

на правах рукописи

НЕКЛЯЕВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОПРОВОДА
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ
СИТУАЦИЯХ**

Специальность 25.00.19. – "Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ"
(технические науки)



АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010



Работа выполнена в Российском Государственном Университете нефти и газа имени И.М. Губкина

Научный руководитель: Лурье Михаил Владимирович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Калинин Александр Федорович
доктор технических наук, профессор

Адилова Мария Дмитриевна
кандидат технических наук

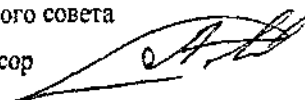
Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью
«Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Защита диссертации состоится «29» апреля 2010 г. в 16³⁰ час. в ауд. 502 на заседании диссертационного совета Д.212.200.06 в Российском Государственном Университете нефти и газа имени И.М. Губкина по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного Университета нефти и газа имени И.М. Губкина

Автореферат разослан «29» марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.М. Ревазов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена развитию теории неустановившегося неизотермического течения газа в газопроводе. Отличительная особенность работы состоит в том, что рассматриваемые процессы характеризуются высокими скоростями течения газа, которые в отдельных сечениях могут приближаться к скорости звука. Такие процессы возникают при аварийных разрывах стенок трубопровода, а также в штатных ситуациях, в частности, при продувках и опорожнении участков газопровода высокого давления.

В качестве исходного базиса использовано математическое моделирование, основанное на численном решении полной системы уравнений, описывающих нестационарное неизотермическое течение газа в газопроводе. Поскольку объектом исследования являются не только «медленные», но и так называемые «быстрые» процессы, протекающие с околосвуковыми скоростями, к рассмотрению привлечена полная система газодинамических уравнений, состоящая из уравнений сохранения массы, изменения количества движения и энергии, отражающего термодинамические превращения, происходящие с газом. В работе изучались распределения скоростей, давлений и температур газа по длине газопровода, и на этой основе выявлялись новые, ранее неизвестные эффекты, а также проверялись и уточнялись существующие методы расчета.

Актуальность темы диссертации. Общеизвестны успехи, достигнутые механикой в области исследования неустановившихся течений газа с большими, в т.ч. звуковыми и гиперзвуковыми скоростями. Эти исследования выполнялись, главным образом, в связи с решением проблем авиации и ракетостроения, с задачами «внутренней баллистики», а также движения газа в соплах и каналах промышленных установок. Основными факторами, определяющими неустановившееся течение газа, при этом являлись силы давления и инерции, а действие сил трения и тяжести полагалось пренебрежимо

малым, в то время как именно они оказываются весьма существенными для понимания переходных процессов в длинных газопроводах.

Газовая динамика развивалась и в приложении к проблемам проектирования и эксплуатации газопроводов. Классики этого направления Н.Е. Жуковский, С.А. Чаплыгин, Л.С. Лейбензон, Л.И. Седов, С.А. Христианович, И.А. Чарный, И.П. Гинзбург, Н.И. Белоконов, Б.П. Поршаков, К.П. Станюкович, Ф.Г. Темпель, И.Е. Ходанович, В.А. Яблонский, В.И. Черникин, А.Ф. Воеводин и многие другие отечественные и зарубежные ученые сформулировали и решили основные задачи установившихся и не установившихся течений газа в длинных трубопроводах, что позволило успешно создавать и развивать мощные газотранспортные системы. Целая плеяда отечественных и зарубежных ученых совершенствовала теорию расчета переходных процессов в газопроводах и достигла в этом направлении значительного прогресса. Однако большинство выполненных исследований опиралось на предположение об изотермическом характере процессов, в которых скорость полагалась существенно меньшей скорости звука, в связи с чем инерцией газа можно либо пренебречь, либо учесть ее в упрощенном виде. Как правило, использовались линеаризованные уравнения движения, краевые условия и условия сопряжения, позволяющие находить решения соответствующих математических задач операционными методами или в виде рядов (И.А. Чарный, М.А. Гусейнзаде, В.А. Юфин, М.Г. Сухарев, Б.Л. Кривошеин и др.).

В то же время эксплуатация газотранспортных систем связана с множеством технологических режимов, когда «упрощающие предположения» не соответствуют действительности и не позволяют выявить некоторые важные для практики эффекты. В газопроводах существуют процессы, в которых течение газа происходит с высокими скоростями, температура газа при сжатии и расширении изменяется на десятки градусов, а силы инерции весьма существенны. Прежде всего это относится к процессам истечения газа при разрывах газопроводов высокого давления, а также в технологических операциях,

связанных с частичным перепуском газа или его сбросом в атмосферу.

Газотранспортная система России непрерывно развивается, увеличиваются рабочие давления в газопроводах, возрастает их пропускная способность. Самы газопроводы прокладываются во все более сложных термодинамических условиях, характеризуемых большой разностью высотных отметок, пролеганием под водой и преодолением горных перевалов. В подобных экстремальных условиях любая смена режимов транспортировки ведет к возникновению волн повышенного и пониженного давления, сопровождаемых значительными колебаниями температуры транспортируемого газа. Для расчета и анализа переходных процессов, возникающих в таких газопроводах, существующая «классическая» теория нуждается в дальнейшем развитии.

Таким образом, *актуальность* настоящего исследования обусловлена прежде всего *практическими задачами* проектирования и эксплуатации газопроводов, протяженность и сложность устройства которых постоянно возрастают. Актуальность исследования обусловлена также *общенаучными задачами* развития теории, учитывающей в полном объеме все факторы, определяющие течение реальных газов в длинных газопроводах.

Цель диссертационной работы: развить теорию «быстрых» неустановившихся процессов течения реального газа в газопроводе, в частности, теорию переходных процессов, возникающих при разгерметизации и штатных ситуациях опорожнения газопроводов, выявив и исследовав при этом ранее неизвестные эффекты.

Для осуществления цели диссертации потребовалось решить следующие **научные задачи:**

– выполнить сравнение результатов аналитического и численного методов расчета неустановившихся процессов течения газа между собой и сопоставить их с имеющимися экспериментальными данными. На основе сравнения оценить погрешность приближенных решений, дать рекомендации по выбору адекватного метода расчета переходных процессов;

– разработать метод численного решения задач об истечении газа через отверстие в газопроводе, исследовать динамику изменений параметров газового потока в возникающем переходном процессе;

– дать решение задачи о расчете времени, необходимого для полного опорожнения участка газопровода через свечу, сопоставить полученные результаты с имеющимися решениями и данными, приведенными в нормативной документации;

– дать решение задачи об истечении газа из газопровода при гильотинном разрыве, изучить гидравлическую и термодинамическую картину переходного процесса, порождаемого истечением, исследовать возникающие эффекты, сравнить результаты расчета с приближенными решениями;

– решить задачу об истечении газа из газопровода при гильотинном разрыве в случае бегущей трещины, рассчитать кольцевые напряжения в стенках газопровода для различных скоростей распространения разрушения.

– сделать обобщающие выводы и дать практические рекомендации, касающиеся вопросов проектирования и эксплуатации газопроводов.

Научная новизна работы. В диссертации доказана необходимость использования более сложных методов расчета «быстрых» переходных процессов в газопроводах, т.е. процессов, характеризующихся высокими скоростями течения газа и значительными изменениями параметров исходного рабочего режима. Показано, что для расчета таких процессов допущение об изотермическом характере течения газа приводит к большим погрешностям, что доказывает необходимость использования полной системы уравнений, включающей уравнения неразрывности, движения и энергии.

В диссертационном исследовании развивается теория переходных процессов, вызванных истечением газа из газопровода через отверстия различных размеров, выявлены погрешности имеющихся приближенных решений, теоретически доказано существование ранее неизвестных эффектов, объяснена их физическая природа.

Практическая значимость работы состоит в уточнении результатов, используемых в процессе проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов. Предложены уточненные номограммы для расчета времени опорожнения участков газопровода, обнаружен эффект подсосывания воздуха в разрушенный газопровод, учет которого позволит повысить безопасность ремонтно-восстановительных работ.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических семинарах и конференциях:

- 7-й Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России «Новые технологии в газовой промышленности» (25-28 сентября 2007 г., г. Москва);

- Открытом научно-практическом семинаре молодых работников ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» «Новые технологии в газовой промышленности. Актуальные проблемы развития газотранспортной системы» (2-5 июня 2008 г., г. Санкт-Петербург);

- 14th International Conference on Transport&Sedimentation of Solid Particles (23-27 June, 2008, Saint Petersburg, Russia).

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 5 работ, в т. ч. 3 из них в периодических изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 187 страниц состоит из введения, пяти глав с выводами по отдельным главам, общих выводов и включает 52 рисунка, 3 таблицы, приложения и перечень литературы из 174 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложена сущность работы и показана актуальность проводимого исследования.

В первой главе диссертации анализируется современное состояние теории нестационарного течения газа в газопроводах. Отмечается, что фундамент разделов газовой динамики, занимающихся исследуемыми в настоящей работе вопросами, был сформирован трудами в области гидравлики И.П. Гинзбурга, И.С. Громеко, А.А. Гриба, Н.Е. Жуковского, Н.А. Карвелишвили, Л.С. Лейбензона, М.А. Мосткова и многих других отечественных и зарубежных ученых. Выдающиеся достижения газовой динамики связаны с именами Л.А. Вулиса, Я.Б. Зельдовича, Т. Кармана, Э. Маха, Г.Ф.Б. Римана, Л. Прандтля, Л.И. Седова, Дж. Тейлора, С.А. Христиановича, С.А. Чаплыгина, Г.Г. Черного и др.

Вероятно, первое обстоятельное исследование задачи одномерного стационарного движения газа в трубах принадлежит К. И. Страховичу, которым были сформулированы основные уравнения с учетом трения, теплообмена, реальных свойств газа и намечены пути решения ряда задач этого раздела газовой динамики. Изучением нестационарного течения газа в протяженных газопроводах занимались А.В. Александров, Д.Б. Баясанов, Н.И. Белоконь, С.А. Бобровский, З.Т. Галиуллин, М.А. Гусейнзаде, Ф.Г. Темпель, И.Е. Ходанович, И.А. Чарный, В.И. Черников, С.Г. Щербаков, В.А. Юфин и многие другие отечественные и зарубежные ученые.

Наиболее широкое распространение при решении задач о неустановившемся течении газа в газопроводе получил подробно разработанный И.А. Чарным метод линеаризации. С целью повышения его точности и возможности применения к исследованию сложных трубопроводных систем были предложены разные варианты его модернизации, а на основе линеаризованной системы уравнений разработан метод электромеханической аналогии.

В большинстве работ газ полагался идеальным, его движение – изотермическим, скорости течения потока – достаточно малыми, чтобы пренебречь в уравнении движения конвективным и инерционным членами, а функция сопротивления представлялась в линейном виде. В таком приближении зада-

ча сводилась к решению телеграфного уравнения.

Принимая во внимание используемые при линейаризации допущения, следует предположить, что круг процессов, который может быть исследован с помощью подобных методов, ограничивается течением газа с низкими скоростями, малыми изменениями первоначальных параметров, относительно невысокими давлениями и высокими температурами. В противном случае погрешность расчетов может оказаться значительной.

В настоящее время к решению задач нестационарного неизотермического течения газа широко привлекаются разнообразные численные методы. Их главное преимущество – возможность интегрировать полную систему уравнений газовой динамики, не прибегая к дополнительным упрощающим предположениям. Ожидается, что использование численных методов для исследования «быстрых» процессов позволит существенно уточнить уже имеющиеся решения, а также обнаружить неизвестные ранее эффекты.

Как результат проведенного литературного анализа, в заключении главы формулируются цель и задачи исследований, изложенных в диссертации.

Во второй главе диссертации рассмотрена теория нестационарного неизотермического течения газа в трубопроводе. Приведена полная система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая неустановившиеся процессы в газопроводах:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho \cdot S}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot S \cdot v}{\partial x} = 0, \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - 4 \cdot \frac{\tau_w}{d} - \rho \cdot g \cdot \sin \alpha, \\ \rho \cdot S \cdot \left(\frac{\partial e^{\text{внут}}}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial e^{\text{внут}}}{\partial x} \right) = \pi \cdot d \cdot q_n - p \cdot \frac{\partial S \cdot v}{\partial x} - n^{\text{внут}} \cdot \rho \cdot S, \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho(x, t)$, $v(x, t)$, $p(x, t)$ – неизвестные плотность, скорость и давление газового потока; S , d – площадь поперечного сечения и внутренний диаметр га-

зопровода соответственно; τ_w – касательное напряжение трения на стенке трубы; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона оси газопровода к горизонтали; $e^{\text{внут}}$ – удельная по массе внутренняя энергия потока газа; q_n – удельный по поверхности тепловой поток, проходящий через стенку трубы; $n^{\text{внут}}$ – удельная по массе мощность сил внутреннего трения.

В работе подробно описан модифицированный метод характеристик для численного интегрирования соотношений (1). Показано, что на плоскости переменных (x, t) существует три семейства кривых (характеристик), уклон которых равен $(dx/dt)_{1,2} = \pm c + v$, $(dx/dt)_3 = v$. Скорость распространения звука в газе c , зависит от давления и температуры:

$$c(p, T) = \sqrt{\frac{C_v - p/\rho^2 \cdot (\partial\rho/\partial T)_p}{C_v} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p}\right)_T} = \sqrt{\frac{C_p(p, T)}{C_v} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p}\right)_T} = \sqrt{\gamma(p, T) \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p}\right)_T}, \quad (2)$$

где C_p и C_v – теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме соответственно; $\gamma(p, T)$ – показатель адиабаты. Вдоль характеристик выполняются обыкновенные дифференциальные уравнения, называемые условиями совместности:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} + \rho \cdot c \cdot \frac{dv}{dt} = c \cdot \Phi_1 + \frac{[\gamma(p, T) - 1]}{p/\rho \cdot (\partial\rho/\partial p)_T} \cdot \Phi_2, dx/dt = v + c, \\ \frac{dp}{dt} - \rho \cdot c \cdot \frac{dv}{dt} = -c \cdot \Phi_1 + \frac{[\gamma(p, T) - 1]}{p/\rho \cdot (\partial\rho/\partial p)_T} \cdot \Phi_2, dx/dt = v - c, \\ \frac{\Phi_2}{\rho} - C_p(p, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} \cdot \frac{p}{\rho^2} \cdot \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T = 0, dx/dt = v, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Phi_1 = -\lambda \cdot \rho \cdot v^2 / (2 \cdot d)$; $\Phi_2 = -4 \cdot k/d \cdot (T - T_{\text{окр}}) + \lambda \cdot \rho \cdot v^3 / (2 \cdot d)$; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; k – коэффициент теплопередачи; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Систему уравнений (3) можно записать для каждой из множества точек, выбранного в заданной области координатной плоскости (x, t) с некоторым шагом по координате и времени, рисунок 1.

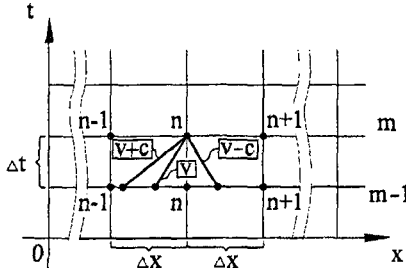


Рисунок 1 - Расчетная схема метода характеристик

При выборе достаточно малого шага по времени Δt систему дифференциальных уравнений (3) с высокой степенью точности можно заменить конечно-разностными соотношениями, которые связывают между собой параметры потока на $m-1$ и m временном слоях:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{P_{n,m} - P_{n-\frac{1}{2},m-1}}{\Delta t} + (\rho \cdot c)_{n-\frac{1}{2},m-1} \cdot \frac{v_{n,m} - v_{n-\frac{1}{2},m-1}}{\Delta t} = \left[c \cdot \Phi_1 + \frac{(\gamma-1)}{\rho \cdot \rho \cdot (\partial p / \partial p)_T} \cdot \Phi_2 \right]_{n-\frac{1}{2},m-1}, \\ & \frac{P_{n,m} - P_{n+\frac{1}{2},m-1}}{\Delta t} - (\rho \cdot c)_{n+\frac{1}{2},m-1} \cdot \frac{v_{n,m} - v_{n+\frac{1}{2},m-1}}{\Delta t} = \left[-c \cdot \Phi_1 + \frac{(\gamma-1)}{\rho \cdot \rho \cdot (\partial p / \partial p)_T} \cdot \Phi_2 \right]_{n+\frac{1}{2},m-1}, \\ & c_p \cdot \frac{T_{n,m} - T_{n-\frac{1}{2},m-1}}{\Delta t} - \left[\frac{p}{\rho^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_T \right]_{n-\frac{1}{2},m-1} \cdot \frac{P_{n,m} - P_{n-\frac{1}{2},m-1}}{\Delta t} = \left[\frac{\Phi_2}{\rho} \right]_{n-\frac{1}{2},m-1}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

В заключении главы кратко рассмотрены проблема выбора уравнения состояния газа, формулы для определения коэффициента сжимаемости $Z(p, T)$, а также вопросы задания начальных, граничных условий и условий сопряжения при решении задач транспорта газа по газопроводам.

В третьей главе диссертации оценивается погрешность приближенных

методов расчета процессов неустановившегося течения газа в газопроводе, основанных на использовании линеаризованной системы уравнений газовой динамики. Существующие аналитические решения задач о заполнении газопровода:

$$\left\{ \begin{aligned} p^2(x, t) &= p_{\text{нач}}^2 - \frac{8 \cdot (p_{\text{нач}}^2 - p_{\text{кон}}^2)}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{+\infty} \left[\frac{(-1)^n \cdot \sin(\chi_n \cdot x) \cdot \exp(-\chi_n^2/a^2 \cdot t)}{(1 + 2 \cdot n)^2} \right], \\ (\rho \cdot v)^2 &= 4 \cdot \frac{(p_{\text{нач}}^2 - p_{\text{кон}}^2) \cdot d_0}{\pi \cdot \lambda \cdot R \cdot T_{\text{ср}} \cdot L} \cdot \sum_{n=0}^{+\infty} \left[\frac{(-1)^n \cdot \cos(\chi_n \cdot x) \cdot \exp(-\chi_n^2/a^2 \cdot t)}{(1 + 2 \cdot n)} \right], \end{aligned} \right. \quad (5)$$

и о включении попутного отбора:

$$\left\{ \begin{aligned} p^2(x, t) &= p_{\text{нач}}^2 - \frac{p_{\text{нач}}^2 - p_{\text{кон}}^2}{L} \cdot x - 2 \cdot \frac{p_{\text{ср}} \cdot R \cdot T_{\text{ср}} \cdot a^2}{S} \cdot G_{\text{отб}} \cdot \begin{cases} x, x \leq x_1 \\ x_1, x > x_1 \end{cases} + \\ &+ \frac{16 \cdot p_{\text{ср}} \cdot R \cdot T_{\text{ср}} \cdot a^2 \cdot L}{S \cdot \pi^2} \cdot G_{\text{отб}} \cdot \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{\sin(\beta_n \cdot x_1) \cdot \sin(\beta_n \cdot x) \cdot \exp(-\beta_n^2/a^2 \cdot t)}{(2 \cdot n - 1)^2} \right], \\ (\rho \cdot v)^2 &= \frac{G_{\text{кон}}^2}{S^2} + \frac{2 \cdot p_{\text{ср}} \cdot a^2 \cdot d_0}{S \cdot \lambda_{\text{ср}}} \cdot G_{\text{отб}} \cdot \begin{cases} 1, x \leq x_1 \\ 0, x > x_1 \end{cases} - \\ &- \frac{8 \cdot p_{\text{ср}} \cdot a^2 \cdot d_0}{S \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \pi} \cdot \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{\sin(\beta_n \cdot x_1) \cdot \cos(\beta_n \cdot x) \cdot \exp(-\beta_n^2/a^2 \cdot t)}{(2 \cdot n - 1)} \right], \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где $p_{\text{нач}}, p_{\text{кон}}$ – давление во входном и выходном сечениях газопровода в исходном стационарном режиме; $p_{\text{ср}}, T_{\text{ср}}$ – средние по длине участка газопровода давление и температура газа в исходном стационарном режиме; a – коэффициент линеаризации; $G_{\text{отб}}$ – массовый расход отбора газа; x_1 – координата сечения с отбором; S – площадь поперечного сечения газопровода; L – протяженность участка; $\chi_n = \pi \cdot (1 + 2 \cdot n)/(2 \cdot L)$; $\beta_n = \pi \cdot (2 \cdot n - 1)/(2 \cdot L)$, сравниваются с численными, полученными на основе модифицированного метода характеристик.

Расчеты осуществлялись с помощью написанных автором диссертации

компьютерных программ «Заполнение газопровода» и «Включение отбора». Данные программы позволяют в реальном времени получать распределения параметров потока газа, рассчитанные точным и приближенным методами, а также вычислять ряд показателей, используемых для количественной оценки ошибки аналитического решения: текущую относительную $R_{\text{тек}}$, максимальную относительную R_{max} , максимальную местную абсолютную Δ_{max} и максимальную местную относительную ϵ_{max} погрешности.

Текущая относительная погрешность приближенного решения $R_{\text{тек}}$ представляет собой среднее отклонение распределения параметра потока f , полученного аналитически, от определенного численно и рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{тек}} = \sqrt{\sum_{i=0}^N (f_i^{\text{хар}} - f_i^{\text{лин}})^2} / \sqrt{\sum_{i=0}^N (f_i^{\text{хар}})^2}, \quad (7)$$

где N – общее количество точек сравнения; $f_i^{\text{хар}}$ и $f_i^{\text{лин}}$ – значения параметра потока f в точке i , вычисленное методом характеристик и аналитически соответственно. Максимальная относительная погрешность R_{max} представляет собой наибольшую за все время от начала нестационарного процесса текущую относительную погрешность $R_{\text{тек}}$.

Сравнение результатов численного и аналитического решений задач о заполнении газопровода и включения попутного отбора показало, что приближенные методы схематизируют физическую картину протекания нестационарных процессов. Пренебрежение инерционным членом в уравнении движения полностью исключает из решения волновые процессы. По этой причине приближенные методы расчетов не показывают наличие колебаний параметров потока, в результате которых давление в газопроводе оказывается в некоторых сечениях выше максимального равновесного, а в начальном сечении возникает обратное течение газа, рисунок 2.

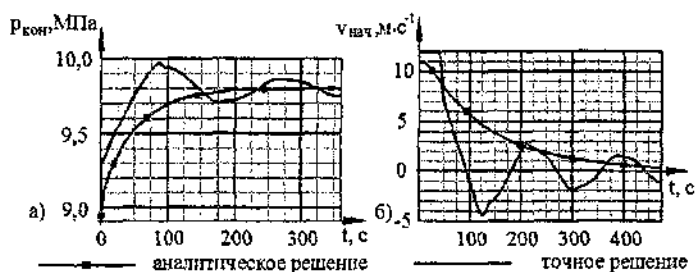


Рисунок 2 – Графики изменения: а) давления потока в конечном сечении; б) скорости потока в начальном сечении при заполнении газопровода

Проведено количественное сравнение численного и аналитического решений рассматриваемых в данной главе задач. Значительного влияния термодинамических условий на точность приближенных расчетов обнаружено не было. Максимальное среднее отклонение R_{max} в большинстве случаев не превысило 2%. Предполагается, что это обусловлено относительно малыми изменениями параметров исходного рабочего режима. При других условиях роль термодинамических факторов может оказаться существенной.

Наибольшее влияние на точность приближенных методов исследования переходных процессов, основанных на использовании линеаризованной системы уравнений газовой динамики, имеет величина диапазона возможного изменения скорости течения газа, на котором оценивается константа линеаризации a . Чем он больше, тем более высоких значений достигает погрешность решения в рядах. Инерционные эффекты, качественно изменяющие картину протекания нестационарных процессов, оказывают меньшее влияние на количественное значение ошибки аналитического метода.

Процессы истечения газа из газопровода в атмосферу характеризуются наиболее широким диапазоном возможного изменения скоростей потока, а также значительным изменением параметров исходного рабочего режима. Возникающие при этом в трубопроводе нестационарные процессы, согласно сделанным выводам, следует изучать при помощи численных методов, а су-

ществующие приближенные решения необходимо уточнить.

В заключении главы по результатам оценки погрешности приближенных методов расчета, имеющих в своей основе линеаризованную систему уравнений газовой динамики, сформулированы рекомендации относительно выбора адекватного метода исследования нестационарного течения газа в зависимости от решаемой задачи и требований, предъявляемых к точности вычислений.

В четвертой главе исследуется неустановившийся процесс, вызванный истечением газа из газопровода в атмосферу через малое отверстие, характерные размеры которого не превышают внутренний диаметр трубопровода. Газопровод с внешним диаметром $D_{тр}$, толщиной стенки δ и протяженностью L отсечен по краям закрытыми шаровыми кранами. В нем под давлением p_0 и при температуре T_0 находится природный газ заданного химического состава. В некотором сечении рассматриваемого участка с координатой $x_{св}$ расположена закрытая свеча с внутренним диаметром $d_{св}$. В начальный момент времени $t=0$ свеча открывается, и начинается истечение газа. Температура окружающей среды $T_{окр}$ и коэффициент теплопередачи k известны.

Для исследования нестационарного процесса, возникающего в газопроводе при истечении газа через свечу, автором диссертационной работы была создана компьютерная программа «Свеча», производящая расчет изучаемого процесса модифицированным методом характеристик. В сечении, где установлена свеча, условия на характеристиках дополнялись условием совместности, выражающим в своей сути баланс массового расхода газа: $G^+ - G^- = G_{св}$, где $G^+ = \rho \cdot S_{тр} \cdot v^+$ и $G^- = \rho \cdot S_{тр} \cdot v^-$ – массовый расход газа до и после сечения со свечой соответственно; $G_{св}$ – массовый расход истечения.

При определении $G_{св}$ учитывалась возможность реализации звукового и докритического режимов истечения. Если давление в месте врезки p^*

удовлетворяет неравенству $(p^*/p_{атм}) > [(\gamma+1)/2]^{\gamma/(1-\gamma)}$, где $p_{атм}$ – атмосферное давление; γ – показатель адиабаты, то имеет место критический режим. В этом случае параметры газового потока на срезе свечи определяются по следующим формулам:

$$p_{св} = p^* \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}, T_{св} = \frac{2 \cdot T^*}{\gamma+1}, \rho_{св} = \frac{p_{св}}{z(\bar{p}_{св}, \bar{T}_{св}) \cdot R \cdot T_{св}}, v_{св} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot R \cdot T^*}{\gamma+1}}, \quad (8)$$

где T^* – температура в месте врезки свечи. Если неравенство не выполняется, то имеет место докритический режим истечения. При этом на срезе свечи устанавливаются следующие значения параметров потока газа:

$$p_{св} = p_{атм}, T_{св} = T^* \left(\frac{p^*}{p_{атм}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}, \rho_{св} = \frac{p_{св}}{z(\bar{p}_{св}, \bar{T}_{св}) \cdot R \cdot T_{св}}, v_{св} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot R \cdot T^*}{\gamma-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p^*}{p_{атм}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right]} \quad (9)$$

Результаты расчета процесса опорожнения газопровода, получаемые с помощью программы «Свеча», сопоставлены с приведенными в статье В.А. Сулейманова экспериментальными данными. На рисунке 3 показаны графики изменения давления в начальном и конечном сечениях опорожняемого участка газопровода.

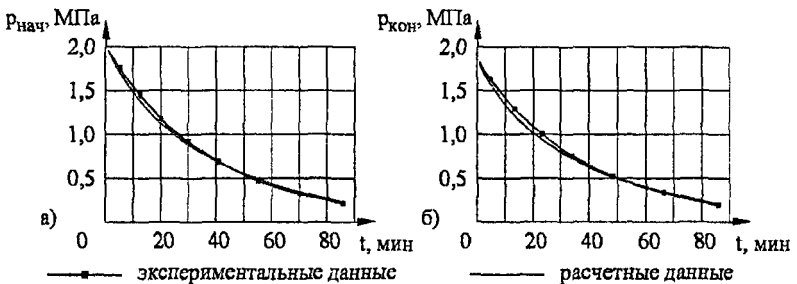


Рисунок 3 - Графики изменения давления: а) в начальном сечении; б) в конечном сечении участка газопровода

Среднее отклонение расчетных функций давления в начальном и конечном

сечениях от экспериментальных данных составило соответственно 2,9% и 3,9%, что свидетельствует о высокой точности вычислений.

Для диапазона начальных давлений p_0 от 0 до 15 МПа и температур T_0 от 273,15 до 303,15 К были проведены термодинамические и гидравлические исследования нестационарного процесса, вызванного опорожнением газопровода через свечу, показавшие, что условно он может быть разделен на два этапа. Первый характеризуется высокими скоростями истечения, значительным понижением давления и температуры газа вследствие его быстрого расширения, рисунок 4. Степень охлаждения газового потока определяется комплексом факторов и может составлять десятки градусов. Для второго этапа, напротив, характерен рост температуры за счет внешнего притока тепла, который поддерживает давление в трубопроводе на уровне, незначительно превышающем атмосферное, рисунок 4. Скорости истечения газа при этом относительно малы и имеют порядок нескольких десятков метров в секунду.

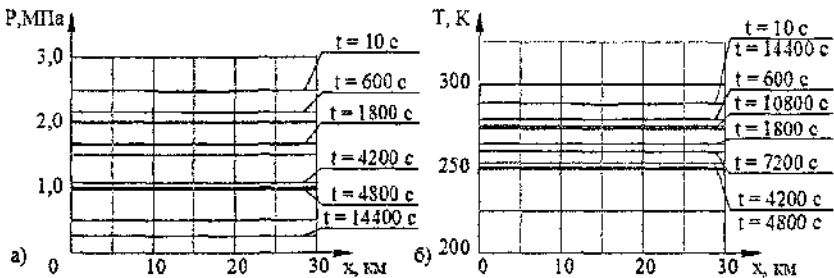


Рисунок 4 – Графики изменения давления и температуры при истечении газа через свечу

На завершающей стадии исследуемого нестационарного течения возникает колебательное движение, которое при определенном сочетании начальных параметров вызывает подсасывание атмосферного воздуха во внутреннюю полость газопровода. Данный эффект представляет опасность, т.к. может привести к образованию газозвушной смеси взрывоопасной концентрации. Интенсивность подсасывания воздуха возрастает при увеличении диаметра свечи, уменьшении начального давления и протяженности участка.

Другие факторы не оказывают существенного влияния на характер возникающего колебательного движения.

Рассмотрен вопрос определения времени полного истечения газа из газопровода через свечу. Участок газопровода полагался опорожненным, когда скорость газа на срезе свечи становилась меньше $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Потребность в подобных расчетах может возникать как в процессе проектирования, например, при выборе минимального диаметра и количества свечей, достаточных для освобождения внутренней полости трубопровода от газа за нормативное время, так и в реальных условиях эксплуатации, например, для выбора безопасного момента времени начала огневых и газоопасных работ.

Исследования показали, что наибольшее влияние на продолжительность истечения газа оказывают начальное давление, внутренний объем участка, диаметр свечи и коэффициент теплопередачи от потока в окружающую среду. В меньшей степени время полного опорожнения газопровода зависит от координаты установки свечи, начального градиента температур внутри и вне трубопровода, химического состава газа. В большинстве случаев действие данных факторов можно не учитывать.

Сравнение времени полного опорожнения, получаемого на основе программы «Свеча», с существующими решениями, а также с данными, имеющимися в нормативной документации, показало, что приближенное и точное решения отличаются в 2-3 раза, рисунок 5.

Обнаруженные расхождения объясняются использованием в приближенных решениях предположения об изотермическом (адиабатическом) характере исследуемого нестационарного процесса. Такое допущение не соответствует действительности и не учитывает, во-первых, вызываемое охлаждением газового потока падение скорости звука, в результате которого продолжительность стадии критического истечения возрастает, а, во-вторых, время, необходимое на восстановление температурного равновесия на заключительном этапе процесса опорожнения газопровода.

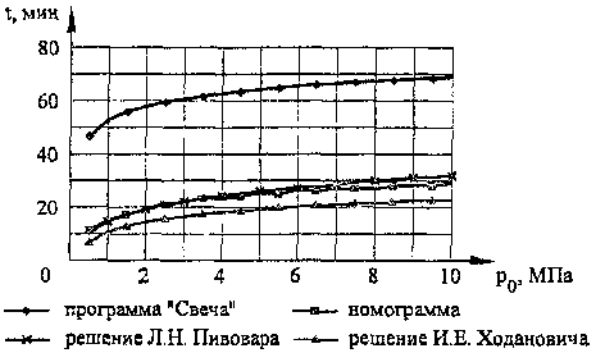


Рисунок 5 - Определение времени полного опорожнения газопровода различными методами

По результатам расчетов, проведенных с помощью программы «Свеча», номограмма, приведенная в ОНТИ 51-1-85. Магистральные трубопроводы, была уточнена, рисунок 6.

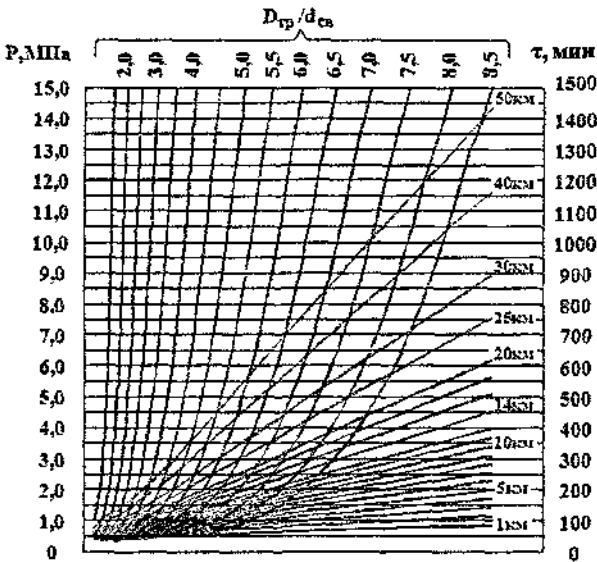


Рисунок 6 - Номограмма для определения времени опорожнения газопровода

В пятой главе диссертационной работы исследован переходный процесс, вызванный истечением газа из газопровода через отверстие, характер-

ные размеры которого больше или равны внутреннему диаметру трубы. В реальных условиях эксплуатации такое истечение может происходить, например, при лавинообразном нарушении целостности трубопровода, т.е. при гильотинном разрыве.

Решаемая задача формулируется следующим образом. На участке газопровода с внешним диаметром $D_{тр}$ и толщиной стенки δ до возникновения аварийной ситуации существует стационарное течение газа, заданное массовым расходом газа G , давлением $p_{нач}$ и температурой $T_{нач}$ на входе в него. В начальный момент времени происходит разрушение стенки трубы, распространяющееся вдоль оси трубопровода с некоторой скоростью. Считается, что системы защиты, установленные на магистральном газопроводе, идентифицировали аварийную ситуацию и гидравлически изолировали аварийный участок от соседних с помощью шаровых кранов. В точке с координатой x равной L и отсчитанной от ближайшего шарового крана, дальнейшее развитие разрушения прекращается. Температура $T_{окр}$, давление $p_{окр}$ окружающей среды и коэффициент теплопередачи k известны.

Нестационарный процесс, вызванный истечением газа при гильотинном разрыве, рассчитывался модифицированным методом характеристик с помощью созданной автором диссертационной работы программы «Разрыв». Возможность реализации различных режимов истечения учитывалась в виде специального краевого условия. Система рекуррентных соотношений (4) для аварийного сечения при критическом режиме истечения записывалась в виде:

$$\begin{cases} p_{n,m} + (\rho \cdot c)_{n-1/2,m-1} \cdot v_{n,m} = \left[\frac{p}{\Delta t} + \frac{\rho \cdot c \cdot v}{\Delta t} + c \cdot \Phi_1 + \frac{(\gamma - 1)}{p/\rho \cdot (\partial p / \partial p)_T} \cdot \Phi_2 \right]_{n-1/2,m-1} \cdot \Delta t, \\ v_{n,m} = c(p_{n,m}, T_{n,m}), \\ T_{n,m} - \left[\frac{p}{c_p \cdot \rho^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_T \right]_{n-1/2,m-1} \cdot p_{n,m} = \left[\frac{\Phi_2}{c_p \cdot \rho} \cdot \Delta t + T - \frac{p^2}{c_p \cdot \rho^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_T \right]_{n-1/2,m-1}, \end{cases} \quad (10)$$

а для случая истечения в дозвуковом режиме – в виде:

$$\begin{cases} p_{n,m} + (\rho \cdot c)_{n-1/2,m-1} \cdot v_{n,m} = \left[\frac{p}{\Delta t} + \frac{\rho \cdot c \cdot v}{\Delta t} + c \cdot \Phi_1 + \frac{(\gamma-1)}{p/\rho \cdot (\partial p / \partial p)_T} \cdot \Phi_2 \right]_{n-1/2,m-1} \cdot \Delta t, \\ p_{n,m} = p_{\text{окр}}, \\ T_{n,m} - \left[\frac{p}{c_p \cdot \rho^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_T \right]_{n-1/2,m-1} \cdot p_{n,m} = \left[\frac{\Phi_2}{c_p \cdot \rho} \cdot \Delta t + T - \frac{p^2}{c_p \cdot \rho^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_T \right]_{n-1/2,m-1} \end{cases} \quad (11)$$

Полученное численное решение сравнивалось с аналитическим при истечении газа из одного и того же участка газопровода в область с различным давлением окружающей среды. Для количественной оценки точности приближенного решения использовались показатели: $R_{\text{тек}}$, R_{max} , Δ_{max} и ϵ_{max} .

При истечении газа из газопровода, давление $p_{\text{нач}}$ в котором поддерживалось на уровне 6,0 МПа, в область с давлением $p_{\text{окр}}$, равным 4,5 МПа, приближенное решение достаточно точно описывает нестационарный процесс, рисунок 7. Для функции $p(x, t)$ максимальная относительная погрешность R_{max} составила 6,34%, максимальная местная абсолютная Δ_{max} и относительная ϵ_{max} погрешности – 0,41 МПа и 9,02% соответственно.

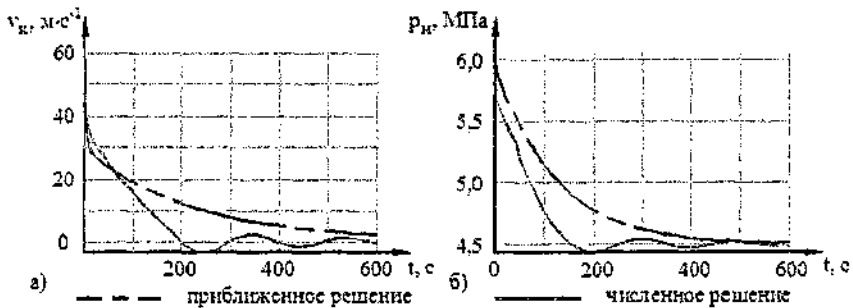


Рисунок 7 - Графики изменения параметров газового потока при малом градиенте давления: а) скорости истечения в область низкого давления; б) давления в начальном сечении

Если истечение газа из того же газопровода происходит в область с

давлением $p_{\text{окр}}$, равным атмосферному (101325 Па), то использование приближенного решения приводит к значительной ошибке, рисунок 8. Для функции $p(x, t)$ максимальная относительная погрешность R_{max} составила 2701,13%, максимальная местная абсолютная Δ_{max} и местная относительная ϵ_{max} погрешности – 4,48 МПа и 800,7%. Отмечается также, что полученные в приближенном решении скорости истечения газа в окружающую среду (более $10\ 000\ \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) невозможны в исследуемом процессе с физической точки зрения.

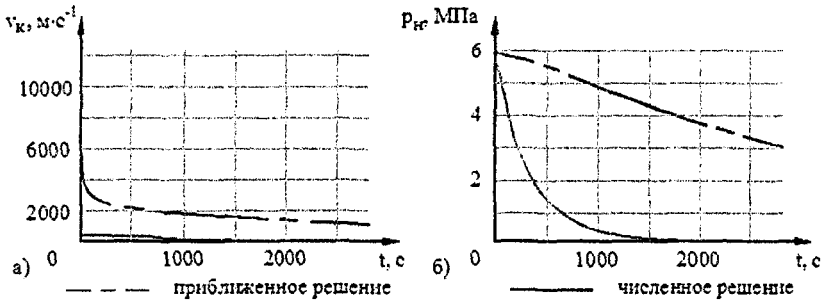


Рисунок 8 - Графики изменения параметров газового потока при большом градиенте давления: а) скорости истечения в область низкого давления; б) давления в начальном сечении

Обнаруженное существенное различие между классическим и численным решениями объясняется пренебрежением инерционными и термическими эффектами, которые из-за возникающих в газопроводе высоких скоростей течения газового потока оказывают существенное влияние на неустановившееся течение газа. Кроме того, нестационарный процесс в данном случае характеризуется широким диапазоном изменения скоростей потока газа: от нуля до скорости звука, что делает практически невозможным выбор значения константы линеаризации a , при котором с помощью уравнения теплопроводности могут быть получены результаты, близкие к точным.

Решение, найденное численным методом, в отличие от приближенного,

показало возможность возникновения колебательного движения на заключительном этапе исследуемого нестационарного процесса, рисунок 9.

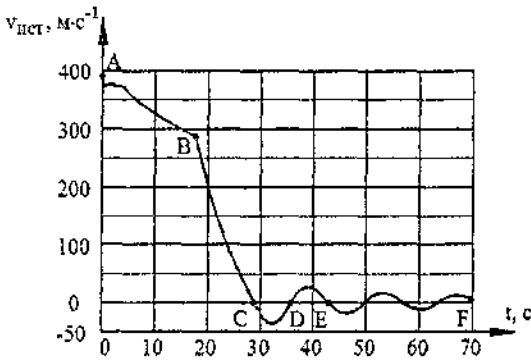


Рисунок 9 - График скорости истечения газа через аварийное сечение

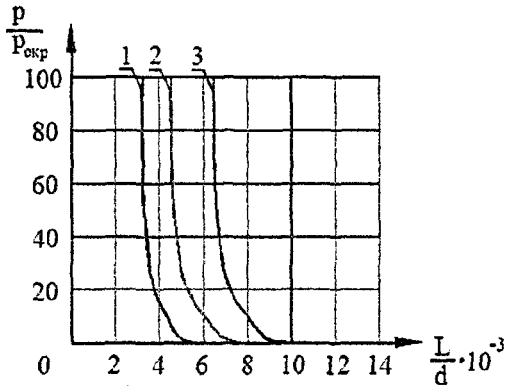
Скорость истечения потока газа через аварийное сечение изменяется во времени периодически, по закону, близкому к синусоидальному, с постепенно затухающей амплитудой. В некоторые моменты времени значение скорости становится отрицательным, что свидетельствует о подсосывании газа из окружающей среды во внутреннюю полость газопровода.

Обнаруженное явление объясняется следующим образом. Разогнанный поток газа в коротком трубопроводе обладает достаточной инерцией, которую сразу погасить нельзя. В тот момент, когда давление газа в трубопроводе оказывается равным давлению окружающей среды $p_{окр}$, скорость истечения еще положительна. В результате этого внутри трубы начинает расти разрежение. В тот момент времени, когда скорость истечения становится равной нулю (точка С), градиент давления оказывается отрицательным, и под его воздействием газ из окружающей среды всасывается в газопровод. Уместна аналогия с предварительно сжатой и отпущенной пружиной, которая по инерции минует положение равновесия и продолжает растягиваться с последующим изменением направления движения.

Если истечение природного газа из газопровода происходит в атмосфере-

ру, то во внутреннюю полость подсасывается воздух, что может привести к образованию газозвушной смеси взрывоопасной концентрации. Следует подчеркнуть, что обнаруженное явление представляет реальную опасность для работников ремонтно-восстановительных служб.

Расчеты показали, что интенсивность всасывания воздуха определяется, главным образом, следующими факторами: начальным градиентом давления в трубопроводе и вне него, протяженностью участка, площадью поперечного сечения, условиями теплообмена между газовым потоком и окружающей средой. На рисунке 10 представлена полученная с помощью программы «Разрыв» диаграмма, которая позволяет, основываясь на исходных данных, сделать вывод о существовании или отсутствии данного явления.



1 – $k = 2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; 2 – $k = 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; 3 – $k = 0,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$
Рисунок 10 - Границы существования эффекта подсасывания

Если для рассматриваемого участка газопровода точка с абсциссой, определяемой безразмерным числом, равным отношению его длины к диаметру, и ординатой, заданной соотношением давлений внутри газопровода и области, в которую происходит истечение, оказывается на представленном графике справа от кривой, построенной для соответствующих условий теплообмена, то эффект подсасывания себя не проявляет. В противном случае газ из окружающей среды попадает во внутреннюю полость трубопровода.

В главе исследован также характер изменения кольцевых напряжений вблизи вершины трещины, возникающей при разрыве газопровода, для различных скоростей ее развития. Подобные задачи рассматривались в работах Г.И. Макарова. В диссертационном исследовании расчет осуществляется методом характеристик с помощью компьютерной программы «Разрыв» с модифицированным правым граничным условием, учитывающим движение аварийного сечения с некоторой заданной скоростью $v_{тр}$. В результате проведенных вычислений была построена диаграмма изменения во времени отношения текущего кольцевого напряжения к первоначальному для различных скоростей развития трещины, рисунок 11.

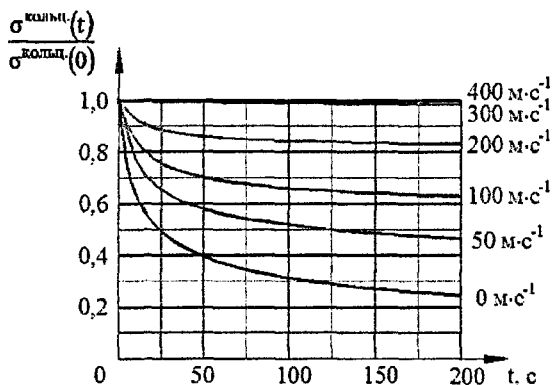


Рисунок 11 - Кольцевые напряжения в вершине трещины при различных скоростях ее движения

Зная прочностные свойства материала трубы, скорость распространения трещины, и решая соответствующую задачу механики твердых тел, можно определить с ее помощью, возможна ли и в какой момент времени остановка разрушения, обусловленная гидравлическими причинами.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Показано, что «быстрые» нестационарные процессы течения газа в газопроводе неверно описываются аналитическими решениями, основанными

ми на использовании линеаризованной системы уравнений движения газа. При линеаризации уравнений из рассмотрения исключается ряд эффектов, во многих случаях важных для понимания процесса и существенно изменяющих характер его протекания.

2. Доказано, что применение приближенных методов решения задач нестационарного течения газа в газопроводах возможно для исследования только «медленных» нестационарных процессов, характеризуемых низкими скоростями потока, малым диапазоном изменения скорости при небольших изменениях параметров исходного рабочего режима. Если эти условия не выполняются, то следует использовать численные методы. В работе даются рекомендации по выбору адекватного метода исследования неустановившегося течения газа.

3. Утверждается, что для нестационарных процессов, вызванных истечением газа из газопровода в атмосферу, характерны значительное охлаждение газового потока и широкий диапазон изменения скоростей его движения по длине участка (при истечении через отверстия, сопоставимые по своим размерам с диаметром трубы), в связи с чем использование приближенных методов для их исследования следует признать некорректным.

4. Доказывается, что продолжительность полного истечения газа из газопровода через свечу, вычисленная точными методами, в несколько раз превышает результаты приближенного решения и данные, приведенные в нормативной документации, что объясняется недостоверной схематизацией нестационарного процесса. Результаты проведенных расчетов стали основой для построения уточненной номограммы, позволяющей определять время полного истечения газа из газопровода через свечу заданного диаметра.

5. Показано, что на заключительном этапе истечения, вызванного гильотинным разрывом газопровода, при определенном сочетании геометрических характеристик опорожняемого участка, параметров рабочего режима и условий теплообмена, возможно подсасывание во внутреннюю полость

трубы атмосферного воздуха и образование в ней газовоздушной смеси взрывоопасной концентрации. Обнаруженное явление представляет серьезную опасность, вследствие чего действующие нормативные документы по ремонту и эксплуатации газопроводов необходимо дополнить положениями, учитывающими возможность его возникновения. В работе приведена построенная на основе расчетных данных диаграмма, которая позволяет сделать вывод о существовании эффекта подсосывания воздуха для данного участка газопровода при заданном рабочем режиме и условиях теплообмена с окружающей средой.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Некляев, А.В. Об одном опасном явлении, сопровождающем истечение газа из газопровода / А.В. Некляев, М.В. Лурье // Газовая промышленность. – 2008. – №1. – С. 82-84.

2. Некляев, А.В. Определение времени опорожнения газопровода / А.В. Некляев // Газовая промышленность. – 2009. – №2. – С. 20-24.

3. Некляев, А.В. Возникновение знакопеременных колебаний газа на заключительном этапе истечения из газопровода / А.В. Некляев // Известия вузов. Нефть и газ. – 2009. – №2. – С. 79-83.

4. Некляев, А.В. Моделирование процессов истечения реального газа из газопровода через отверстие в стенке трубы / А.В. Некляев // Сборник докладов Открытого научно-практического семинара молодых работников «Новые технологии в газовой промышленности. Актуальные проблемы развития газотранспортной системы» (Санкт-Петербург, 2-5 июня 2008 г.). – Санкт-Петербург, 2008. – С. 71-74.

5. Neklyaeв A. Emergency gas outlet from gas pipeline // 14th International Conference on Transport and Sedimentation of solid particles: Abstracts. – Saint Petersburg, Russia 2008. – P. 422-429.

Напечатано с готового оригинал-макета

Издательство ООО "МАКС Пресс"

Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

Подписано к печати 22.03.2010 г.

Формат 60x90 1/16. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 118.

Тел. 939-3890. Тел./Факс 939-3891

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова,
2-й учебный корпус, 627 к.