция №7 имела диаметр 0,3536 м.

В рассматриваемой системе имелось три ответвления, каждое протяженностью 5 км (см. рис. 5):

- ответвление №2 отходило от основного трубопровода на стыке секций №1 и №3; это ответвление имело диаметр

0,7071 м; в конце ответвления №2 поддерживалось давление 0,5 МПа;

- ответвление №4 отходило от основного трубопровода на стыке секций №3 и №5; это ответвление имело диаметр 0,5 м; в конце ответвления №4 поддерживалось давление 0,3 МПа;

- ответвление №6 отходило от основного трубопровода на стыке секций №5 и №7; это ответвление имело диаметр 0,3536 м; в конце ответвления №6 поддерживалось давление 0,1 МПа.

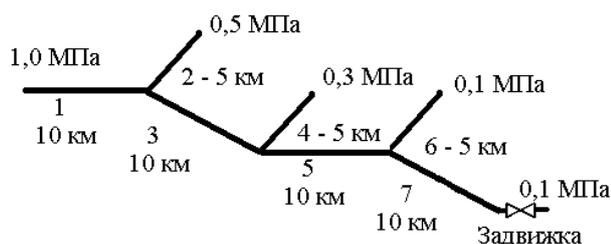


Рис. 5. Схема модельной ветвящейся трубопроводной системы (три ветвления).

На входе в трубопроводной системе поддерживалось давление 1.0 МПа, а в конце (на выходе секции №7) – 0,1 МПа.

Все трубопроводы идут по ровной местности.

Размер шероховатости внутренней поверхности всех трубопроводов - 0,02 мм.

По трубопроводу перекачивается вода при температуре 20 С, плотность была принята равной 1000 кг/м³, вязкость – $8,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В расчете использовалась скорость распространения возмущения, равная 1480 м/с.

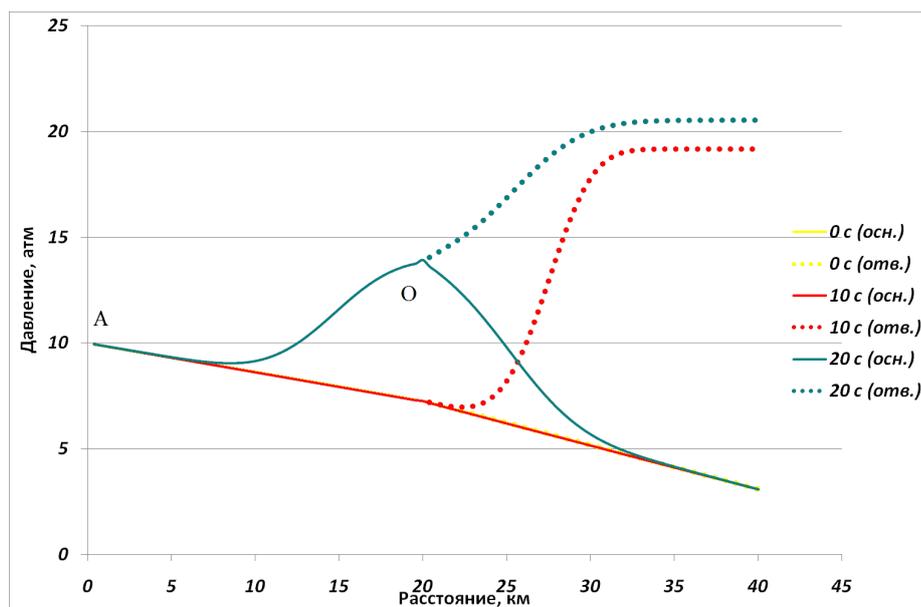
Рассматривался следующий сценарий гидроудара. При установившемся стационарном потоке в трубопроводе сработывала шибберная задвижка в конце основного трубопровода (в конце секции №7). Время полного перекрытия потока при закрытии задвижки составляло 2 с.

Задача решалась на сетке с пространственным шагом 500 м.

5. Результаты расчетов

5.1. Расчеты гидроудара в трубопроводе с одним ветвлением: срабатывание одной задвижки

На рисунке 6 показаны профили давления в различные моменты времени. На этом рисунке основной трубе соответствует участок от начала (точка А) до задвижки №1, ответвлению на этом рисунке соответствует участок от точки О до задвижки №2.



а)

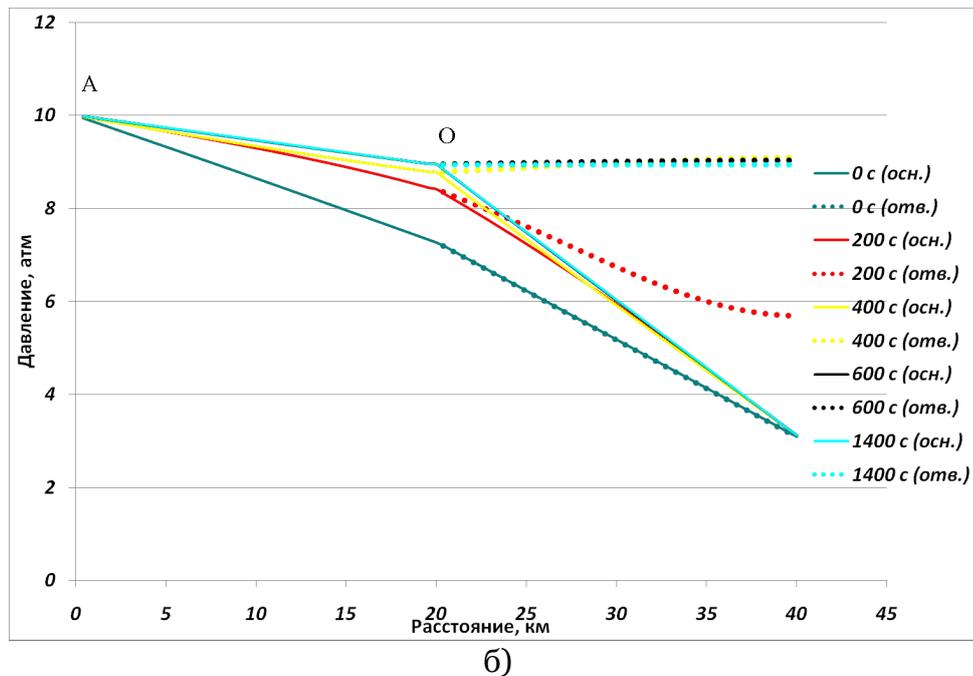


Рис. 6. Профили давления в трубопроводе в моменты времени 10, 20 с (а) и 200, 400, 600, 1400 с (б) после срабатывания задвижки №2 в конце ответвления.

Из рис. 6а хорошо видно, как сформировавшаяся в ответвлении волна (см. рис. 6а, время - 10 с) выходит в основной трубопровод (см. рис. 6а), время - 20 с).

Из рис. 6б видно, как после завершения циркуляций волн в системе происходит постепенный рост давления по всем участкам трубопровода. Наиболее существенно давление повышается на участке от точки О до задвижки №2, там где поток полностью останавливается. В другом же ответвлении (от точки О до задвижки №1) и в основном трубопроводе (от начала до точки О) рост давления по относительной величине менее значителен.

Отметим, что на величины максимально достигаемых давлений будет также влиять изменение времени задержки закрытия задвижек на ветвях трубопровода. Анализ ситуаций с разными временами закрытия задвижек на ветвях трубопровода возможен лишь при наличии качественной системы визуализации.

5.2. Расчеты гидроудара в трубопроводе с несколькими ветвлениями

Результаты расчетов гидроудара в трубопроводной системе с несколькими

ветвлениями в постановке, описанной в 4.2, представлены ниже.

На рис. 7-10 представлены распределения давления, скорости, плотности и расхода для двух стационарных состояний системы: до закрытия задвижки в конце секции №7 и после ее закрытия и установления нового режима перекачки. Из рис. 7-10 видно, что после закрытия задвижки поток в секции №7 останавливается, а давление выравнивается по всей ее протяженности. При этом пропускная способность системы падает незначительно, это видно из рис. 10 (а) и (б), где расход всей системы, определяемый по расходу в секции №1, падает с 1630 кг/с до 1610 кг/с. Происходит некоторое перераспределение потоков между длинными десяти километровыми секциями и короткими пятикилометровыми секциями. В секциях №3 и №5 расход несколько падает, а в секциях №2, №4 и №6 возрастает (см. рис. 10). В соответствии с изменением расхода изменяются и такие параметры как скорость и давление. Скорость в коротких секциях возрастает, а в длинных падает (см. рис. 8). Градиенты давления в коротких секциях возрастают, а в длинных падают (см. рис. 7).

Из приведенных данных также хорошо видно и слабое изменение плотности в потоке (см. рис. 9).

Промежуточные состояния в системе приведены на анимациях, представленных на рис. 11 и 12, где визуализированы давления и скорости.

На этих анимациях начало закрытия задвижки приходится на момент времени 290 с.

Из рис. 11 видно, что через 6 сек после начала закрытия задвижки волна от конца трубопровода подходит к первому с конца ветвлению (в конце секции № 5). Эта волна начинает разгружаться в секции №5 и №6. Давление на задвижке к этому моменту времени достигает 1,8 МПа. Примерно через 9 с после начала закрытия задвижки волна доходит до конца секции № 6 и начинает разгружаться через этот сток. К этому моменту времени давление на закрытой задвижке достигает почти 1,9 МПа, а на первом от конца ветвлении – 0,7 МПа.

По основной же трубе через секцию №5 примерно через 12 с после начала закрытия задвижки волна гидроудара доходит до второго от конца ветвления и начинает разгружаться в секции №3 и №4. К этому моменту времени давление на закрытой задвижке, достигнув 1,9 МПа (10 с после начала закрытия задвижки) начинает уменьшаться за счет оттока из секции №7 большей части массы (скорость на рис. 12 в секции №7 меньше нуля). Давление на первом от конца ветвлении при этом составляет 1,1 МПа. При этом из-за большего диаметра секции №5 (по сравнению с секцией №6) давление в секции №5 существенно возрастает, до 1,17 МПа.

Через 18 с после начала закрытия задвижки волна гидроудара начинает разгружаться в секции №1 и №2. При этом в секции №3 происходит рост давления, а в секциях №5 и №7 идет его уменьшение. В основном трубопроводе формируется бегущая волна, локальный максимум давления в которой к 24 секундам

после начала закрытия задвижки находится на 14 км от начала трубопровода и составляет ок. 0,86 МПа.

Минимум давления на задвижке достигается примерно через 31 с после начала закрытия задвижки. После этого в секции №7 отток массы сменяется её притоком из секции №3 (скорость на рис. 12 в секции №7 становится больше нуля) и соответственно, в секции №7 на закрытой задвижке давление начинает нарастать. Также давление растет по всему трубопроводу.

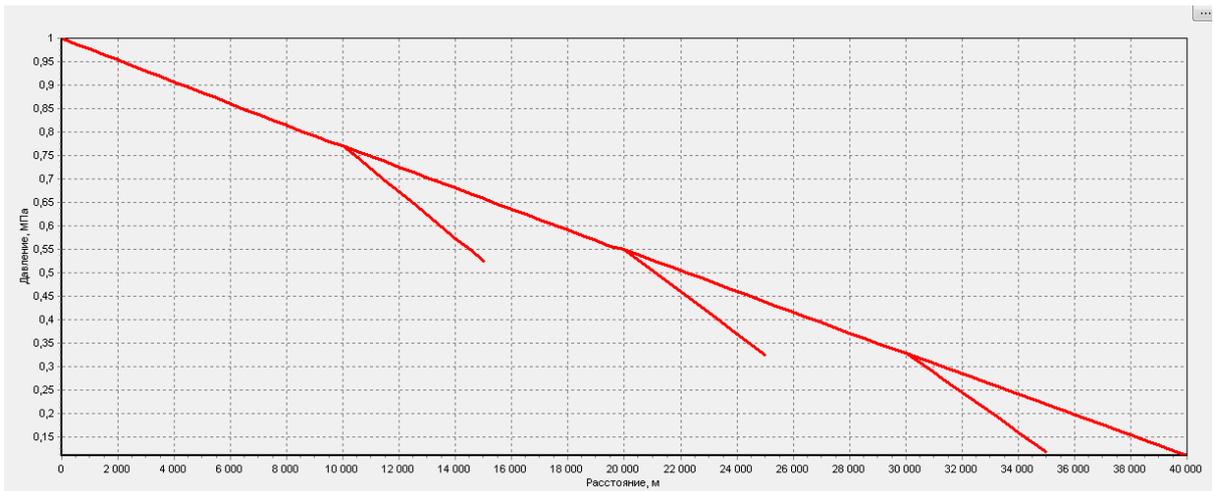
Рост давления на задвижке продолжается до 51 с после начала её закрытия. Давление на задвижке при этом достигает 0,76 МПа. Затем давление на задвижке начинает падать. С некоторой временной задержкой (примерно в 3 с) давление начинает падать и во всем трубопроводе.

После достижения 73 с после начала закрытия задвижки очередного минимума на ней (0,12 МПа) начинается очередное повышение давления.

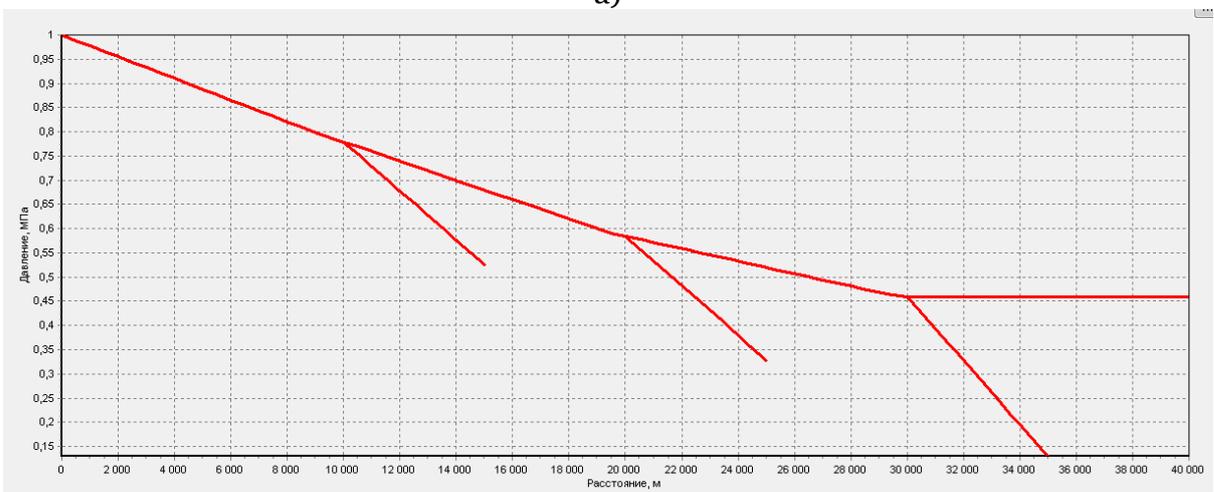
Такие колебания потока наблюдаются по всей длине трубопровода. Наибольшая амплитуда колебаний имеет место на закрытой задвижке. На основном участке (секции №1, 3, 5, 7) амплитуда осцилляций уменьшается по мере приближения к началу трубопровода. Максимумы давления в затухающих пульсациях на задвижке достигаются через 94 с, 133 с, 153 с, 181 с и 213 с после начала закрытия задвижки. Они соответственно составляют 0,72 МПа, 0,54 МПа, 0,46 МПа, 0,50 МПа и 0,49 МПа. Минимумы давления достигаются через 118 с, 146 с, 164 с, 200 с и 222 с после начала закрытия задвижки и они составляют 0,31 МПа, 0,44 МПа, 0,41 МПа, 0,42 МПа и 0,45 МПа.

Примерно через 240 с после начала закрытия задвижки колебания давления и скорости в системе практически затухают.

Все эти колебания давления в конце секции №7 представлены на анимации на рис. 13.

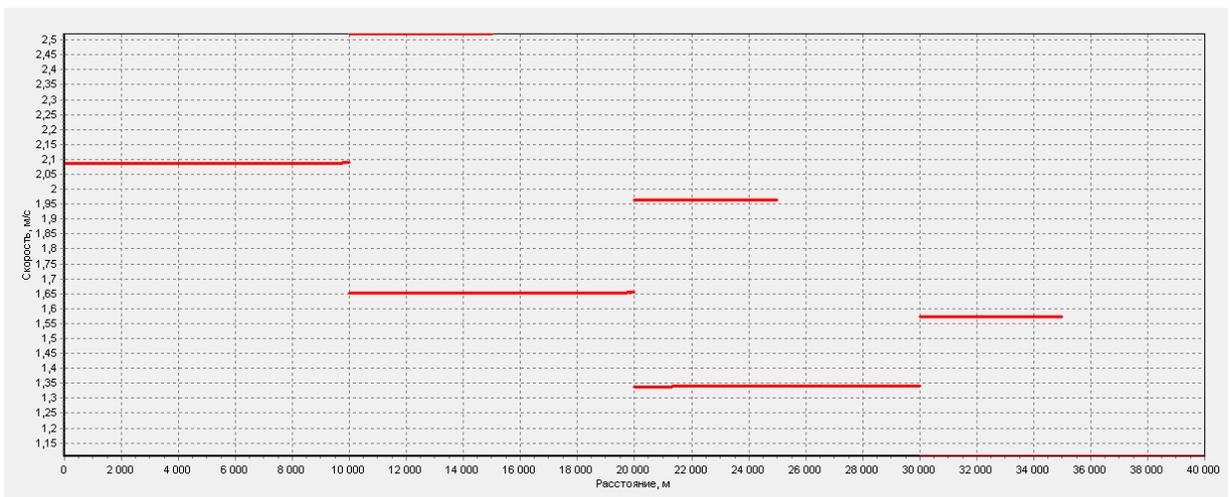


а)

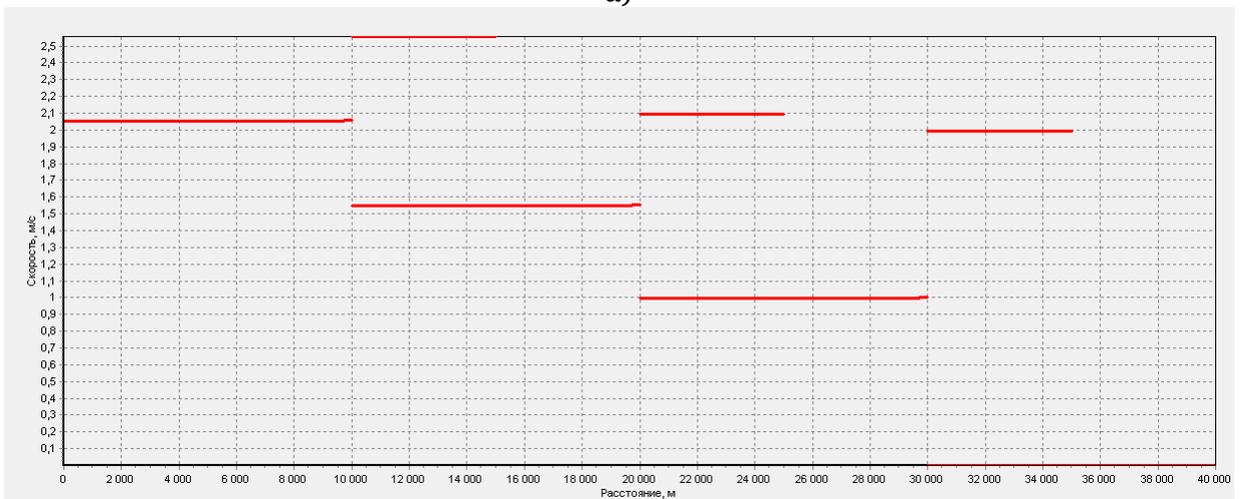


б)

Рис. 7. Начальное (а) и конечное (б) распределения давления по трассе ветвящегося трубопровода.

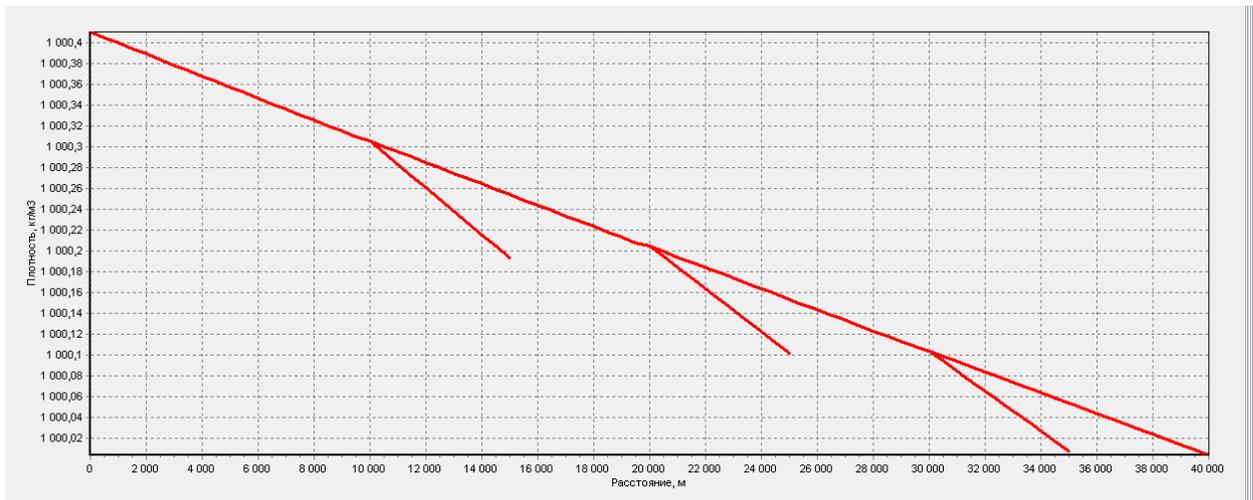


а)

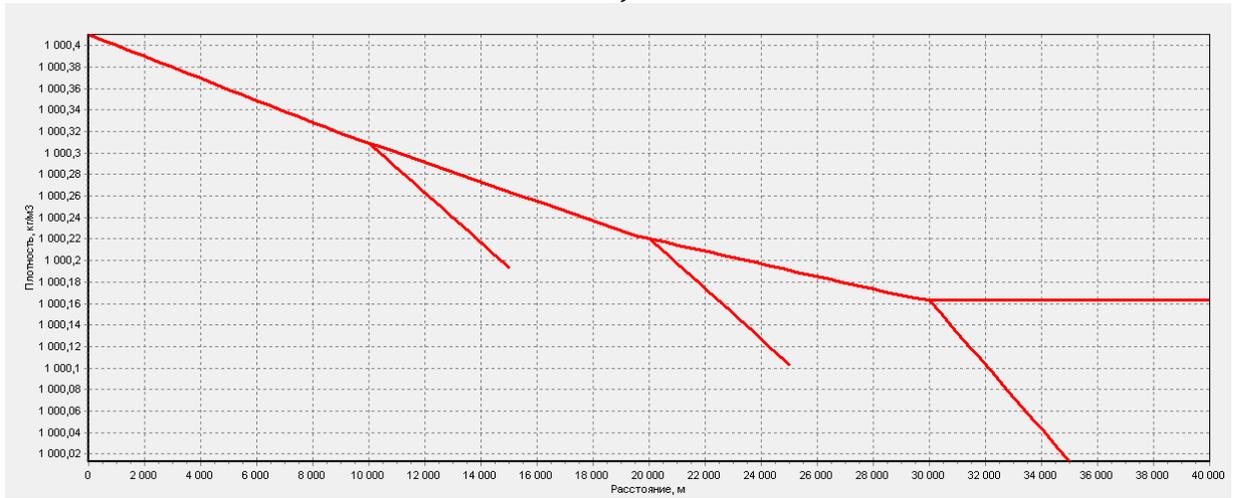


б)

Рис. 8. Начальное (а) и конечное (б) распределения скорости по трассе ветвящегося трубопровода.

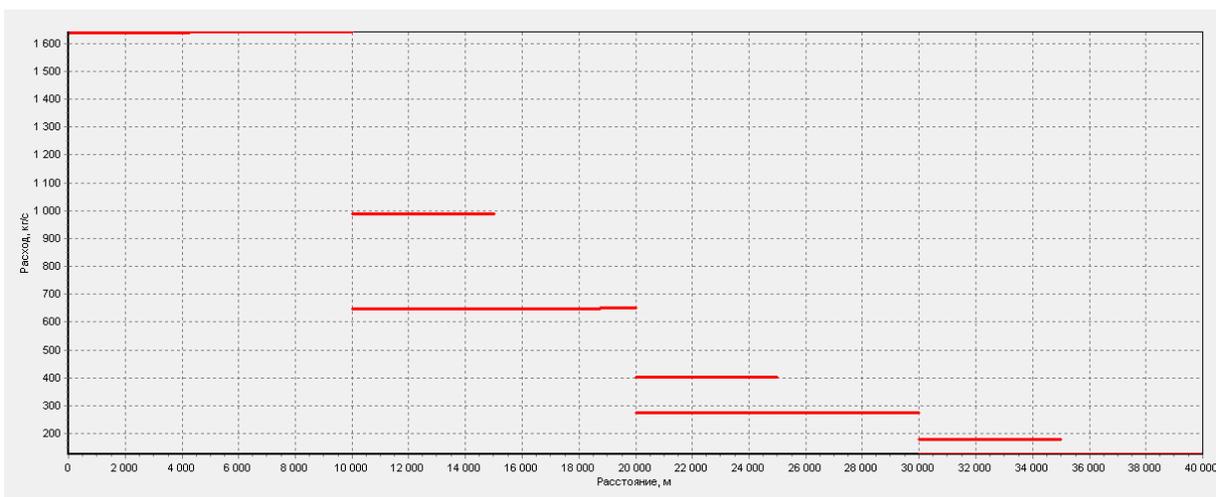


а)

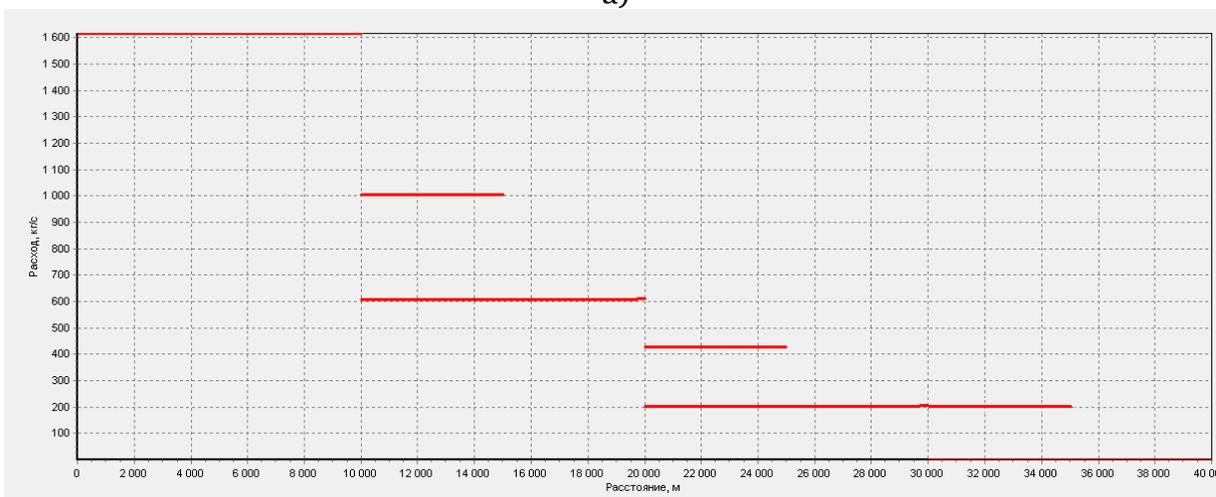


б)

Рис. 9. Начальное (а) и конечное (б) распределения плотности по трассе ветвящегося трубопровода.



а)



б)

Рис. 10. Начальное (а) и конечное (б) распределения расхода по трассе ветвящегося трубопровода.

6. Заключение

В работе предложен подход, позволяющий осуществить визуализацию параметров течения в разветвленных системах. Для этого используются графики с древовидной структурой - одномерные зависимости соответствующих параметров от расстояния, отсчитываемого от начала системы.

Такая визуализация сочетает в себе простоту традиционного отображения функций одной переменной и удобство восприятия этих отображений в приложении к разветвленным системам.

Предложенный подход к визуализации проиллюстрирован примерами из области трубопроводного транспорта (на примере решения задачи о гидроударе в разветвленной системе).

Результаты расчетов с визуализацией в виде древовидной структуры позволяют:

- увидеть распространение волн сжатия/разгрузки по ветвящейся системе, в т.ч. в динамическом виде (режим «видео»);
- наглядно наблюдать разгрузку волн сжатия в местах ветвлений в сопряжённые в месте ветвления трубопроводы и в местах входа/выхода в трубопроводную систему;
- оптимальным образом воспринимать картину взаимодействия циркулирующих волн, в т.ч. волн сжатия.

Последнее особенно важно, поскольку позволяет быстро выяснить причину возникновения зон с высокими максимально достигаемыми давлениями. Предложенная визуализация (особенно

в динамическом режиме «видео») позволяет буквально в реальном времени идентифицировать взаимодействующие волны по месту их возникновения и быстро понять, какие собственно события и с каким сочетанием факторов приводят к возникновению областей высокого давления.

На основе изложенного подхода к моделированию и визуализации течений в разветвленных трубопроводных системах создана среда «ТОКСИ+Гидроудар» для моделирования течений в трубопроводных системах с блоком визуализации, в т.ч. с использованием древовидных графиков.

Таким образом, моделирование течений в трубопроводных системах показывает, что только при визуализации картины распространения волн в трубах возможно непосредственное восприятие картины течения, и наиболее удобно это восприятие происходит при использовании древовидных графиков.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 16-19-00188.

Список литературы

1. Сверчков А.М., Агапов А.А., Сумской С.И., [Егоров А.Ф.](#), Софьин А.С. Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах // [Безопасность труда в промышленности](#), № 9, 2014, С. 50-53.
2. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003.
3. Sumskoi S. I., Sverchkov A. M., Lisanov M. V., Egorov A. F. Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 751, №1, 2016, 012022 (doi:10.1088/1742-6596/751/1/012022) (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/751/1/012022>)
4. Sumskoi S. I., Sverchkov A. M., Lisanov M. V., Egorov A. F. Simulation of systems for shock wave/compression waves damping in technological plants // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 751, №1, 2016, 012023 (doi:10.1088/1742-6596/751/1/012023) (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/751/1/012023>)
5. Sumskoi S. I., Sofin A. S., Lisanov M. V. Developing the model of non-stationary processes of motion and discharge of single- and two-phase medium at emergency releases from pipelines // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 751, №1, 2016, 012025 (doi:10.1088/1742-6596/751/1/012025) (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/751/1/012025>)
6. Миркин А.З., Усиньш В.В. Трубопроводные системы. М: Химия, 1991.
7. Губин С.А., Губина Т.В. Лисанов М.В., Сумской С.И. Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных трубопроводах с помощью метода С.К.Годунова // *Безопасность труда в промышленности*, № 10, 2013, С.66-71.
8. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. Modeling of Non-equilibrium Processes in Oil Trunk Pipeline Using Godunov Type Method // *Physics Procedia*, Vol. 72, 2015, pp. 347–350.
9. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. // *Бюллетени Политехнического общества*, № 5, 1899. (переиздание. Жуковский Н.Е., О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.-Л.: 1949..)
10. Гусейнзаде М.А. Особенности волнового течения в трубах. Гидравлический удар. М.: Нефть и газ, 1999.
11. Гуцин В.В. Авария на трубопроводе № 9 нефтебазы «Шеххарис» АО «Черномортранснефть» // *Безопасность труда в промышленности*, № 1, 1998, С. 8–9.
12. Трубопроводный транспорт нефти. В 2-х тт. Под. ред. Вайнштока С.М. М.: Недра-бизнесцентр, 2002-2004.
13. Арбузов Н.С. Обеспечение технологической безопасности гидравлической системы морских нефтеналивных терминалов в процессе налива судов у причальных сооружений (теория и практика) Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — М.: 2014.

14. Sumskoj S. I., Sverchkov A. M., Lisanov M. V., Egorov A. F. Simulation of compression waves/shock waves propagation in the branched pipeline systems with multi-valve operations // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 751, №1, 2016, 012024 (doi:10.1088/1742-6596/751/1/012024) (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/751/1/012024>)