

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИИ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2019 Issue: 10 Volume: 78

Published: 08.10.2019 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Ismatulla Khujaev

Tashkent University of Information Technologies

Leading researcher,

Scientific and innovation center of Information and communication technologies

Sarvarbek Ahmadjanov

Andijan Machine-Building Institute

Assistant

Mukhiddin Khujaev

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

PhD

Alisher Ismailov

Tashkent Institute of Textile and Light Industry

Teacher

INVESTIGATION OF THE GAS-DYNAMIC STATE OF AN ELEMENTARY SECTION OF THE PIPELINE BASED ON N.E. ZHUKOVSKY EQUATION

Abstract: The process of propagating abrupt changes in mass flow formed by partial or complete overlap of one or two ends of a linear section of a pipeline has been studied in the framework of N.E. Zhukovsky. The pressure drop across the pipe is determined by the resistance force, and the propagation velocity of small pressure perturbations is compiled taking into account the compression coefficient of the liquid, the physical and geometric parameters of the pipe.

From the initial equations, a parabolic equation for mass flow is constructed, which is solved by the Fourier method. The obtained solution was used to solve the system of equations for hydrostatic pressure.

Numerical results are presented that can be interpreted both from the point of view of wave propagation in a compressible and incompressible fluid in a pipeline, and from the point of view of propagation of longitudinal elastic waves in a rod.

Key words: pressure gradient, resistance force, compaction and vacuum waves, separation of variables, wave damping.

Language: Russian

Citation: Khujaev, I., Ahmadjanov, S., Khujaev, M., & Ismailov, A. (2019). Investigation of the gas-dynamic state of an elementary section of the pipeline based on N.E. Zhukovsky equation. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 10 (78), 32-40.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-10-78-5> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.10.78.5>

Scopus ASCC: 2604.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ Н.Е. ЖУКОВСКОГО

Аннотация: Процесс распространения скачкообразных изменений массового расхода, образованных частичным или полным перекрытием одного или двух концов линейного участка трубопровода, изучено в рамках упрощенной модели Н.Е. Жуковского. Перепад давления по трубе обусловлен силой сопротивления, а

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

скорость распространения малых возмущений давления составлено с учетом коэффициента сжатия жидкости, физических и геометрических параметров трубы.

Из исходных уравнений построено параболическое уравнение относительно массового расхода, которое решено методом Фурье. Полученное решение использовано при решении систему уравнений по гидростатическому давлению.

Представлены численные результаты, которые можно трактовать как с точки зрения распространения волн в сжимаемой и несжимаемой жидкости в трубопроводе, так и с точки зрения распространения продольных упругих волн в стержне.

Ключевые слова: градиент давления, сила сопротивления, волны уплотнения и разряжения, метод разделения переменных, гашение волн.

Введение

УДК 622.69+536(075)

Квазиодномерные уравнения трубопроводного транспорта реальных жидкостей построены на основе осреднения показателей транспортируемой среды по площади поперечного сечения трубопровода цилиндрической формы. В работе В.Е. Селезнева и учеников описаны тенденция развития и современное состояние науки о трубопроводном транспорте [1]. На основе анализа многочисленных работ в этой области сохранены импульса и энергии с их силовыми и энергетическими составляющими, а также уравнений сохранения массы с учетом химического состава транспортируемого газа.

Согласно их результатам по транспортировке газа по трубе, уравнение сохранения массы содержит членов со второй степенью неизвестных; уравнение сохранения импульса – членов с третьей степени неизвестных при учете силы трения и конвекции; а уравнение сохранения энергии содержат члены с четвертой степени неизвестных. Замыкающие соотношения в виде уравнений состояния газа и уравнение Редлиха-Квонга (для определения коэффициента сверхсжимаемости газа) также содержат членов с третьей степенью.

В квазиодномерных уравнениях трубопроводного транспорта степени неизвестных уменьшается, в частности кубическое уравнение относительно коэффициента сверхсжимаемости выпадает.

Внутренняя структура уравнений терпит значительные изменения при учете топологии газопровода [2,3], двухфазности потока с изменением агрегатного состава [4-6], привлечения уравнений турбулентности потока в различных модификациях [7], существенного изменения температуры транспортируемой среда [3], переходных процессов [8], утечки [9-11] и других уточняющих факторов [12].

Привлечение квазиодномерных уравнений трубопроводного транспорта с учетом реальных внешних факторов, также как учет характеристик функция компрессорных станций [13], теплообмена с окружающей средой [14],

закольцованность сети [15] и другие также приводят к усложненному решаемых задач.

Результаты перечисленных выше и многочисленных других работ получены численными методами и с привлечением современных информационно-коммуникационных систем. Тем не менее, практический интерес представляют также работы, которые относятся к переходным процессам в сети трубопроводов.

Переходные процессы в трубопроводах образуются при пуске и остановке нагнетателя или нагнетателей, при подключении или отключении потребителя, при изменении объема подкачиваемого или отбираемого газа или жидкости. Именно в переходных процессах проявляются сильные и слабые стороны проектируемой и действующей сети трубопроводов, особенно с точки зрения их надежности.

Для решения задач о переходных процессах разработаны различные численные и аналитические способы решения [1]. Аналитические способы решения нестационарных задач строятся с применением функциональных рядов, где в качестве амплитуд колебаний вступают периодические и аperiodические функции, выражающиеся в виде синусоидальных и экспоненциальных зависимостей. В рассматриваемой ниже задаче они выражены в виде экспоненциальных зависимостей в составе функциональных рядов, что соответствует гасящимся возмущениям показателей по времени и расстоянию за счет диссипации энергии.

Задача относится к элементарному участку горизонтального газопровода и решена методов разделения переменных. Представлены отдельные численные результаты расчетов, проведенных по полученному аналитическому решению.

Постановка задачи. Динамические изменения гидростатического давления p и массового расхода $M = \rho wf$ в элементарном участке горизонтального газопровода с длиной l

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 0.126
 ESJI (KZ) = 8.716
 SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

описывали урезанными квазиодномерными уравнениями Н.Е. Жуковского [1,16]:

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

Здесь $2a = \lambda w_*/(2D)$ – параметр силы сопротивления в формуле Дарси-Вейсбаха; λ – коэффициент сопротивления; ρ – плотность жидкости; w – средняя скорость в сечении x ; w_* – характерная скорость потока (параметр линеаризации); $Df = \pi D^2/4$ – диаметр и площадь поперечного сечения трубопровода; c – скорость малых возмущений давления в системе среда-труба принимали в виде $c = \left(\frac{\rho_0}{k_{ж}} + \frac{2R_0\rho_0}{E\delta}\right)^{-1/2}$ [17],

где ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости; E – модуль упругости материала трубы; $k_{ж}$ – коэффициент сжимаемости среды; R_0 – внутренний радиус трубы в невозмущенном состоянии; δ – толщина стенки круглой трубы.

Рассматривается действующий с постоянным массовым расходом в начале процесса трубопровод:

$$M(x, 0) = M_0 = -\frac{f}{2a} \frac{p_K - p_H}{l} = const, \quad (2)$$

где l – длина участка; p_H, p_K – значения гидростатического давления на входе и выходе участка до начала изменений.

Начальное распределение давления – линейное:

$$p(x, 0) = p_H + \frac{x}{l}(p_K - p_H). \quad (3)$$

С момента времени $t = 0$ на входе и на выходе установился массовый расход

$$\begin{aligned} M(0, t) &= M_H = const, \\ M(l, t) &= M_K = const, \end{aligned} \quad (4)$$

где M_H и M_K могут принимать нулевые значения, их значения могут быть равными M_0 или же различаться от него. В целом, ожидаются скачкообразные изменения массового расхода на входе и выходе участка.

Решение задачи. Непосредственное решение задачи по методу разделения переменных относительно гидростатического давления, как показала практика, приводит к собственным функциям $X_n(x) = \cos \lambda_n x$ [17]. В результате этого при реализации начальных условий теряется постоянная, а возможно даже переменная составляющая в выражении давления и не исключается возможность получения отрицательного решения. В связи с этим задачу решаем сначала по массовому расходу, и этим решением пользуемся для решения задачи относительно давления.

Из системы (1) исключим давление и составим уравнение:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{c^2}{2a} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Пришли к параболическому уравнению, крайевые условия которого заданы выше. Граничные условия (4) приведем к однородному

виду, для чего вводим новую искомую функцию $u(x, t)$ по зависимости:

$$M(x, t) = M_H + (M_K - M_H) \frac{x}{l} + u(x, t). \quad (6)$$

Не трудно убедиться, что при этом граничные условия (4) приобретают однородный вид:

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Вид уравнения остается прежним:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{c^2}{2a} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Согласно замене начальное условие (3) приобретает вид:

$$u(x, 0) = M_0 - M_H - (M_K - M_H) \frac{x}{l}. \quad (9)$$

Для решения задачи (7)-(9) применяем метод Фурье [17].

Решение ищется в виде

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(t) \sin \lambda_n x,$$

где $\lambda_n = \frac{\pi n}{l}$.

Подстановка данного решения к уравнению (8) приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$Y_n'(t) = -\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} Y_n(t).$$

Общее решение данного уравнения составляет

$$Y_n(t) = a_n \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right).$$

В связи с этим решение для $u(x, t)$ составляет

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \sin \frac{\pi n x}{l}.$$

Начальное условие (3) для новой искомой функции будет иметь вид:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{\pi n x}{l} = M_0 - M_H - \frac{x}{l}(M_K - M_H).$$

Чтобы найти значения a_n пользуемся ортогональностью собственных функций $X_n(x) = \sin \frac{\pi n x}{l}$ с квадратом нормы $l/2$. При этом получим уравнение

$$\begin{aligned} a_n \frac{l}{2} &= (M_0 - M_H) \int_0^l \sin \frac{\pi n \xi}{l} d\xi - \\ &- \frac{M_K - M_H}{l} \int_0^l \xi \sin \frac{\pi n \xi}{l} d\xi. \end{aligned}$$

С учетом значений интегралов

$$\begin{aligned} \int_0^l \sin \frac{\pi n \xi}{l} d\xi &= -\frac{1}{\pi n} [(-1)^n - 1], \\ \int_0^l \xi \sin \frac{\pi n \xi}{l} d\xi &= -(-1)^n \frac{l^2}{\pi n} \end{aligned}$$

находим

$$a_n = \frac{2}{\pi n} \{ [(-1)^n - 1](M_0 - M_H) - (-1)^n (M_K - M_H) \}.$$

Подстановка полученного выражения $u(x, t)$ в (6) дает

$$\begin{aligned} M(x, t) &= M_H + (M_K - M_H) \frac{x}{l} + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \sin \frac{\pi n x}{l}. \end{aligned} \quad (10)$$

Можно убедиться, что данное решение удовлетворяет граничным условиям и уравнению,

а при $t = 0$ в правой части равенства образуется сумма, значение которой равно M_0 . Соответственно, решение – верное.

Если исключим из системы (1) массовый расход, то получим аналогичное (5) уравнение относительно давления. Граничные условия для него, вытекающие из первого уравнения системы (1) и условий (4), будут второго рода: $\frac{\partial p(0,t)}{\partial x} = -\frac{2a}{f}M_H$, $\frac{\partial p(l,t)}{\partial x} = -\frac{2a}{f}M_K$. Как отметили выше, применение метода разделения переменных приводит к потере постоянных составляющих решения. Поэтому при решении задачи относительно давления пользуемся решением (10), начальным распределением (3) и вторым уравнением системы (1).

При известном решении $M(x,t)$ из второго уравнения системы (1) находим $\frac{\partial p}{\partial t}$ и интегрируем обеих сторон полученного равенства по времени:

$$\begin{aligned} p(x,t) - p(x,0) &= -\frac{c^2}{f} \int_0^t \frac{\partial M(x,\eta)}{\partial x} d\eta = \\ &= -\frac{c^2}{f} \int_0^t \left[\frac{M_K - M_H}{l} + \right. \\ &+ \left. \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{\pi n}{l} \cos \frac{\pi n x}{l} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} \eta\right) \right] d\eta = \\ &= \frac{c^2}{f} \frac{M_K - M_H}{l} t + \\ &+ \frac{2a}{f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n l}{\pi n} \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) - 1 \right] \cos \frac{\pi n x}{l}. \end{aligned}$$

Тогда, с учетом выражения (3) для начального распределения давления, получим

$$\begin{aligned} p(x,t) &= p_H + \frac{x}{l}(p_K - p_H) - \frac{c^2}{f} \frac{M_K - M_H}{l} t + \\ &+ \frac{2a}{f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n l}{\pi n} \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) - 1 \right] \cos \frac{\pi n x}{l} \\ \text{или} \\ p(x,t) &= p_H + \frac{x}{l}(p_K - p_H) - \frac{c^2}{f} \frac{M_K - M_H}{l} t - \\ &- \frac{2a}{f} \left(M_H x + \frac{M_K - M_H}{2l} x^2 \right) + \\ &+ \frac{2a}{f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n l}{\pi n} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \cos \frac{\pi n x}{l}. \quad (11) \end{aligned}$$

Последний вид удобен для проверки достоверности решения.

Уравнение (5) удовлетворено однозначно.

Начальное условие (3) приводит к равенству

$$\begin{aligned} M_H x + \frac{M_K - M_H}{2l} x^2 \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n l}{\pi n} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \cos \frac{\pi n x}{l}. \end{aligned}$$

Разложив левую часть равенства по собственным функциям $\cos \frac{\pi n x}{l}$ [17] и учитывая значения интегралов $\int_0^l x \cos \frac{\pi n x}{l} dx = [(-1)^n -$

$$1] \frac{l^2}{\pi^2 n^2}, \int_0^l x^2 \cos \frac{\pi n x}{l} dx = (-1)^n \frac{2l^3}{\pi^2 n^2}, \text{ убедимся, что равенство верное.}$$

Граничные условия (4) удовлетворены в силу равенства $\sin \frac{\pi n x}{l} = 0$ при $x = 0$ и $x = l$.

Обсуждение полученного решения (10) и (11). Значение параметра $2a$ в квазиодномерном уравнении сохранения импульса принимали постоянное. Это соответствует развитому режиму обтекания шероховатости трубы (квадратичный закон сопротивления), если приняли $w_* = const$. Это – осреднение И.А. Чарного [16]. Т.е. при квадратичном законе сопротивления получено аналитическое решение задачи с линеаризацией уравнения сохранения импульса.

Решение (10), (11) верно также для ламинарного режима течения в трубопроводе, когда $\lambda \sim 1/Re$. В этом случае оно будет точное.

В ходе постановки и решения задачи не остановились на плотности среды, а пользовались массовым расходом среды $M = \rho w f$.

Для малосжимаемой среды, когда сжимаемость проявляется только под воздействием волны импульса, можно принять $\rho \approx const$. Тогда средняя по поперечному сечению трубопровода скорость потока определяется в виде

$$w(x,t) = \frac{1}{\rho f} M(x,t).$$

Если же среда сверхсжимаемая и отклонение от закона идеального газа составляет Z раз, то состояние газа описывается уравнением [1]

$$p = Z \rho R T,$$

где Z – коэффициент сверхсжимаемости газа; R, T – приведенная газовая постоянная и температура газа. При этом выражение массового расхода становится нелинейное, т.к. в нем плотность газа будут переменной. В связи с этим для определения скорости газа используются формулой:

$$w(x,t) = \frac{ZRT}{f} \frac{M(x,t)}{p(x,t)},$$

где использованы осредненные или точные значения Z, R, T и f .

Таким образом, полученное решение (10), (11) задачи отражает точное решение задачи в ламинарном режиме течения и решение линеаризованных уравнений – в развитом турбулентном режиме течения малосжимаемых и сверхсжимаемых сред.

Результаты вычислительного эксперимента. На основе представленного аналитического решения составлена программа в среде Паскаль ABC и проведен вычислительный эксперимент. При расчетах использованы данные из [18-19].

При расчетах учитывали первые 200 членов функциональных рядов. Скорость распространения малых возмущений давления составила 400 м/с, приведенная газовая

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

постоянная транспортируемого газа – 528 Дж К⁻¹ кг⁻¹, диаметр – 992 мм. Расчеты проводили для различных значений входного давления, начального, граничных массового расхода и длины участка.

Представим результаты, полученные при мгновенном перекрытии выходного сечения участка при $2a=0.46373$ с⁻¹. Расчеты проводили для $l=0.5, 2.0, 5.0$ и 10 км.

На рис. 1 приведены путевые изменения массового расхода при значениях времени $t=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ и 15 секунды. При $l=2.0$ км, $Z=0.92$ и $M_{00}=250$ кг/с. Кривые расположены сверху вниз. При $t=15$ сек поток практически установился: массовый расход от M_{00} до $M_k=0$ кг/сек падает линейно.

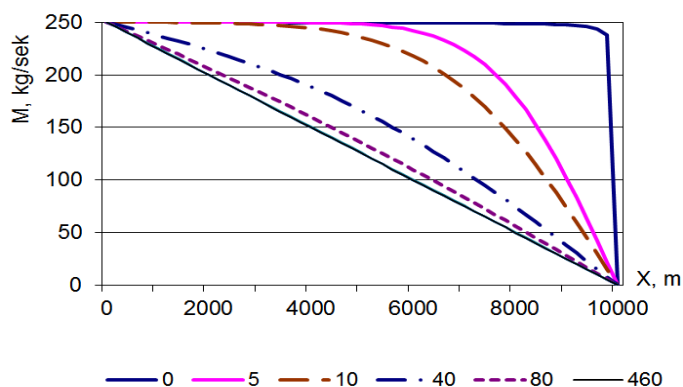


Рис. 1. Изменение массового расхода по длине участка $l=2.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с

Для остальных вариантов расчета наблюдается аналогичная картина кривых массового расхода.

С истечением времени, за счет продолжительного поступления газа, давление в расчетной отрасли растет (рис. 2). В данном случае входное давление $p_n=5.0$ МПа увеличивается до 8.20 МПа.

На рис. 3 представлены кривые скорости, которые получены для различных моментов

времени. Верхняя кривая соответствует к началу переходного процесса, когда входное сечение перекрыли мгновенно. Эта кривая скорости растет сначала, а в конце участка убывает до $w=0$ м/с. Начальный участок возрастания скорости обусловлено путевым убыванием давления, а конечный участок – мгновенным торможением газа.

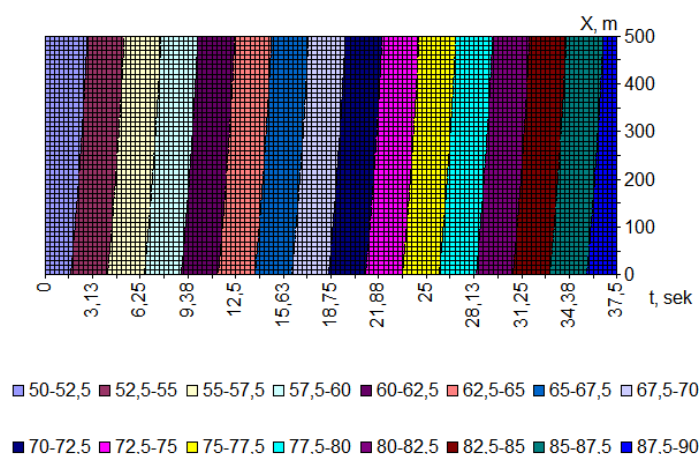


Рис. 2. Распределения гидростатического давления (в 0.1 МПа) по длине участка $l=2.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с, $p_n=5.0$ МПа

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

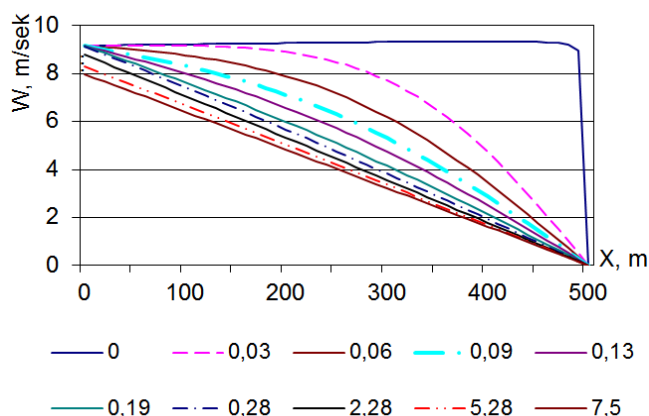


Рис. 3. Изменение средней скорости потока по длине участка $l=2.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с, $p_n=5.0$ МПа

В дальнейшем графики скорости постепенно переходят к форме прямой линии и, начиная $t=200$ сек левый конец графика начинает спускаться. При $t=120$ сек входная скорость уменьшалась до 5.8 м/с.

С увеличением длины участка скорость увеличения и интервал изменения давления в участке падает (рис. 4). Это обусловлено увеличением физического объема газа.

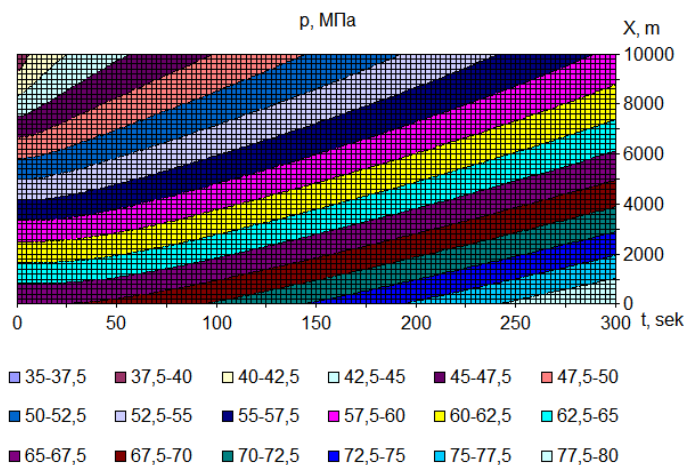


Рис. 4. Распределения гидростатического давления (в 0.1 МПа) по длине участка $l=10.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с, $p_n=5.0$ МПа

В связи с этим убывание входной скорости начинается позже, чем при $l=2$ км (рис. 5). При увеличении длины участка в начальном распространении скорости (верхняя кривая рис. 5) становится заметным влияние большого перепада давления в участке.

На рис. 6 представлены результаты по гидростатическому давлению при $l=40$ км, $p_n=11.0$ МПа, $p_k=5$ МПа. Данный рисунок демонстрирует, что при более высоких входных давлениях изменение давления проходит плавно.

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

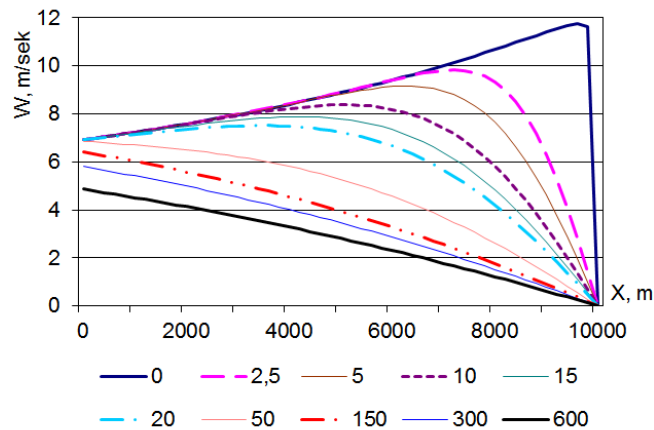


Рис. 5. Изменение средней скорости потока по длине участка $l=10.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с, $p_n=5.0$ МПа

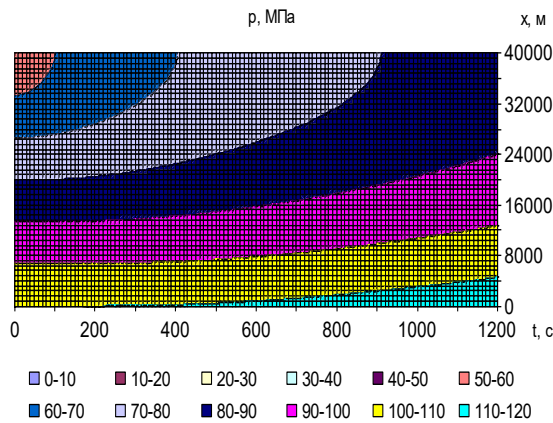


Рис. 6. Изменение гидростатического давления (в 0.1 МПа) по длине участка $l=40.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с, $p_n=11.0$ МПа

Изменения скорости потока по времени и длине участка для этого случая представлены на рис. 7.

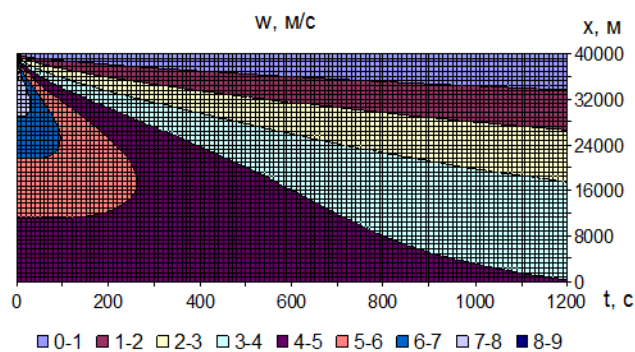


Рис. 7. Изменение средней скорости потока по длине участка $l=40.0$ км при $M_{00}=250$ кг/с, $p_n=11.0$ МПа

По представленному материалу сделаны следующие **выводы**.

В рамках приближения «длинных» трубопроводов сформулирована и аналитически решена задача о мгновенном изменении массового расхода газа в концах действующего участка

магистрального газопровода. В этом приближении градиент давления формируется согласно квадратичному закону сопротивления.

Из уравнений сохранения импульса и массы составлено параболическое уравнение относительно массового расхода газа, которое

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

решено методом разделения переменных. Интегрированием исходных уравнений с привлечением известного решения по массовому расходу получено решение задачи относительно гидростатического давления.

Проведена оценка точности решения для ламинарных и турбулентных режимов течения малосжимаемой жидкости и сверхсжимаемого газа.

Представлены материалы численных расчетов для мгновенного перекрытия выходного сечения работающего элементарного участка газопровода с разной длиной.

Выявлено, что в предельном режиме массовый расход в участке падает линейным законом. Увеличение значения давления в участке прямо пропорционально входному массовому

расходу и обратно пропорционально физическому объему элементарного участка.

Начальное распределение скорости потока увеличивается обратно пропорционально значению давления. В начальной стадии процесса максимум кривой скорости убывает, а кривая скорости стремится к форме отрезка прямой линии. Далее происходит уменьшение значения скорости во входном сечении.

Сравнения полученных результатов с результатами подхода «коротких» трубопроводов, когда перепад давления обусловлен только изменением локальной составляющей силы инерции, показали, что игнорирование силы инерции газа приводит к быстрому гашению скачков импульса в газопроводе.

References:

1. Seleznev, V.E., & Aleshin, T.E. (2007). *DEUM LAUDAMUS TE: Pryalov Inter Aquilonem et Eurum Mathematica autem modeling pipeline et retiacula Canalis systems. Modi, exempla monstrabit, algorithms*. In V.E.Selezneva (Eds.). (DCXCV p.). Moscow: Maks Press.
2. Bermúdez, A., González-Díaz, J., & González-Diéguez, F. (2017). Existence of solution to a model for gas transportation networks on non-flat topography. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, Vol. 37, pp.71-93. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2017.02.003>
3. Bermúdez, A., López, X., & Vázquez-Cendón, M.E. (2017). Treating network junctions in finite volume solution of transient gas flow models. *Journal of Computational Physics*, Vol. 344, pp.187-209. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.04.066>
4. Figueiredo, A.B., et al. (2017). Numerical simulation of stratified-pattern two-phase flow in gas pipelines using a two-fluid model. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 88, pp.30-49. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.016>
5. He, G., et al. (2017). Numerical simulation of vapor condensation in gas-water stratified wavy pipe flow with varying interface location. *International Journal of Heat & Mass Transfer. Dec2017 Part B*, Vol. 115, pp.635-651. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.069
6. Shin, Ch. (2013). A numerical study on the characteristics of transient flow in a pressure regulator resulting from closure of the pressure control valve. *Journal of Mechanical Science & Technology. Feb2013, Vol. 27 Issue 2*, pp.443-449. doi: 10.1007/s12206-012-1257-y
7. Loyseau, X.F., Verdin, P.G., & Brown, L.D. (2018). Scale-up and turbulence modelling in pipes. *Journal of Petroleum Science & Engineering. Mar2018, Vol. 162*, pp.1-11. doi <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.019>
8. Hafsia, Z., Elaouda, S., & Mishra, M. (2019). A computational modelling of natural gas flow in looped network: Effect of upstream hydrogen injection on the structural integrity of gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering Volume 64, April 2019*, Pages 107-117. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.01.021>
9. Yang, J., et al. (2017). Numerical Simulation of Sudden Gas Pipeline Leakage in Urban Block. *Energy Procedia Volume 105*, Pages 4921-4926. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1049>
10. Demirci, H.E., et al. (2018). Experimental and numerical modelling of buried pipelines crossing reverse faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 114, November 2018*, Pages 198-214. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.06.013>
11. Rui, Z., et al. (2017). A new model to evaluate two leak points in a gas pipeline. *Journal of*

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PИИИ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

- Natural Gas Science and Engineering Volume 46, October 2017, Pages 491-497.*
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.08.025>
12. Banda, M.K., Herty, M., & Klar, A. (n.d.). Gas flow in pipeline networks. *Netw. Heterog. Media. Volume 1, Issue 1, Pages 41-56.*
<https://bit.ly/2vKgGBQ>
 13. Woldeyohannesa, A.D., & AbdMajid, M.A. (2011). Simulation model for natural gas transmission pipeline network system. *Simulation Modelling Practice and Theory Volume 19, Issue 1, January 2011, Pages 196-212.*
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.06.006>
 14. Dong, H. (2019). *Numerical study on the thermal characteristics and its influence factors of crude oil pipeline after restart.* Case Studies in Thermal Engineering Available online 26 April 2019, 100455.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100455>
 15. Hafsia, Z., Mishra, M., & Elaouda, S. (2018). Hydrogen embrittlement of steel pipelines during transients. *Procedia Structural Integrity Volume 13, 2018, Pages 210-217.*
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.035>
 16. (n.d.). *IA Omnium Charny Instabilem motum de ipsa liquorem desudant in proferatis.* Ed. 2. (MCMLXXV). Moscow: Nedra.
 17. Budak, M. (1972). *Samara Rom Tikhonov Mathematical problems in Physics.* (DCLXXVIII p.). Moscow: Nauka.
 18. Korotayev, Y. P. (1997). *confracto, intellegentia artificialis Shirkovsky Mining, onerariis repono, et sub terra.* (CDLXXXVII p.). Moscow: Nedra.
 19. (1978). *XIX Pipeline translationem et olei, et gas.* Societas Pod. Ed. V.A.Yufina (Eds.). (CDVII p.). Moscow: Nedra.