

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИИ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

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: 2017 Issue: 09 Volume: 53

Published: 30.09.2017 <http://T-Science.org>

Ismatulla Qushayevich Khujaev

Leading researcher, Scientific and innovation center of information and communication technologies at Tashkent university of information technologies

Husniddin Abdijalilovich Mamadaliev

Junior researcher, Scientific and innovation center of information and communication technologies at Tashkent university of information technologies

Shukhratjon Komiljanovich Boltibaev

Junior researcher, Scientific and innovation center of information and communication technologies at Tashkent university of information technologies

SECTION 2. Applied mathematics. Mathematical modeling.

DISTRIBUTION OF WAVE SPREAD WAVE PERTURBANCES IN HORIZONTAL GAS PIPELINE UNDER THE INFLUENCE OF FRACTION AND INERTIA FACILITIES

Abstract: Based on the linearized equations of pipeline transportation of supercompressible media with allowance for inertia and friction forces, an analytical solution is obtained for the propagation of condensation and gas waves formed by the instant closure of the ends of the horizontal section of the gas pipeline. The results of computer calculations are discussed for cases of closure of the ends of the section by the dynamics of static pressure, mass flow and average gas velocity. It was found that high voltages are formed at the ends of the elementary region.

Key words: gas pipeline, gas transportation, wave propagation of flow velocity, transport process simulation, pressure change and mass gas flow.

Language: Russian

Citation: Khujaev IQ, Mamadaliev HA, Boltibaev SK (2017) DISTRIBUTION OF WAVE SPREAD WAVE PERTURBANCES IN HORIZONTAL GAS PIPELINE UNDER THE INFLUENCE OF FRACTION AND INERTIA FACILITIES. ISJ Theoretical & Applied Science, 09 (53): 155-163.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-09-53-24> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2017.09.53.24>

УДК 519.614: 622.692.4

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛ ТРЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

Аннотация: На основе линеаризованных уравнений трубопроводной транспортировки сверхсжимаемых сред с учетом сил инерции и трения получено аналитическое решение задачи о распространении волн уплотнения и разряжения газа, образованные мгновенным закрытием концов горизонтального участка газопровода. Обсуждены результаты расчетов на ЭВМ для случаев закрытия концов участка по динамике статического давления, массового расхода и средней скорости газа. Выявлено, что высокие напряжения образуются в концах элементарного участка.

Ключевые слова: газопровод, транспортировка газа, распространение волн скорости потока, моделирования процесса транспортировка, изменение давление и массовой расход газа.

Введение

Скачкообразные изменения статического давления и массового расхода газа приводят к образованию и распространения волн возмущения в сети трубопроводов. Сжимаемость газа, упругие свойства стенки трубопровода и силы трения способствуют гашению этих волн. Тем не менее, многократные воздействия

высокого давления на определенных участках сети приводит концентрации напряжения в трубопроводе и его арматуры, что может привести к утечке газа. А утечка газа является нежелательным явлением в работе трубопроводной сети. Потеря ценного сырья – газа сама по себе нежелательно. Но

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

накопившийся газ может создать взрыво- и пожароопасную ситуацию. В этом случае опасность уже не носит технологический, а социальный характер. В связи с этим изучение образования, распространения и отражения волн уплотнения и разряжения газа в газопроводах, особенно в магистральных газопроводах, является актуальной проблемой.

Физическая постановка задачи.

Рассматривается элементарный горизонтальный участок газопровода, который имеет длину l , внутренний диаметр D , коэффициент сопротивления λ и скорость распространения малых возмущений давления c . До момента времени $t=0$ участок функционировал в стационарном режиме с массовым расходом M_0 . Начиная с момента $t=0$ на входе в участок установился расход M_H , а на выходе из участка – M_K . Статическое давление на входе в участок имело значение p_{00} .

Требуется изучить газодинамическое состояние участка после скачкообразного изменения расхода в концах участка. Т. о., в данной работе рассматривается задача о переходе из одного стационарного режима функционирования участка на другой стационарный режим, обусловленный скачкообразным изменением массового расхода в концах элементарного участка трубопровода.

Математическая модель задачи составлена с учетом силы трения и локальной составляющей силы инерции газа. При этом газодинамическое состояние элементарного горизонтального участка газопровода описывается системой квазиодномерных уравнений Н.Е.Жуковского [1-3]

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\lambda w^2}{2D} \rho + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t}, \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $p(x,t)$, $\rho(x,t)$, $w(x,t)$ – средние в сечении x значения статического давления, плотности и скорости газа в момент времени t ;

λ – коэффициент сопротивления трения; D – диаметр трубопровода; c – скорость распространения малых возмущений давления в системе труба-газ.

Система (1) замыкается уравнением состояния реального газа

$$p = Z\rho RT. \quad (2)$$

Здесь Z – коэффициент сверхсжимаемости газа; R – приведенная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа по шкале Кельвина. В рамках работы эти три параметра имеют постоянные значения.

Система уравнений (1)-(2) линеаризуется введением массового расхода газа $M = \rho w F$, где $F = \pi D^2 / 4$ – площадь поперечного сечения трубы, и использованием осреднения И.А.Чарного $\rho w^2 \approx w_* \rho w$, где w_* – характерная, постоянная скорость для данной задачи [1]. Из вновь образованной системы уравнений можно составить урезанное телеграфное уравнение относительно массового расхода газа

$$\frac{\partial^2 M}{\partial \tau^2} + b \frac{\partial M}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где $\tau = ct$, $b = \lambda w_* / (2Dc)$. Такое же уравнение получается, если в качестве искомой принять статическое давление p газа.

Начальными условиями задачи будут служить

$$M(x, 0) = M_0 = const, \quad \frac{\partial M(x, 0)}{\partial \tau} = 0 \quad \text{при}$$

$$0 \leq x \leq l, \quad \tau < 0,$$

а граничными условиями –

$$M(0, \tau) = M_H = const, \quad M(l, \tau) = M_K = const \quad \text{при} \\ \tau \geq 0.$$

Если $M_H = M_K$, то задача рассматривается для произвольного «времени» $\tau \geq 0$, иначе, по физическим соображениям, для ограниченного отрезка времени.

Аналитическое решение задачи относительно массового расхода газа, полученное методом Фурье [5], имеет вид

$$M(x, t) = M_H + \frac{x}{l} (M_K - M_H) + \\ + e^{-b\tau/2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} \left(a_n \operatorname{sh} \frac{\sqrt{D_n}}{2} \tau + b_n \operatorname{ch} \frac{\sqrt{D_n}}{2} \tau \right) \text{ при } D_n > 0 \\ (a_n \tau + b_n) \text{ при } D_n = 0 \\ \left(a_n \sin \frac{\sqrt{|D_n|}}{2} \tau + b_n \cos \frac{\sqrt{|D_n|}}{2} \tau \right) \text{ при } D_n < 0 \end{array} \right) \sin \frac{\pi n x}{l}.$$

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

Здесь $D_n = b^2 - 4\pi^2 n^2 / l^2$ – значение дискриминанта характеристического уравнения, получаемого из уравнения (3).

Коэффициенты разложения определены в виде

$$b_n = \frac{2}{\pi n} \left((-1)^n (M_K - M_0) - M_H + M_0 \right),$$

$$a_n = \frac{b}{2f_n} b_n, \quad f_n = \begin{cases} \sqrt{D_n}/2, & \text{при } D_n > 0, \\ 1, & \text{при } D_n = 0, \\ \sqrt{|D_n|}/2, & \text{при } D_n < 0. \end{cases}$$

$$\int_0^\tau T_n(\xi) d\xi = \frac{a_n + b_n}{\sqrt{D_n} - b} \left(e^{\frac{-b + \sqrt{D_n}}{2} \tau} - 1 \right) + \frac{a_n - b_n}{\sqrt{D_n} + b} \left(e^{\frac{-b - \sqrt{D_n}}{2} \tau} - 1 \right),$$

$$\int_0^\tau T_n(\xi) d\xi = \frac{2a_n}{b^2} (2 - (b\tau + 2)e^{-b\tau/2}) + \frac{2b_n}{b} (1 - e^{-b\tau/2}),$$

$$\int_0^\tau T_n(\xi) d\xi = \frac{l^2}{2\pi^2 n^2} \left[\left(\sqrt{|D_n|} b_n - a_n b \right) e^{-b\tau/2} \sin \frac{\sqrt{|D_n|} \tau}{2} + \left(\sqrt{|D_n|} a_n - b_n b \right) \left(1 - e^{-b\tau/2} \cos \frac{\sqrt{|D_n|} \tau}{2} \right) \right].$$

в соответствии условиям $D_n > 0$, $D_n = 0$ и $D_n < 0$.

Полученное решение отличается от решения И.А.Чарного [1] тем, что в данном случае дополнительно рассматриваются случаи $D_n = 0$ и $D_n < 0$.

Вычислительный эксперимент.

Полученное решение реализовали в виде программного продукта. Рассматривались случаи скачкообразных изменений массового расхода в конечных сечениях элементарного участка горизонтального магистрального газопровода.

В качестве исходных данных принимали: $D = 1.020$ м; входное и начальное давление составляли 5.0 – 7.0 МПа, массовый расход –

Относительно статического давления решение задачи составило

$$p(x, \tau) = p(0, 0) - \frac{\lambda w_*}{2DF} M_0 x - \frac{c(M_K - M_H) \tau}{Fl} - \frac{\pi c(M_* - M_0)}{Fl} \sum_{n=1}^{\infty} n \cos \frac{\pi n x}{l} \int_0^\tau T_n(\xi) d\xi.$$

Здесь $M_* = \rho w_* F = const$. Значения интеграла составили:

100..400 кг/с, $R=485$ Дж/кг/К, $\lambda = 0.01 = const$, $c=400$ м/с, $l = 20$ км.

Для исключения осцилляций вблизи скачкообразных изменений параметров на графиках число членов разложения пришлось довести до 400.

Сначала рассмотрим вариант закрытия выходного сечения участка, работающего в стационарном режиме.

На рис. 1 представлены результаты расчета по изменению массового расхода в участке при различных значениях «времени» τ . Длина участка – 20 км, начальный и входной расходы газа составляют 400 кг/с

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

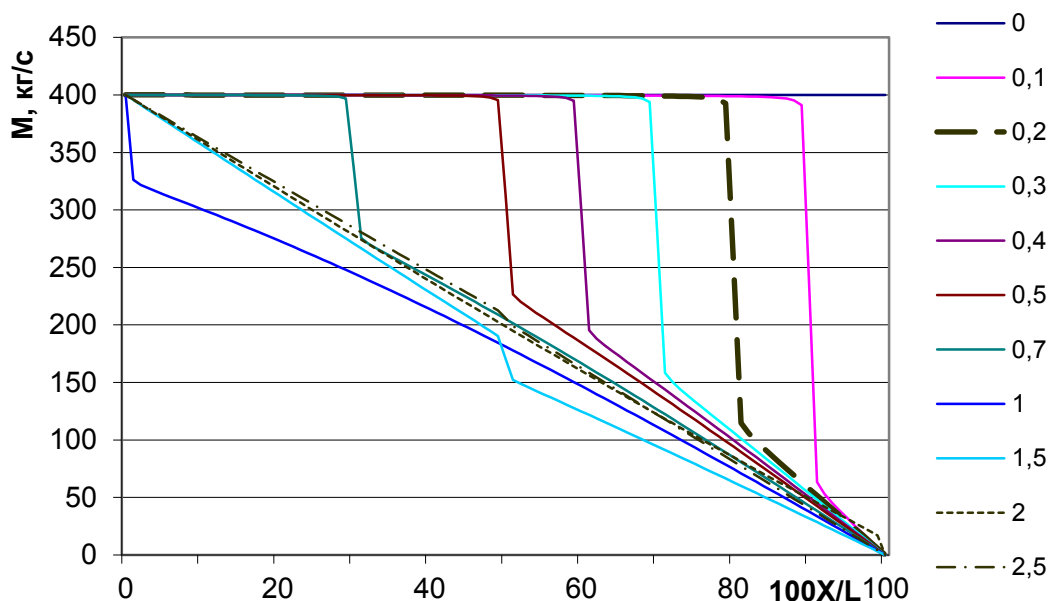


Рисунок 1 - Изменение массового расхода газа при закрытии выходного сечения участка.
 $M_0=M_H=400$ кг/с.

Начальный момент времени массовый расход имеет одинаковое значение. Торможение газа в конце участка приводит к убыванию размера участка с постоянным значением массового расхода с конца участка.

Начальный момент времени – до достижения $t = t_* = l/c$, кривую массового расхода можно разделить на три части. С конца участка массовый расход от нуля возрастает до определенного значения практически линейным образом. Потом наступит второй участок скачка – резкое возрастание до исходного значения массового расхода. Этот участок соответствует точке, куда добралась волна массового расхода. Третий участок – с постоянным исходным

значением массового расхода. Первый с конца участок имеет возрастающий угол наклона от положительного направления оси абсцисс.

После достижения времени $t = t_*$ кривые массового расхода преобразуются: они проходят ниже, чем предельного состояния массового расхода газа. Составляющие из трех участков остается в силе. Далее переходит на предельный режим с линейным падением массового расхода по длине всего участка.

На рис. 2 приведены графики изменения давления газа по длине рассматриваемого участка, когда входное давление составляло $p_{00} = 5.0$ МПа.

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

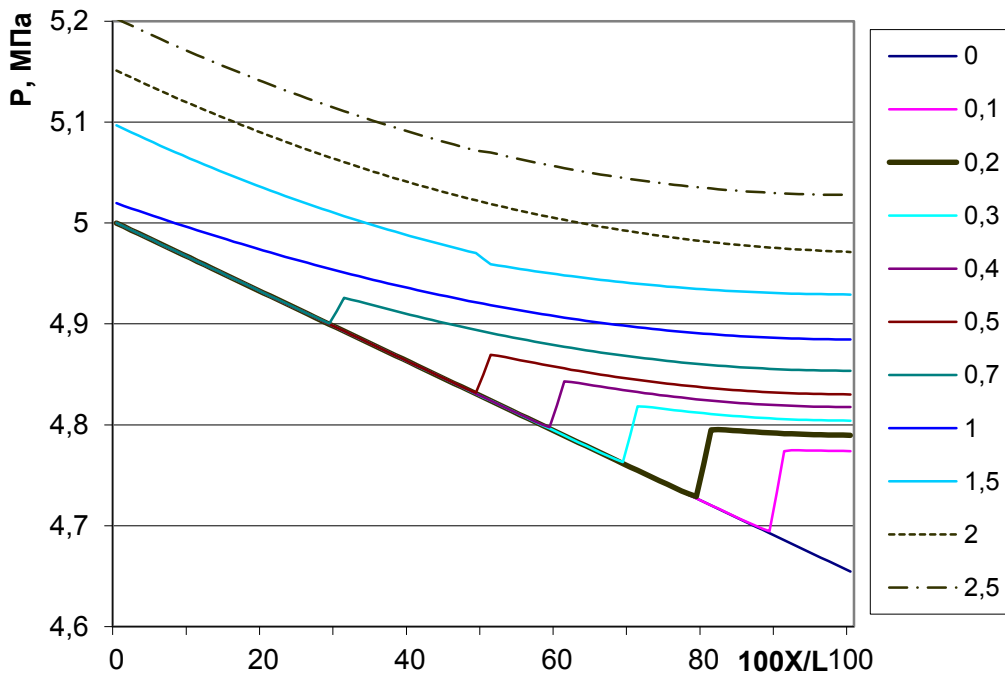


Рисунок 2 - Изменение давления газа при закрытии выходного сечения участка.
 $M_0=M_H=400$ кг/с, $p_{00}=5.0$ МПа.

За счет силы трения начальное распределение давления имеет линейный характер (за счет линеаризации уравнения сохранения импульса получено такое распределение). Из-за торможения газа на участке давление перестраивается. В начальный отрезок времени, как в случае распределения массового расхода, кривую давления можно разделить на три участка.

В зоне, до которой еще не дошла волна изменений, график давления сохраняет свою исходную форму. Далее он скачкообразно растет, что соответствует волне. После достижения своего локального максимума давление падает медленно, что связано силой трения газа.

При «времени» $t = t_*$ первые две участки кривой давления исчезают, а остается только третий участок. Возможно в начале участка скачкообразное возрастание давления на малую величину. При обратном движении волны кривые давления будут перевернутом положении: скачкообразное изменение давления будет снижать значения давления. Соответственно, после достижения $t = 2t_*$ волна опять переворачивается и т.д.

Раз за разом скачкообразные изменения становятся не заметными, давление в участке постепенно растет.

Распределение среднерасходной скорости потока качественно повторяет характер массового расхода. Разница заключается в том, что исходное и последующее распределения

давления учитывают падение давления за счет силы трения. Исходное распределение скорости потока – возрастающее. Это так и должно быть, т.к. давление убывает по длине участка, что приводит к убыванию плотности газа. В этом случае согласно закону сохранения массы скорость должна увеличиваться.

Аналогичные расчеты проведены для случая $M_0 = M_H = 100$ кг/с, $p_{00} = 5.0$ МПа. В этом случае (рис. 3) более ярко выражена эволюция массового расхода M . Расширение зоны меньшего массового расхода с нижней части идет по огибающей, которая идет по определенной прямой с углом $\approx 170^\circ$. При возвращении волны к концу участка кривые имеют верхнюю и нижнюю огибающие. Раз за разом эти огибающие стремятся занимать ближе к стационарному решению положение. Соответственно скачки массового расхода тоже убывают постепенно. Так продолжается переход к стационарному решению.

На рис. 4-6 представлены результаты, соответствующие одновременному закрытию концов участка, который до этого функционировал с постоянным массовым расходом газа.

Наблюдается сужение зоны исходного расхода с двух концов участка. В начальном отрезке времени наблюдаются скачкообразные изменения и с возрастанием, так и с убыванием. С концов участка давление изменяется практически по линейному закону (аналогично огибающей):

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

резкое спускание к нулю или резкое увеличение от нуля не имеет место. Отклонения огибающих

от оси абсцисс постепенно уменьшаются.

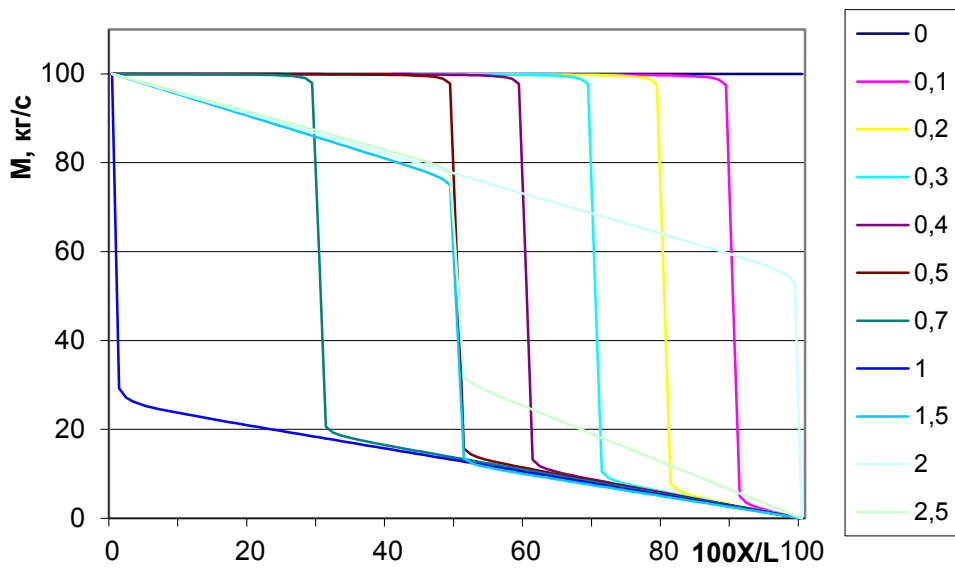


Рисунок 3 - Изменение давления при закрытии выхода участка. $M_0 = M_n = 100$ кг/с.

При $t = 0.5t_*$ кривая массового расхода как бы состоит из двух отрезков прямой линии. Дальше из середины этого ломаного образуется отраженный выступ, который с истечением времени расширяется и углубляется. При этом крайние отрезка кривых массового расхода продолжают приближаться к оси абсцисс. При достижении ими концов участка массовый расход во всем участке будет отрицательным. В дальнейшем с двух концов участка скачки отрицательным расходом продвигаются к середине участка. С достижением

геометрической середины участка опять волна опрокидывается и т.д. Каждое опрокидывание приводит к более меньшему по абсолютному значению экстремуму массового расхода. Таким образом, газ в участке стремится к покою.

Изменение массового расхода при $M_0 = 400$ кг/с приведено на рис. 4.

Соответствующие описанному случаю изменения давления, которые получены при $p_{00} = 5.0$ МПа, приведены на рис. 5.

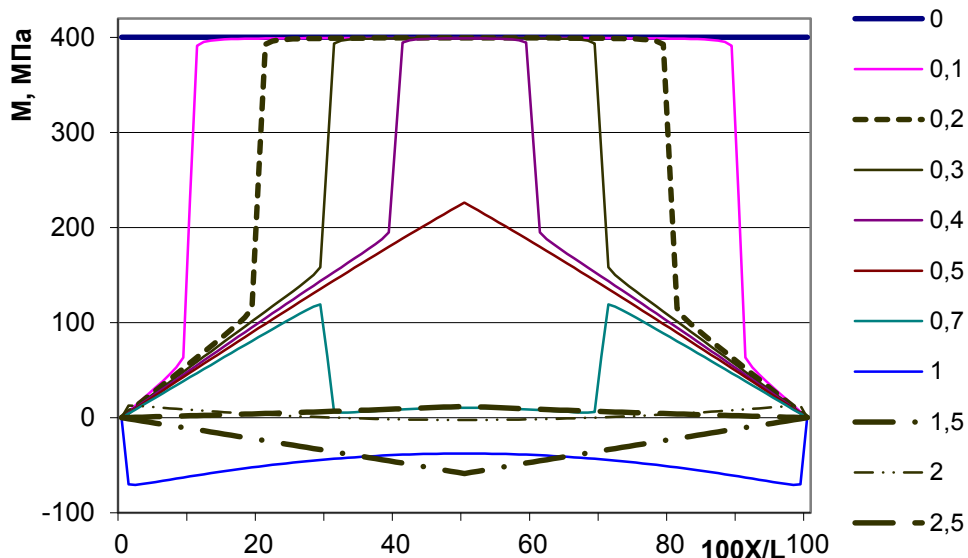


Рисунок 4 - Изменение массового расхода газа при закрытии обоих концов участка. $M_0 = 400$ кг/с.

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

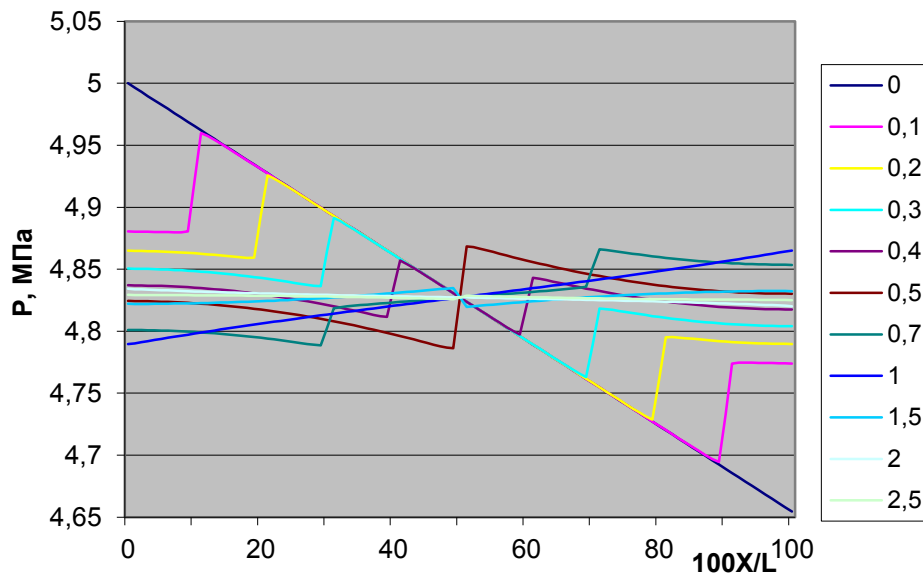


Рисунок 5 - Изменение давления при закрытии обеих концов участка. $M_0=400$ кг/с, $P_0=5.0$ МПа.

Исходная прямая давления с положительным угловым коэффициентом составляет общую огибающую для волн давления с обоих концов участка. До достижения огибающей, со стороны входа участка, сначала давление падает. В участке, куда добралась волна, скачкообразно возрастает. Со стороны выхода сначала возрастает, а потом резко падает до достижения огибающей. Таким образом, до времени $t = 0.5t_*$ кривая давления состоит из пяти участков. При $t = 0.5t_*$ распределение давления состоит из трех участков, т.к. средний участок имеет нулевую длину, скачковые участки кривых объединяются. Далее эти скачки разъединяются и продолжают двигаться дальше. Но, огибающая в данном этапе развития давления будет другой, которая имеет положительный угловой коэффициент. Огибающие каждый раз меняют свое положение со переменной знака углового коэффициента и тенденцией приближения к среднему равномерному значению давления, о значении которой отметили в предыдущем подразделе.

Скорость потока развивается как на рис. 4, с той разницей, что в правой части графика скорости потока выше, чем левые.

При меньших скоростях и больших давлениях волны массового расхода и давления

продержатся дольше, о чем свидетельствуют полученные результаты. Чередование максимума и минимума массового расхода по времени составляет 100.00, -72.98, 54.80, ... кг/с. В каждом из трех первых шагов $0.5t_*$ образуется полный набор скачков справа и слева. За счет трения они постепенно гасятся. Изменение давления газа в участке протекает по тому же сценарию, которого имели на рис. 5. В данном случае явно видны три огибающих давления.

Также получены численные результаты по образованию гасящихся колебаний массового расхода и давления газа при закрытии входного сечения участка. Картины-перевертыши относительно тех, которые получили при закрывании выходного сечения (рис. 6).

Наблюдали развитие массового расхода, давления и среднерасходной скорости газа с образованием нескольких огибающих при закрытии выходного сечения участка. При малых скоростях потока и больших значениях давления огибающие меняются скачкообразно и по времени скачки сокращаются. Огибающие кривых массового расхода могут быть верхними и нижними, которые чередуются. В целом имеет место увеличение среднего давления газа по истечению времени.

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

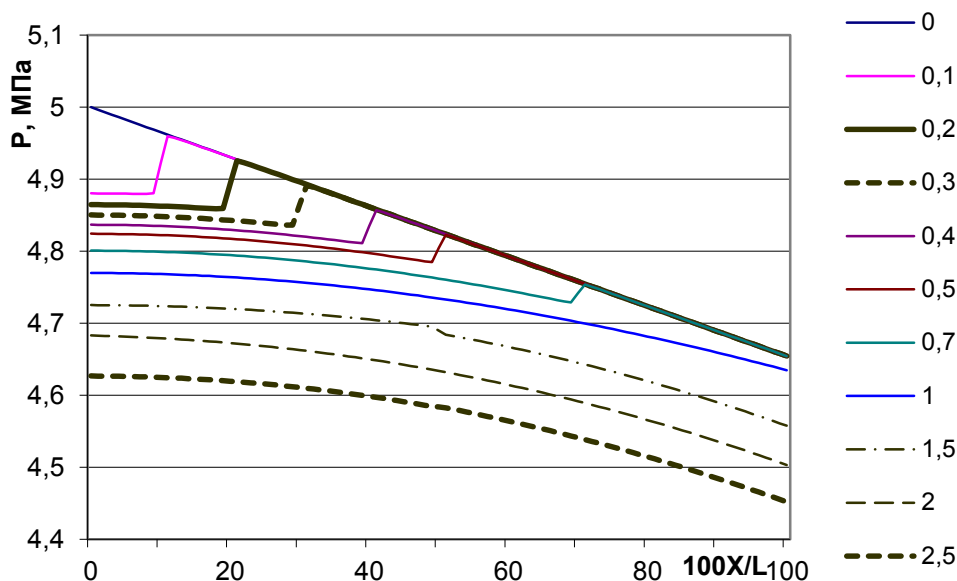


Рисунок 6 - Изменение давления газа по длине участка при закрытии входного сечения. $M_0=M_k=400$ кг/с, $P_{00}=5.0$ МПа.

При закрытии обоих концов участка для кривых массового расхода и скорости газа образуются отдельные огибающие с двух концов участка, а для давления – единая по всей длине участка огибающая. Огибающие кривых меняются скачкообразно: для массовой скорости с постоянным значением для отрезка времени и меняют знак; а для давления – как наклон, так и угловой его коэффициент.

При закрытии входного сечения участка наблюдается аналогичные для варианта закрытия выходного сечения, но волны распространяются в обратном направлении, а давление по времени падает.

Выводы по работе.

Получено аналитическое решение задачи о скачкообразном изменении массового расхода газа в концах элементарного участка горизонтального газопровода при учете силы трения и частичном учете силы инерции.

Выявлено, что учет только силы инерции газа приводит к образованию скачков массового расхода, скорости и давления газа, а учет только силы трения приводит к гладкому изменению этих показателей по длине участка и по времени. Соответственно, решения с $T_n(\tau)$ при малых значениях параметра b приводят к скачкообразным изменениям показателей, а в остальных случаях – к гладкому изменению.

Подобие по длине и времени в решениях, имеющее место при игнорировании силы трения, в случае учета обеих сил не соблюдаются, в связи

с этим каждая обсужденная задача носит индивидуальный характер. Выявлено, что кривые изменения массового расхода, давления и скорости могут иметь одну (при закрытии одного из концов участка) или двух огибающих в условном полупериоде колебаний. С истечением времени огибающие меняют свои положения: для массового расхода значение и знак; а для давления уклон и углового коэффициента. Огибающие кривых стремятся занимать свое предельное состояние. Эти изменения, благодаря силе трения, сопровождаются убыванием скачкообразных изменений.

Выявлено, что при закрытии одного из концов участка наблюдается изменение массового расхода газа с периодом $t_* = l/c$ с сохранением положительного значения, а при закрытии обоих концов участка – знакопеременное изменение возмущений с периодом $2t_*$. Форма скачка остается одинаковым при его продвижении по потоку и против потока.

Равномерное увеличение массы газа по времени приводит к ступенчатому (скачкообразному) возрастанию давления в концах участка, а уменьшение массы – к подобному же убыванию давления. В концах участка волны давления переворачиваются, вызывая большего или меньшего значения. Скачки значения давления в концах участка практически пропорциональны скорости изменения массы газа в участке.

Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	PIHHI (Russia) = 0.207	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 3.860	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 2.031	

References:

1. Charnyy I.A. (1975) Neustanovivsheesya dvizhenie real'noy zhidkosti v trubakh. Izd. 2-e. – M.: Nedra, 1975. – 296 p.
2. Bobrovskiy S.A., Shcherbakov S.G., Guseynzade M.A. (1972) Dvizhenie gaza v gazoprovodakh s putevym otborom. – M.: Nauka, 1972. – 192 p.
3. Khuzhaev I.K., Lebedev O.V., Matmurodov F.M. (2007) Dinamika volny zhidkosti po dline truboprovoda // Uzbekskiy zhurnal: Problemy mekhaniki. – 2007, №1-2. – p.51-55.
4. Khuzhaev I.K., Kukanova M.A., Mamadaliev Kh.A. (2009) Issledovanie dvizheniya gaza v magistral'nykh gazoprovodakh pri kusochno-postoyannom izmenenii raskhoda na kotsakh uchastka s uchedom sily treniya // Sovmestnyy vypusk Uzbekskogo zhurnala «Problemy informatiki i energetiki», sbornika nauchnykh trudov «Voprosy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki» po materialam Respublikanskoj konferentsii «Modelirovanie i upravlenie v real'nom sektore ekonomiki» (g.Tashkent, 23-26 sept. 2009) – p.119-123.
5. Budak B.M., Samarskiy A.A., Tikhonov A.N. (1972) Sbornik zadach po matematicheskoy fiziki. – M.: Nauka, 1972. – 687 p.
6. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. (1977) Uravneniya matematicheskoy fiziki. – M.: Nauka, 1977. –735 p.
7. Mamadaliev Kh.A. (2017) Zadacha o rasprostranenii voln vozmushcheniy skorosti potoka v gazoprovode, obrazovannykh mgnovennym izmeneniem massovogo raskhoda gaza // materialy respublikanskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeneniya informatsionnykh tekhnologiy v upravlenii» (g.Tashkent, 5-6 sept. 2017) – p.124-129.
8. Aliev R.A., Belousov V.D., Nemudrov A.G., et al. (1988) Truboprovodnyy transport nefti i gaza: Ucheb. dlya vuzov. –2-e izd., pererab. i dop. – M.: Nauka, 1988. – 368 p.
9. Kalitkin N.N. (1978) Chislennyye metody. – M.: Nauka, 1978. – 512 p.
10. Khuzhaev I.K., Mamadaliev Kh.A. (2016) O chislennom reshenii odnogo transtsendentnogo uravneniya dlya zadach truboprovodnoy transportirovki zhidkosti // XXI Mezhdunarodnuyu nauchno-prakticheskuyu konferentsiyu «Innovatsiya-2016»(g.Tashkent, 26-27 oct. 2016) – p.245-246.

