МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РУКОВОДСТВО

ПО РАСЧЕТУ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ

Р 401-80

Москва 1981

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РУКОВОДСТВО

ПО РАСЧЕТУ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ

Р 401-80

Москва 1981

УДК 622.691.47.001.2

В настоящем Руководстве изложена методика расчета газодинамических параметров при заполнении газопроводов диаметрами 1020, 1220 и 1420 мм природным газом для испытаний, приведены программа *ASTRA* для расчета на ЭВМ БЭСМ-6 процесса заполнения газопровода и приближенный аналитический метод расчета.

Руководство разработано на основе теоретических исследований и натурных наблюдений при испытаниях магистральных газопроводов лабораторией надежности конструкций и методов испытаний магистральных трубопроводов ВНИИСТа совместно с лабораторией экономического анализа проектных решений в нефтегазовом строительстве НИПИЭСУнефтегазстроя.

Руководство предназначено для инженерно-технических работников проектных и строительных организаций, занятых организацией и производством работ по испытанию газопроводов.

Руководство составили инженеры Ю.В.Колотилов, Е.М.Климовский, А.И.Тоут (ВНИИСТ), канд.техн.наук Б.Л.Кривошеин, канд.хим.наук Е.Я.Клименков, канд. техн.наук В.М.Агапкин, инж.М.Я.Куракина (НИПИЭСУнефтегазстрой). В составлении Руководства принимали участие д-р техн.наук П.И.Тугунов (Уфимский нефтяной институт), канд.техн.наук В.В.Постников (Главсибтрубопроводстрой).

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1981

ВНИИСТ, НИПИЭСУнефтегазстрой	Руководство по расчету основных параметров заполнения газопроводов газом для испытания	Р 401-80

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Руководство разработано в развитие глав СНиП П-45-75 "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования" и СНиП Ш-Д. 10-72 "Магистральные трубопроводы. Правила производства и приемки работ".

I.2. При производстве работ по заполнению магистральных газопроводов природным газом для испытаний следует учитывать требования и положения действующих нормативных документов, относящихся к пневматическому испытанию соответствующих объектов.

I.3. Одним из этапов комплекса работ по пневматическому испытанию является этап заполнения газопровода природным газом до создания в нем давления, необходимого для испытания газопровода на прочность.

I.4. Источником природного газа для испытания магистрального газопровода служат:

месторождения газа, примыкающие к газопроводу или расположенные непосредственно около него;

действующий газопровод, пересекающий строящуюся магистраль или проходящий непосредственно около нее.

I.5. Заполнение газопровода испытательной средой и подъем давления в нем могут производиться как по отдельным участкам, так и по всему объекту (на рис.I приведены принципиальные схемы заполнения магистрального газопровода газом для последующего испытания).

I.6. При пневматическом испытании газопроводов скорость подъема давления в них регламентирована СНиП Ш-Д. 10-72.

I.7. При испытании на прочность и герметичность для измерения давления применяют манометры класса точности не ниже I,5.

Внесено ЛНИТ ВНИИСТа и ЛЭАПР НИПИЭСУнефтегазстроя	Утверждено ВНИИСТом 3 июля 1980 г.	Разработано впервые

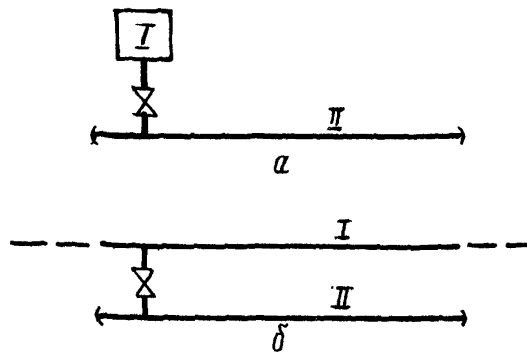


Рис.I. Принципиальная схема заполнения участка магистрального трубопровода природным газом для испытания:

а-от промысла; б-из действующего газопровода; I-источник газа; II-заполняемый участок

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ГАЗОПРОВОДА ГАЗОМ

2.I. Система, описывающая нестационарное неизотермическое течение газа внутри заполняемого газопровода (постоянного диаметра D) имеет следующий вид:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial x} = 0; \qquad (1)$$

уравнение импульсов:

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(P + \rho w^2) = -\rho\left(gH' + \frac{\lambda w^2}{2D}\right); \qquad (2)$$

уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(u + \frac{w^2}{2}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho w\left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{w^2}{2}\right)\right] = \frac{4q}{D} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\xi \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \rho g w H'; \qquad (3)$$

уравнение состояния:

$$\frac{P}{\rho} = z R T \qquad (4)$$

В уравнениях (I) – (4) приняты обозначения:

P – среднее по сечению трубы давление газа, Н/м^2;
ρ – средняя по сечению трубы плотность газа, кг/м^3;
w – средняя по сечению трубы скорость газа, м/с;
λ – коэффициент гидравлического сопротивления;
q – плотность теплового потока через стенку трубы, Вт/м^2;
T – средняя по сечению трубы температура газа, К;
u – удельная внутренняя энергия газа, м^2/с^2;
z – коэффициент сжимаемости газа;
R – газовая постоянная, Дж/кг.К;
H – геометрическая высота центра тяжести рассматриваемого элемента объема газа, м;
g – ускорение свободного падения, м/с^2;
D – диаметр заполняемого трубопровода, м;
ξ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/м·К;
x – координата вдоль оси трубы, м;
t – время, с.

2.2. Для получения искомых параметров (давления, температуры и расхода) при заполнении газопровода газом используем нелинейные дифференциальные уравнения (I) – (4), при этом принимаем следующие допущения:

теплопередача вдоль оси трубопровода за счет теплопроводности газа отсутствует;

в уравнениях количества движения и энергии пренебрегаем конвективным членом $w\frac{\partial w}{\partial x}$ и локальной производной $\frac{\partial w}{\partial t}$;

не учитываем изменение геометрической высоты H.

2.3. Закон теплообмена между стенкой трубы и грунтом принимаем в форме Ньютона:

$$q = -K\left(T - T_{гр}\right), \qquad (5)$$

где $T_{гр}$ - температура грунта, К;

K - коэффициент теплопередачи от газа в грунт, Вт/м^2.К.

2.4. Для определения коэффициента сжимаемости реального газа используем аналитическую зависимость $z = z(P,T)$ типа Бертло, справедливую в закритической области температур и при умеренных давлениях (до 98,1·10^5 Н/м^2):

$$z = 1 + 0{,}07\frac{P T_{кр}}{P_{кр} T}\left[1 - 6\left(\frac{T_{кр}}{T}\right)^2\right], \qquad (6)$$

где $P_{кр}$ - критическое давление газа, Н/м^2;

$T_{кр}$ - критическая температура газа, К.

2.5. Коэффициент гидравлического сопротивления λ как функции числа Рейнольдса, диаметра и гидравлической шероховатости определяем по формулам:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{при } Re \le 2000; \qquad (7)$$

$$\lambda = 0{,}0025\cdot(Re)^{\frac{1}{3}} \quad \text{при } 2000 < Re \le 4000; \qquad (8)$$

$$\lambda = 0{,}3164\cdot\left(Re\right)^{-0{,}25} \quad \text{при } 4000 < Re \le Re_1; \qquad (9)$$

$$\lambda = 0{,}1\left(1{,}46\frac{K_э}{D} + \frac{100}{Re}\right)^{0{,}25} \quad \text{при } Re_1 < Re \le Re_2; \qquad (10)$$

$$\lambda = 0{,}111\left(\frac{K_э}{D}\right)^{0{,}25} \quad \text{при } Re_2 < Re, \qquad (11)$$

$$Re = \frac{4G}{\pi g \mu D}, \qquad (12)$$

$$Re_1 = \frac{59,5}{\left(\frac{2K_э}{D}\right)^{8/7}}\ ; \qquad (I3)$$

$$Re_2 = \frac{665 - 765 \cdot lg\left(\frac{2K_э}{D}\right)}{\frac{2K_э}{D}}\ , \qquad (I4)$$

где Re - число Рейнольдса;
Re_1, Re_2 - переходные числа Рейнольдса;
$K_э$ - эквивалентная гидравлическая шероховатость, м;
μ - коэффициент динамической вязкости, Н·с/м^2;
G - расход газа, Н/с.

2.6. Чтобы найти однозначное решение системы уравнений (I) - (4), описывающих процесс заполнения газопровода газом для испытаний, необходимо задать начальные и граничные условия.

В качестве начальных условий в практических расчетах задаем распределение давления (P), температуры (T) и расхода газа (G) по длине газопровода в начальный момент времени:

$$P(x,0) = P_н\ , \quad T(x,0) = T_н\ , \quad G(x,0) = G_н\ . \qquad (I5)$$

В качестве граничных условий задаем изменение давления и температуры газа в начале заполняемого участка и расхода в конце заполняемого участка в зависимости от времени.

На рис.2 приведен график изменения давления в начале ($x = 0$) заполняемого участка трубопровода. Аналитическую зависимость изменения давления газа во времени принимаем следующей:

$$P(0,t) = \begin{cases} P_н + \alpha t & \text{при} \quad P(0,t) < P_{исп}\ , \\ P_{исп} & \text{при} \quad P(0,t) \geq P_{исп}\ , \end{cases} \qquad (I6)$$

где α - скорость подъема давления в сечении x = 0, Н/с·м^2;
$P_{исп}$ - испытательное давление, Н/м^2;
$P_н$ - начальное давление газа, Н/м^2.

Граничное условие для температуры газа в сечении x = 0 принимаем в виде:

$$T(0,t) = T_0 - D_i \left[P_0 - P(0,t) \right] , \qquad (17)$$

где D_i - коэффициент Джоуля–Томсона, $м^2 \cdot К/Н$;
P_0 - давление газа в источнике испытательной среды, $Н/м^2$;
T_0 - температура газа в источнике испытательной среды, К.

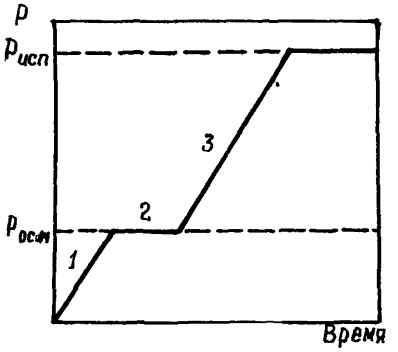


Рис.2. График изменения давления в начале заполняемого трубопровода ($x = 0$):
1-подъем давления до $P_{осм}$; 2-осмотр трубопровода; 3 - подъем давления до $P_{исп}$

При заполнении замкнутого участка магистрального газопровода граничным условием для расхода газа в конце заполняемого участка будет

$$G(L,t) = 0 . \qquad (18)$$

2.7. В качестве исходных данных для расчета газодинамических параметров зададим следующие величины:
L - протяженность заполняемого участка, м;
D - диаметр заполняемого газопровода, м;
$P_{кр}$ - критическое давление газа, $Н/м^2$;

$T_{кр}$ - критическую температуру газа, К;
$K_э$ - эквивалентную гидравлическую шероховатость, м;
μ - коэффициент динамической вязкости газа, Н·с/м^2;
K - коэффициент теплопередачи от газа в грунт, Вт/м^2·К;
R - газовую постоянную, Дж/кг·К;
C_p - теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/кг·К;
D_i - коэффициент Джоуля-Томсона, м^2·К/Н;
$P_{исп}$ - испытательное давление, Н/м^2;
$P_н$ - начальное давление газа в заполняемом участке, Н/м^2;
$T_{гр}$ - температуру грунта, К;
P_0 - давление газа в источнике испытательной среды, Н/м^2;
T_0 - температуру газа в источнике испытательной среды, К;
α - скорость подъема давления в сечении $x = 0$, Н/м^2·с.

Сечение $X = 0$ принимаем за начало заполняемого трубопровода, т.е. сечение $X = 0$ соответствует месту подключения источника испытательной среды, а сечение $X = L$ является концом заполняемого участка.

2.8. Дифференциальные уравнения (I) - (4), описывающие газодинамические процессы, происходящие внутри заполняемого участка газопровода, аппроксимируются замкнутой системой алгебраических соотношений, которая решается при помощи комбина - ций явной и неявной схем метода сеток.

Длину заполняемого участка газопровода разбивают на ($N-1$) равных интервалов. В связи с тем, что использована явная схема метода сеток, длина интервалов ограничена, т.е. увеличение числа интервалов ведет либо к неустойчивому вычислительному процессу, либо к существенному увеличению времени машинного счета.

Уравнения движения вместе с начальными и граничными условиями, представленные в разностном виде, образуют систему алгебраических уравнений для каждого момента времени. Последо - вательное решение этих систем уравнений на каждом шаге по времени позволяет определить значения искомых газодинамических функций P, T, G во всех дискретных точках-узлах по длине трубопровода.

2.9. Алгоритм расчета (прил.I) газодинамических парамет-

ров при заполнении участка магистрального трубопровода газом для последующего испытания построен таким образом, что на первом этапе расчет ведется по явной схеме метода сеток.

Величина расхода газа по длине заполняемого участка постепенно возрастает от нулевого до некоторого значения, при котором можно перейти к абсолютно устойчивому вычислительному процессу по неявной схеме метода сеток.

Окончание расчета соответствует моменту, когда по всей длине трубопровода давление газа будет равно испытательному давлению с учетом погрешности измерительной аппаратуры, т.е.:

$$P(0,L) - P(L,t) = 0{,}005 \cdot P_{исп} \qquad (19)$$

2.10. Расчет газодинамических параметров (давления, температуры, расхода) в процессе заполнения участка магистрального газопровода газом для испытания выполняется по программе *ASTRA*.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА НА ЭВМ

2.11. Алгоритм программы *ASTRA* и подпрограмм *PROGON F1*, *ALAM* реализован в виде программы на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6 (прил.2).

В программе *ASTRA* приняты следующие обозначения, приведенные в табл.1.

Таблица 1

Символы алгоритма	Идентификаторы программы	Наименование параметров и массивов
L	*AL*	Протяженность заполняемого участка
D	*D*	Диаметр заполняемого трубопровода
$P_{исп}$	*P1MAX*	Испытательное давление
$T_{кр}$	*TC*	Критическая температура газа
$P_{кр}$	*PC*	Критическое давление газа

Продолжение табл.I

Символ алгоритма	Идентификаторы программы	Наименование параметров и массивов
$T_{гр}$	TGR	Температура грунта
P_0	PCEP	Давление в источнике испытательной среды
T_0	TCEP	Температура газа в источнике испытательной среды
$P_н$	PH	Начальное давление газа в заполняемом трубопроводе
$T_н$	TH	Начальная температура газа в заполняемом участке газопровода
$G_н$	GH	Начальный расход газа в заполняемом трубопроводе
D_i	DR	Коэффициент Джоуля-Томсона
κ	AK	Коэффициент теплопередачи
λ	ALAM	Коэффициент гидравлического сопротивления
z	Z	Коэффициент сжимаемости газа
α	ALFF	Скорость подъема давления
q	Q	Плотность теплового потока через стенку трубы
$P(0,t)$	F1(X)	Граничное условие для давления
$T(0,t)$	F2(X)	Граничное условие для температуры
$G(L,t)$	GN(N)	Граничное условие для расхода
$\left(\frac{\partial z}{\partial p}\right)_T$	ZP	Вспомогательные функции
$\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p$	ZT	
Re	RE	Числа Рейнольдса
Re_1	RE1	
Re_2	RE2	
$N-1$	N-1	Число интервалов разбиения области интегрирования
h	H	Шаг по координате при численном интегрировании
τ	TAU	Шаги по времени при численном интегрировании
	TAUN	

Окончание табл.I

Символ алгоритма	Идентификаторы программы	Наименование параметров и массивов
—	I	Рабочие переменные целого типа
—	J	
—	NT	
—	NP	
—	NPX	

2.I2. В программе *ASTRA* (см.прил.2) приняты следующие значения термодинамических величин (газ - метан):

R = 5I5 Дж/кг·К - газовая постоянная;

C_p = 2930 Дж/кг·К - теплоемкость газа при постоянном давлении;

$P_{кр}$ = 44,5·I0^5 Н/м^2 - критическое давление газа;

$T_{кр}$ = I90,7 К - критическая температура газа;

D_i = 4,08·I0^{-6} м^2·К/Н - коэффициент Джоуля-Томсона.

2.I3. При заполнении трубопровода природным газом с другими термодинамическими характеристиками необходимо изменить коэффициенты AI, A2, A3, A4, A5 в соответствии с формулами:

$$AI = \frac{2R\lambda}{\pi^2 g^2 D^5}; \qquad (20)$$

$$A2 = \frac{\pi g D^2}{4R}; \qquad (21)$$

$$A3 = \frac{4R^2}{\pi g C_p D^2}; \qquad (22)$$

$$A4 = \frac{4R}{C_p D}; \qquad (23)$$

$$A5 = \frac{R}{C_p}. \qquad (24)$$

2.I4. При реализации программы расчета газодинамических параметров на ЭВМ на печать выводим значения давления (PP),

температуры (TT) и расхода (GG) газа внутри заполняемого газопровода в дискретных точках-узлах по длине трубопровода во времени (TIME).

Для каждого момента времени (TIME) значения найденных функций P, T и G печатаются построчно (прил.3). Количество выдаваемых на печать точек определяется значением операторов NPX (по координате X) и NP (по времени).

2.I5. Размерность выводимых на печать значений:

PP - давление, кгс/см^2;

TT - температура, К;

GG - расход, м^3/ч;

TIME - время, ч.

2.I6. Первое число в строке (см.прил.3), определяющее величину данного параметра (PP), (TT), (GG), соответствует сечению $X = 0$.

Для определения расстояния между следующим сечением, в котором выдаются на печать рассчитанные параметры, и началом заполняемого участка ($X = 0$) следует воспользоваться формулой

$$\ell = \frac{(n-1)\cdot L}{N-1}\ NPX, \qquad (25)$$

где n - порядковый номер числа в соответствующей строке (PP), (TT), (GG);

L - протяженность участка;

$(N-1)$ - количество интервалов разбиения области интегрирования;

NPX - количество точек (узлов), через которое печатаются рассчитываемые параметры ($NPX = I$ - параметры печатаются во всех точках, $NPX = 2$ - через две, начиная с точки $X = 0$, и т.д.).

3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

3.I. Изотермический процесс заполнения замкнутого участка трубопровода постоянного диаметра природным газом до испытательного давления описывает система уравнений (26) - (28), которая вытекает из системы уравнений (I)-(4) при $T = const$

уравнение нераарывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial x} = 0; \qquad (26)$$

уравнение движения:

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(p + \rho w^2\right) = -\rho \frac{\lambda w^2}{2D}; \qquad (27)$$

уравнение состояния газа:

$$p = \rho c^2 . \qquad (28)$$

В уравнениях (26) - (28) приняты обозначения:

ρ - средняя по сечению трубы плотность газа, кг/м^3;
w - средняя по сечению трубы скорость движения газа, м/с;
p - среднее по сечению трубы давление газа, Н/м^2;
λ - коэффициент гидравлического сопротивления;
D - диаметр заполняемого трубопровода, м;
c - скорость звука в газа, м/с.

3.2. Аналитические расчетные формулы получим, приняв для решения системы уравнений (26) - (28) следующие допущения:

пренебрегаем конвективным членом $\frac{\partial (\rho w^2)}{\partial x}$;

пренебрегаем изменением массовой скорости (ρw) во времени, т.е. $\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} = 0$;

принимаем коэффициент гидравлического сопротивления постоянным $\lambda = const$.

3.3. В качестве начальных условий для рассматриваемой системы уравнений принимаем постоянное давление по длине трубопровода

$$p(x,0) = p_н . \qquad (29)$$

3.4. Граничные условия, отражающие процесс подъема давления по линейному закону на левом конце трубопровода ($X=0$) и перекрытия правого конца при заполнении газопровода газом, приняты следующими (рис.3):

$$p(0,t)=\begin{cases} P_н + \alpha \cdot t & \text{при } 0 < t < t_0 ; \\ P_{исп} & \text{при } t \geq t_0 ; \end{cases} \qquad (30)$$

$$\left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{x=L} = 0 , \qquad (31)$$

где α - скорость подъема давления во входном сечении заполняемого участка трубопровода

$$t_0 = \frac{P_{исп} - P_н}{\alpha} .$$

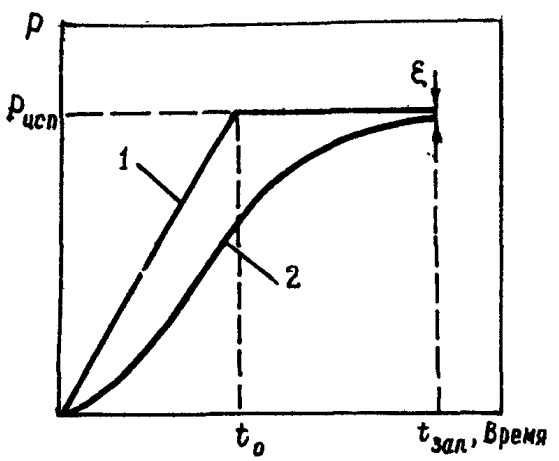


Рис.3. График изменения давления газа (Р) при заполнении участка магистрального газопровода газом для испытания:

I - изменение давления в сечении $x = 0$;
2 - изменение давления в сечении $x = L$

3.5. Изменение давления газа в заполненном трубопроводе подчиняется соотношению, которое было найдено в результате решения линеаризованной системы уравнений (26) - (28) при соответствующих начальных и граничных условиях:

$$P(x,t)=\begin{cases} P_н+\alpha t-\dfrac{2\alpha}{aL}\cdot\sum\limits_{n=0}^{\infty}\dfrac{\sin(\kappa_n x)}{\kappa_n^3}\left[1-\exp\left(-a\kappa_n^2 t\right)\right] & при\ \ 0<t<t_0\ ; \\ P_{исп}-\dfrac{2\alpha}{aL}\cdot\sum\limits_{n=0}^{\infty}\dfrac{(-1)^n}{\kappa_n^3}\left[\exp\left(a\kappa_n^2 t_0\right)-1\right]\cdot\exp\left(-a\kappa_n^2 t\right) & при\ t\geq t_0, \end{cases} \quad (32)$$

где $$a=\frac{1}{\tau_0\cdot\kappa_n^2}\ ; \quad (33)$$

$$\tau_0=\frac{2\alpha\lambda L^3}{3\pi^2 c^2 D P_{эфф}}\ ; \quad (34)$$

$$\kappa_n=\frac{\pi(2n+1)}{2L}\ ; \quad (35)$$

$$t_0=\frac{P_{исп}-P_н}{\alpha}\ . \quad (36)$$

$P_{эфф}$ = 3,92·I0^5 Н/м^2 - эффективное давление, значение которого получено из численных расчетов газодинамических параметров при заполнении трубопроводов газом на ЭВМ.

3.6. С достаточной степенью точности для приближенного аналитического описания изменения давления газа внутри заполняемого участка можно ограничиться первым членом разложения (n = 0):

$$P(x,t)=\begin{cases} P_н+\alpha t-\dfrac{2\alpha\sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right)}{aL\kappa_0^2}\cdot\left[1-\exp\left(-a\kappa_0^2 t\right)\right] & при\ 0<t<t_0\ ; \\ P_{исп}-\dfrac{2\alpha}{aL\kappa_0^3}\left[\exp\left(a\kappa_0^2 t_0\right)-1\right]\cdot\exp\left(-a\kappa_0^2 t\right) & при\ t\geq t_0\ . \end{cases} \quad (37)$$

Изменение давления газа в конце заполняемого участка определяем по формуле:

$$P(l\ t)=\begin{cases} p_н+\alpha t-\dfrac{4\alpha\tau_a}{\pi}\left[1-exp\left(-\dfrac{t}{\tau_o}\right)\right] & \text{при } 0<t<t_o; \\ p_{исп}-\dfrac{4\alpha_1\tau_a}{\pi}\left[exp\left(\dfrac{t_a}{\tau_o}\right)-1\right]\cdot exp\left(-\dfrac{t}{t_o}\right) & \text{при } t\geqslant t_o\,. \end{cases} \qquad (38)$$

3.7. Задаваясь допустимой погрешностью измерения давления в конце трубопровода $(\mathcal{E})$ (см.рис.3)

$$\mathcal{E}=p_{исп}-p(L,t), \qquad (39)$$

получаем выражение для времени заполнения данного участка магистрального трубопровода

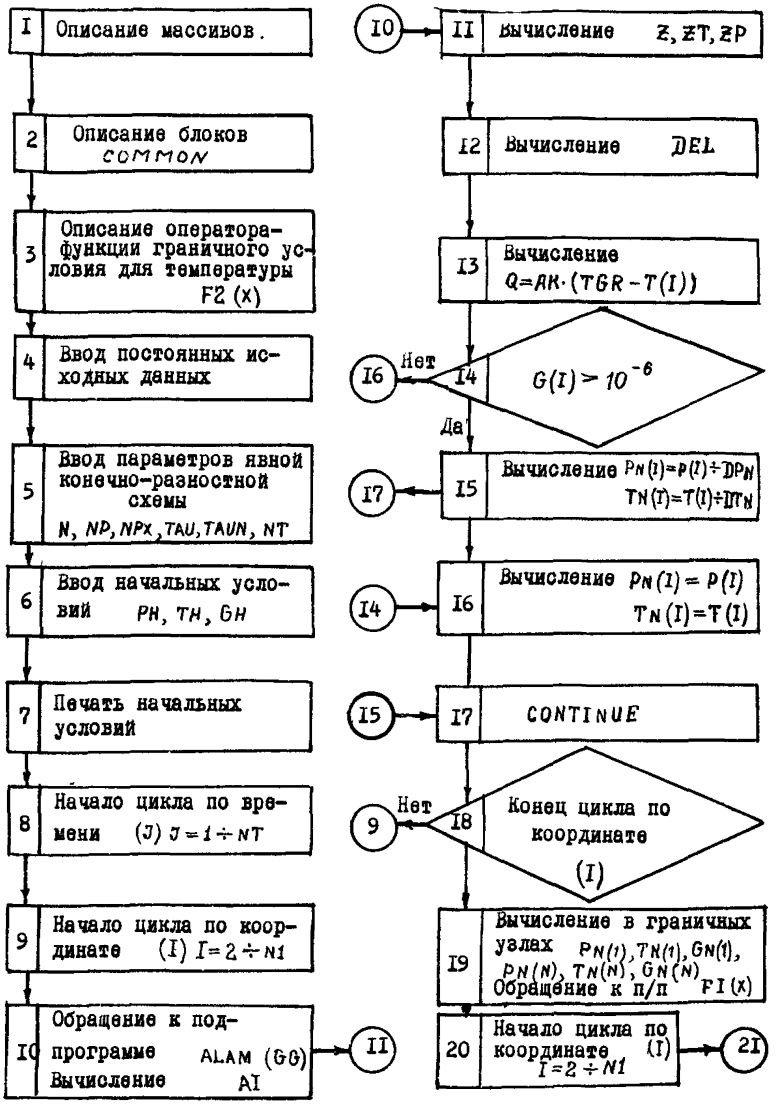
$$t_{зап}=\frac{2\alpha\lambda L^3}{3\pi^2c^2Dp_{эфф}}\cdot ln\left\{\frac{8\alpha^2\lambda L^3\left[exp\left(\dfrac{3t_o\pi^2c^2Dp_{эфф}}{2\alpha\lambda L^3}\right)-1\right]}{3\mathcal{E}c^2D\pi^3p_{эфф}}\right\}. \qquad (40)$$

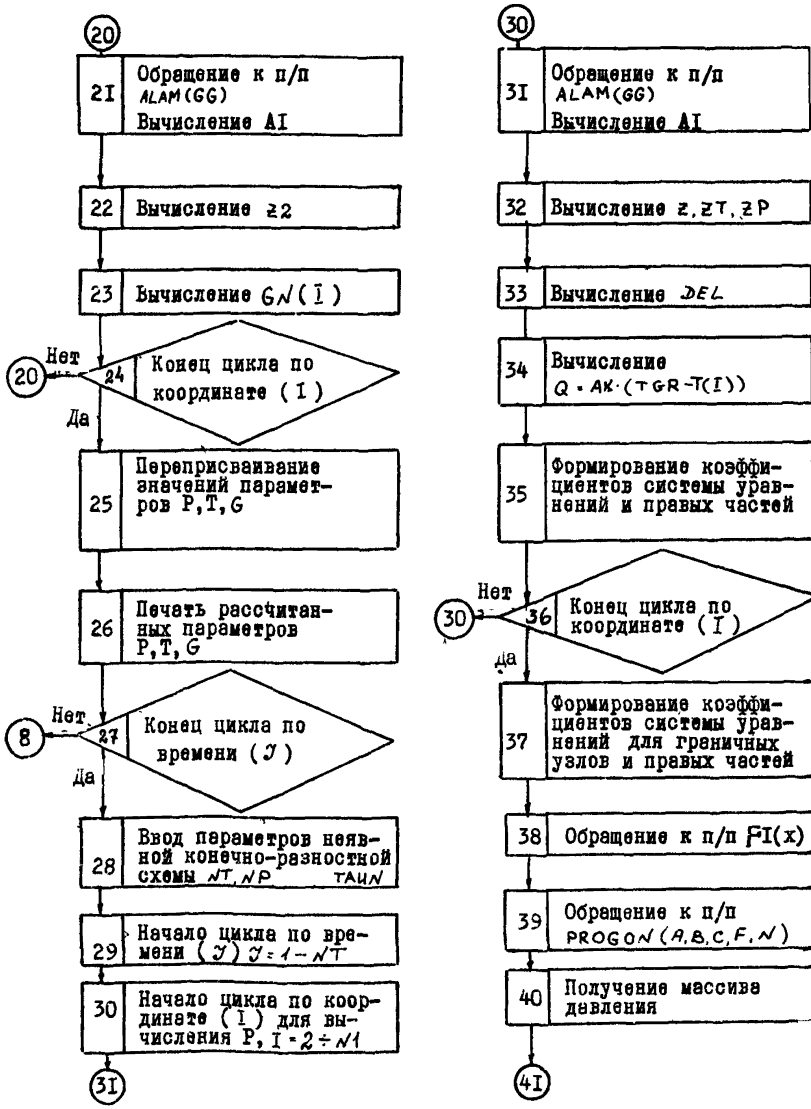
3.8. Пример приближенного аналитического расчета газодинамических параметров в процессе заполнения участка магистрального трубопровода природным газом для испытания приведен в прил.4.

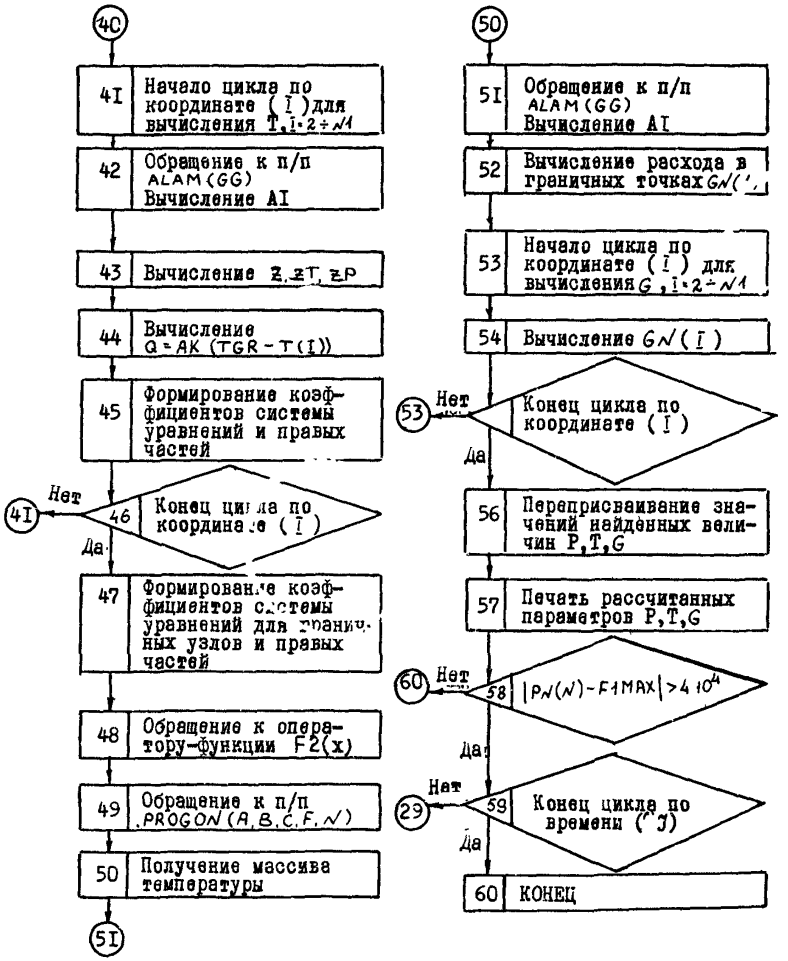
ПРИЛОЖЕНИЯ

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ *ASTRA* И ПОДПРОГРАММ *PROGON, FI, ALAM.*

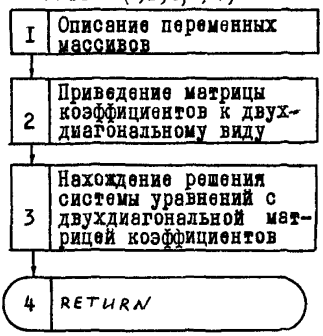
АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ *ASTRA*



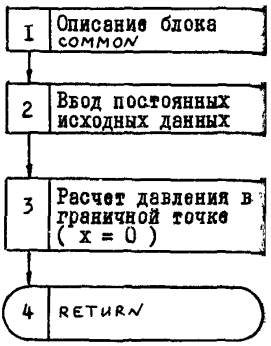

20
21
Обращение к п/п ALAM(GG) Вычисление AI
22
Вычисление z2
23
Вычисление GN(I)
Нет
20
24
Конец цикла по координате (I)
Да
25
Переприсваивание значений параметров P,T,G
26
Печать рассчитанных параметров P,T,G
Нет
8
27
Конец цикла по времени (J)
Да
28
Ввод параметров неявной конечно-разностной схемы NT,NP TAUN
29
Начало цикла по времени (J) J=1-NT
30
Начало цикла по координате (I) для вычисления P, I=2÷N1
31
30
31
Обращение к п/п ALAM(GG) Вычисление AI
32
Вычисление z, zT, zP
33
Вычисление DEL
34
Вычисление Q=AK·(TGR-T(I))
35
Формирование коэффициентов системы уравнений и правых частей
Нет
30
36
Конец цикла по координате (I)
Да
37
Формирование коэффициентов системы уравнений для граничных узлов и правых частей
38
Обращение к п/п FI(x)
39
Обращение к п/п PROGON(A,B,C,F,N)
40
Получение массива давления
41


40
41
Начало цикла по координате (I)для вычисления T, I=2÷N1
42
Обращение к п/п ALAM(GG) Вычисление AI
43
Вычисление Σ,ΣT, ΣP
44
Вычисление Q=AK(TGR-T(I))
45
Формирование коэффициентов системы уравнений и правых частей
46
Конец цикла по координате (I)
Нет
41
Да
47
Формирование коэффициентов системы уравнений для граничных узлов и правых частей
48
Обращение к оператору-функции F2(x)
49
Обращение к п/п PROGON(A,B,C,F,N)
50
Получение массива температуры
51
50
51
Обращение к п/п ALAM(GG) Вычисление AI
52
Вычисление расхода в граничных точках GN(1)
53
Начало цикла по координате (I) для вычисления G, I=2÷N1
54
Вычисление GN(I)
53
Нет
Конец цикла по координате (I)
Да
56
Переприсваивание значений найденных величин P,T,G
57
Печать рассчитанных параметров P,T,G
60
Нет
58
|PN(N)-F1MAX|>4·10⁴
Да
Нет
29
59
Конец цикла по времени (TJ)
Да
60
КОНЕЦ

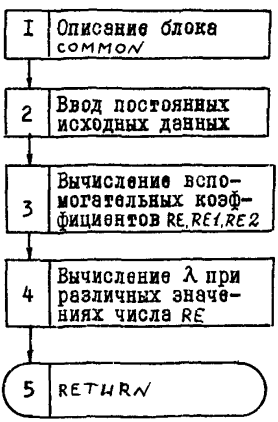
Алгоритм подпрограммы PROGON (A,B,C,F,N)



Алгоритм подпрограммы F1 (X)



Алгоритм подпрограммы ALAM (GG)



Приложение 2

ПРОГРАММА *ASTRA* НА АЛГОРИТМИЧЕСКОМ ЯЗЫКЕ ФОРТРАН ДЛЯ РАСЧЕТА НА ЭВМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

```
      PROGRAM ASTRA
      DIMENSION PN(100),TN(100),GN(100),P(100),T(100),G(100)
     *,PP(100),TT(100),GG(100),A(100),B(100),C(100),F(100)
     *,ALAMN(100)
      COMMON /BL/D
      COMMON /BL1/F1MAX
      COMMON /BL2/TH
      COMMON /BL3/PH
      COMMON /BL4/ALFF
      F2(X)=TCEP-DR*(PCEP-F1(X))
      AL=5.E5
      D=1.42
      ALFF=81.75
      F1MAX=809.325E4
      PH=9.81E4
      PH=19.62E4
      TH=275.
      GH=0.
      TGR=275.
      PCEP=833.85E4
      TCEP=280
      DR=4.08E-6
      AK=9.31
      PC=445.374E4
      TC=190.7
      N=31
      NPX=3
      NPX=5
      TAU=.01
      NP=10000
      A1=676.86E-5
      A2=1.495E-2*D**2
      A3=11.7556/D**2
      A4=.703/D
      A5=.1757
      N1=N-1
      H=AL/N1
      NT=20000
      DO 2 I=1,N
      P(I)=PH
      T(I)=TH
      G(I)=GH
2     CONTINUE
      DO 76 III=1,N
      PP(III)=P(III)/9.81E4
      TT(III)=T(III)
76    GG(III)=511.8*G(III)
      PRINT 40
```

```
 44   FORMAT  (' PP=')
      PRINT  4,(PP(III),III=1,N,NPX)
  4   FORMAT  (10E12.4)
      PRINT  50
 54   FORMAT  (' TT=')
      PRINT  4,(TT(III),III=1,N,NPX)
      PRINT  60
 64   FORMAT  (' GG=')
      PRINT  4,(GG(III),III=1,N,NPX)
      DO  3  J=1,NT
      DO  1  I=2,N1
      A1=4.342*ALAM(G(I))/D**5
      Z=1.+.07*TC*P(I)*(1.-6.*(TC/T(I))**2)/(PC*T(I))
      ZT=-.07*TC*P(I)*(1.-6.*(TC/T(I))**2)/(PC*T(I)**2)+
     *.84*TC**3*P(I)/(PC*T(I)**4)
      ZP=.07*(TC/PC)*(1./T(I))*(1.-6.*(TC/T(I))**2)
      DEL=1.-P(I)*ZP/Z-A5*(Z+T(I)*ZT)**2/Z
      Q=AK*(TGR-T(I))
      IF(ABS(G(I))-1.E-6)9,9,8
  8   DPN=TAU/DEL*((P(I-1)**2-2.*P(I)**2+P(I+1)**2)/(2.*A1*G(I)
     **H**2)-G(I)*(Z+T(I)*ZT)*(T(I)-T(I-1))/H+G(I)*T(I)*ZP*
     *(P(I+1)-P(I))/H)/(2.*A2)-(Z+T(I)*ZT)*(A1*A3*G(I)**3*T(I)**3
     **Z*ZT/P(I)**2-A4*Q))
      PN(I)=P(I)+DPN
      DTN=TAU*T(I)/(DEL*P(I))*((A5*(Z+T(I)*ZT)*(P(I-1)**2-2.*
     *P(I)**2+P(I+1)**2)/(2.*A1*G(I)*H**2)+G(I)*((Z+T(I)*T)**2
     **A5+2.*(P(I)*ZP-Z))*(T(I)-T(I-1))/H+G(I)*T(I)*ZP*A5*(Z+T(I)
     **ZT)*(P(I+1)-P(I))/H)/(2.*A2)+(P(I)*ZP-Z)*(A1*A3*G(I)**3*
     *T(I)**3*Z*ZT/P(I)**2-A4*Q))
      TN(I)=T(I)+DTN
      GO  TO  10
  9   DPN=TAU/DEL*(A4*Q*(Z+T(I)*ZT))
      PN(I)=P(I)+DPN
      DTN=TAU*T(I)/(DEL*P(I))*(A4*Q*(Z-P(I)*ZP))
      TN(I)=T(I)+DTN
 10   CONTINUE
  1   CONTINUE
      PN(1)=F1(J*TAU)
      TN(1)=F2(J*TAU)
      A1=4.342*ALAM(G(1))/D**5
      Z1=1.+.07*TC*PN(1)*(1.-6.*(TC/TN(1))**2)/(PC*TN(1))
      GN(1)=SIGN(1.,(3.*PN(1)+PN(3)-4.*PN(2)))*SQRT(ABS(4.*PN(2)
     ***2-3.*PN(1)**2-PN(3)**2)/(4.*H*A1*Z1*TN(1)))
      PN(N)=PN(N1)
      ZN=1.+.07*TC*P(N)*(1.-6.*(TC/T(N))**2)/(PC*T(N))
      ZTN=-.07*TC*P(N)*(1.-6.*(TC/T(N))**2)/(PC*T(N)**2)+
     *.84*TC**3*P(N)/(PC*T(N)**4)
      QN=AK*(TGR-T(N))
      B9=P(N)/(T(N)*A5*(ZN+T(N)*ZTN))
      CC=P(N)*(1.-1./(A5*(ZN+T(N)*ZTN)))-TAU*ZN*A4*QN/
     *(A5*(ZN+T(N)*ZTN))
      TN(N)=(PN(N)-CC)/BB
      GN(N)=0.
      DO 11 I=2,N1
      A1=4.342*ALAM(G(I))/D**5
      Z2=1.+.07*TC*PN(I)*(1.-6.*(TC/TN(I))**2)/(PC*TN(I))
      GN(I)=SIGN(1.,(PN(I+1)-PN(I-1)))*SQRT(ABS(PN(I+1)**2-
```

```
     .PN(I-1)**2)/(4.*H*A.*Z2*TN(I)))
11   CONTINUE
     DO   7  I=1,N
       T(I)=TN(I)
       P(I)=PN(I)
       G(I)=GN(I)
     PP(I)=P(I)/9.81E4
       TT(I)=T(I)
   7 GG(I)=511.8*G(I)
     TIME=TAU*J/3600.
     IF(G(N1).NE.0.)
    -                    GO  TO  77
   3 CONTINUE
  77 CONTINUE
     PRINT  61,TIME
  61 FORMAT  (' TIME=',E10.4)
     PRINT  40
     PRINT  4,(PP(III),III=1,N,NPX)
     PRINT  50
     PRINT  4,(TT(III),III=1,N,NPX)
     PRINT  60
     PRINT  4,(GG(III),III=1,N,NPX)
     NT=32000
     NP=40
     TAUN=180.
     DO   1 J=1,NT
     DO   101 I=2,N1
     A1=4.342*ALAM(G(I))/D**5
     Z=1.+.07*(TC/PC)*(P(I)/T(I))*(1.-6.*(TC/T(I))**2)
     ZT=1.07*(TC/PC)*(P(I)/T(I)**2)*(1.-6.*(TC/T(I))**2)+
    .84*(TC**3/PC)*(P(I)/T(I)**4)
     ZP=.6/*(TC/PC)*(1./T(I))*(1.-6.*(TC/T(I))**2)
     DEL=1.-P(I)*ZP/Z-A5*(Z+T(I)*ZT)**2/Z
     G=A1*TCR*T(I)
     AK2=P(I)/Z.*A1*A2*G(I)*DEL
     AK3=-((P(I+1)-P(I))/H)**2/2.*A1*A2*G(I)-G(I)*Z*T(I)*ZT*
    *ZT*T(I-1))/2.*AK2*G(I)*T(I)*ZP*(P(I+1)-P(I))/12.*
    *AK2*(Z*T(I-1)*ZT)*(A1*AK2*G(I)**3*T(I)**2*Z*ZT/P(I))**2-
    **AK2*G/DEL
     A(1)=1.
     B(1)=H**2/(AK2*TAUN)*2.
     C(1)=1.
     F(1)=H**2*(AK3*TAUN*P(I))/(AK2*TAUN)
101  CONTINUE
     E(1)=1.
     C(1)=2.
     F(1)=F(1)-P(1)
     A(N)=1.
     B(N)=1.
     F(N)=0.
     CALL  PENTA(N,E,C,F,A,
    .B,AK2,  1.,
    *2 P(1)=F(1)
     DO  123  I=2,N1
     P(I)=P(I)+AK4*(G(I)  )**2
```

```
      Z=1.+.07* TC/PC)*(PN(I)/T(I))*(1.-6.*(TC/T(I))**2)
      ZT=-.07*(TC/PC)*(PN(I)/T(I)**2)*(1.-6.*(TC/T(I))**2)+
     *.34*(TC**3/PC)*(PN(I)/T(I)**4)
      ZP= 07* TC PC)*(1./T(I))*(1.-6.* TC/T(I))**2)
      Q=AK*(TGR-T(I))
      AK=(A5*(Z T(I)*ZT *PN(I-1)**2-2.*PN(I)**2+PN(I+1.**2
     *(2.*A1*A2*G(I)*H**2)+G(I)*T(I)*ZP*(Z+T(I)*ZT)*A5*(PN 1
     *PN I))/2.*A2*H)+(A1*A3*G(I)**3*T(I)**3*Z*ZT/PN I)**2-A
     *(PN(I)*ZP-Z))*T(I), PN(I)* 1.-PN(I)*ZP/Z-A5*(Z+T I **2
      AK=(Z+T I)*ZT)**2*A5+2.*(PN(I)*ZP-Z))*T(I)*G /(A *A
     *PN I)*(1.-PN I)*ZP/Z-A5*(Z+T(I)*ZT)**2/Z))
      A(1)=-1.
      B(1)=1.-H/ AK5*TA N)
      C(1)=0.
      F(1) =-(AK4*TA N+T(I))*H/(A 5*TA N)
  103 CONTINUE
      b(1) =1.
      C(1) =1.
      F(1) =2(TA N*J)
      A(N) =-1.
      B N) =1.
      F N) =1.
      CALL PROCUN(A,B,C,F,T)
      DO 104 I=1 N
  104 TN(I)=F(I)
      A1=4.*42*A AM(G(1)/J**5
      Z1=1.+. 7* TC/PC)*(PN(1)/TN(1))* 1.-6.*(TC/TN )**
      GN(1) =SIG 1.,(3*PN(1)+PN(3)-4.*PN(2))*SQRT(ABS 4 *P
     ***2-3.*P )**2 **2)/ 4.*H*A1*Z1*TN 1))
      DO 105 I=2,N1
      Z2=1.+ .**(TC/ *(TN(I),TN(I))*(1.-6.*(TC/TN(I))**2)
      GN(I)= SIGN(1 +1)-PN(I-1)))*SQRT(ABS(PN(I+1)**2
     *PN(I-1 **2), *Z2*TN( )))
  105 CONTINUE
      DO 106 I=1,
      T(I)=TN(I)
      P(I)=PN(I
      G(I)=GN(I)
      PP( )=P(I)
      TT( )=T(I)
  106 GG(I)=G(I)*51.
      TIME=TIME+ UN TC
      JJJ J/NP
      IF(JJJ*NP.NE.J)
                                  GO TO 15
      WRITE 6 ,TIME
       RITE 4
      WRITE 4,(P(III),III=1,N,N X)
      WRITE 5
      WRITE 4,(TT(III),III=1,N,NPX)
      WRITE 60
      WRITE 4,(G (III),III=1,N,NPX)
      IF(ABS(PN(N)-FIMAX).LT.4.E4)
                                        GO TO 16
   15 CONTINUE
   16 CONTINUE
      STOP
      END
```

28

```
SUBROUTINE PROCON(A,B,C,E,N)
DIMENSION A(1),B(1),C(1),E(1)
N1=N-1
DO 1 I=1,N
C(I)=C(I)/E(I)
1 E(I)=E(I)/E(I)
DO 2 I=1,N1
C(I+1)=C(I+1)-C(I)*A(I+1)
2 E(I+1)=E(I+1)-E(I)*A(I+1)
E(N)=E(N)/E(N)
DO 3 I=1,N1
3 E(N-I)=E(N-I)-C(N-I)*E(N-I+1)
RETURN
END
```

```
FUNCTION ALAM(GG)
COMMON /BL1/D,AK
G=GG
IF(G.LT.1.E-15) G=1.E-6
AK=3.E-5
RE1=59.5/(2.*AK/D)**(8./7.
RE2=(665.-65.*ALOG10(2.*AK/D))/(2.*AK/D)
ALAM=64./RE
IF(RE.GT.2000.) ALAM=.302*RE**(-1./3.)
IF(RE.GT.4000.) ALAM=.316/RE**.25
IF(RE.GT.RE1) ALAM=.1*(1.46*AK/D+100./RE)**.25
IF(RE.GT.RE2) ALAM=.11*(AK/D)**.25
RETURN
END
```

```
FUNCTION F1(X)
COMMON /BL1/F1MAX
COMMON /BL2/ALFA
COMMON /BL3/PI
F1=A
A=PI*ALFA-X
IF(A.GT.F1MAX) F1=F1MAX
RETURN
END
```

Приложение 3

ПРИМЕР РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

Необходимо найти время заполнения и изменение газодинамических параметров (давления, температуры и расхода) в процессе заполнения участка магистрального газопровода.

Исходные параметры:

L = 500 км - длина участка газопровода;
D = 1400 мм - диаметр газопровода;
$P_{исп}$ = 80,9 · 10^5 Н/м^2 - испытательное давление.

$P_н$ = 19,6 · 10^4 Н/м^2 - начальное давление;
$T_н$ = $T_{гр}$ = 275 К - начальная температура.

$P_{сеп}$ = 83,38 · 10^5 Н/м^2 - давление;
$T_{сеп}$ = 290 К - температура;
$\mathcal{L}$ = 81,75 Н/м^2·с - скорость подъема газа в сечении $x = 0$.

Решение

Описанные выше характеристики газопровода и условия заполнения даны в программе (см.прил.2). Приведем распечатку результатов расчета и графики изменения газодинамических параметров во времени в различных сечениях газопровода (рис.4-7).

Распечатка результатов примера расчета газодинамических параметров

```
PP=
  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00
TT=
  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02
GG=
  0.0000+00  0.0000+00  0.0000+00  0.0000+00  0.0000+00  0.0000+00  0.0000+00
TIME= 2.5500-03
PP=
  2.0076+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00  2.0000+00
TT=
  2.4678+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02  2.7500+02
GG=
  3.5096+04  0.7306+02  1.7612+ 2  3.8272+01  3.9300+00  2.2257-01  0.0000+00
TIME= 4.0025+00
PP=
  1.3800+01  6.6466+00  5.9375+00  2.9383+01  2.5370+00  2.3960+00  2.3724+00
TT=
  2.5158+02  2.8866+02  2.7948+ 2  2.7675+02  2.7585+02  2.7559+02  2.7555+02
GG=
  1.6208+05  2.5880+05  3.3833+ 5  1.8560+05  1.0775+05  5.5251+04  0.0000+00
TIME= 8.0025+00
PP=
  2.5850+01  1.3000+01  2.7725+ 1  4.3305+00  4.2746+00  3.8637+00  3.7931+00
TT=
  2.5630+02  2.7904+02  2.8470+02  2.7908+02  2.7724+02  2.7658+02  2.7646+02
GG=
  2.7602+05  1.5548+05  7.4638+05  3.9577+05  2.3586+05  1.2189+05  0.0000+00
TIME= 1.2003+01
PP=
  3.7850+01  2.2407+01  1.3271+ 1  6.2065+00  7.5244+00  6.9001+00  6.7906+00
TT=
  2.6110+02  2.9139+ 2  2.9026+ 2  2.8180+02  2.7883+02  2.7796+02  2.7779+02
GG=
  3.8051+06  2.3247+06  1.2358+06  6.7560+05  3.8314+05  2.0308+05  0.0000+00
```

TIME= 1.6003+01
PP=
4.9850+01 [illegible] 2.6479+01 1.4005+01 1.2666+01 1.1884+01 1.1753+01
TT=
2.6599+02 [illegible] 2.9424+02 2.8533+02 2.8085+02 2.7967+02 2.7947+02
GG=
4.7454+06 [illegible] 1.7572+ [illegible] 1.0110+06 5.8104+05 2.9234+05 0.0000+00
TIME= 2.0003+01
PP=
4.1850+01 4.2175+01 2.9316+ 1 2.2763+01 1.9922+01 1.8973+01 1.8831+01
TT=
2.7079+02 [illegible] 2.9626+ [illegible] 2.8803+02 2.8339+02 2.8169+02 2.8148+02
GG=
5.5756+06 5.6944+06 2.2726+ 6 1.3750+06 8.1285+05 3.8564+05 0.0000+00
TIME= 2.4003+01
PP=
7.3850+01 [illegible] 3.9502+ 1 3.2308+01 2.9142+01 2.8057+01 2.7911+01
TT=
2.7560+02 [illegible] 2.9891+ [illegible] 2.9202+02 2.8600+02 2.8396+02 2.8372+02
GG=
6.2952+06 4.2474+06 2.7507+ [illegible] 1.7329+06 1.0442+06 4.9161+05 0.0000+00
TIME= 2.8003+01
PP=
6.2500+01 [illegible] 5.0416+ 1 2.3090+01 3.9703+01 3.8626+01 3.8476+01
TT=
2.7900+02 [illegible] 2.9996+ [illegible] 2.9465+02 2.8802+02 2.8620+02 2.8569+02
GG=
6.2353+06 [illegible] 3.1205+ 2.0448+06 1.2576+06 6.0302+05 0.0000+00
TIME= 3.2003+01
PP=
6.2800+01 [illegible] 5.9386+ 1 5.3409+01 5.0572+01 4.9582+01 4.9452+01
TT=
2.7900+02 [illegible] 2.9935+ [illegible] 2.9309+02 2.8917+02 2.8760+02 2.8729+02
GG=
5.1954+06 4.1251+06 3.0551+06 2.1161+06 1.3330+06 6.4100+05 0.0000+00

TIME= 3.6003+01

PP=						
4.2500+01	4.3912+01	6.6661+01	6.2347+01	6.0171+01	5.9401+01	5.9299+01
TT=						
2.7900+02	2.8539+02	2.8996+02	2.9040+02	2.8904+02	2.8774+02	2.8749+02
GG=						
4.2621+06	3.5621+06	2.7694+06	1.9004+06	1.2897+06	6.2564+05	0.0000+00

TIME= 4.0003+01

PP=						
4.2500+01	4.3673+01	7.2268+01	6.9345+01	6.7824+01	6.7274+01	6.7200+01
TT=						
2.7900+02	2.8244+02	2.8662+02	2.8772+02	2.8747+02	2.8684+02	2.8666+02
GG=						
3.4258+06	2.9496+06	2.3796+06	1.7691+06	1.1644+06	5.7179+05	0.0000+00

TIME= 4.4003+01

PP=						
4.2500+01	4.3011+01	7.0266+01	7.4435+01	7.3401+01	7.3106+01	7.3056+01
TT=						
2.7900+02	2.8096+02	2.8356+02	2.8516+02	2.8554+02	2.8534+02	2.8525+02
GG=						
2.6488+06	2.3466+06	1.9446+06	1.4707+06	9.8211+05	4.7737+05	0.0000+00

TIME= 4.8003+01

PP=						
4.2500+01	4.0821+01	7.0952+01	7.7888+01	7.7310+01	7.7098+01	7.7066+01
TT=						
2.7900+02	2.7946+02	2.8132+02	2.8260+02	2.8340+02	2.8347+02	2.8343+02
GG=						
1.9921+06	1.7864+06	1.5110+06	1.1675+06	7.8384+05	3.8720+05	0.0000+00

TIME= 5.2003+01

PP=						
4.2500+01	4.1454+01	6.0620+01	6.0058+01	7.9749+01	7.9624+01	7.9605+01
TT=						
2.7900+02	2.7932+02	2.7953+02	2.8075+02	2.8138+02	2.8153+02	2.8152+02
GG=						
1.4497+06	1.3034+06	1.1108+06	8.7406+05	5.9286+05	3.0602+05	0.0000+00

```
TIME= 5.6003+01
PP=
  8.2500+01   8.1992+01   8.1598+01   8.1323+01   8.1171+01   8.1110+01   8.1099+01
TT=
  2.7900+02   2.7741+02   2.7843+02   2.7905+02   2.7906+02   2.7974+02   2.7976+02
GG=
  1.0122+06   7.0209+05   7.7768+05   6.1253+05   4.1341+05   2.3170+05   0.0000+00
TIME= 6.3003+01
PP=
  8.2500+01   8.2261+01   8.2113+01   8.1097+01   8.1926+01   8.1897+01   8.1891+01
TT=
  2.7900+02   2.7868+02   2.7708+02   2.7773+02   2.7812+02   2.7825+02   2.7826+02
GG=
  6.7025+05   5.8478+05   5.0366+05   3.9811+05   2.9235+05   1.6604+05   0.0000+00
TIME= 6.7003+01
PP=
  8.2500+01   8.2363+01   8.2200+01   8.2185+01   8.2134+01   8.2117+01   8.2113+01
TT=
  2.7900+02   2.7858+02   2.7807+02   2.7719+02   2.7751+02   2.7762+02   2.7763+02
GG=
  5.3067+05   4.5406+05   3.9383+05   3.2654+05   2.4022+05   1.3656+05   0.0000+00
```

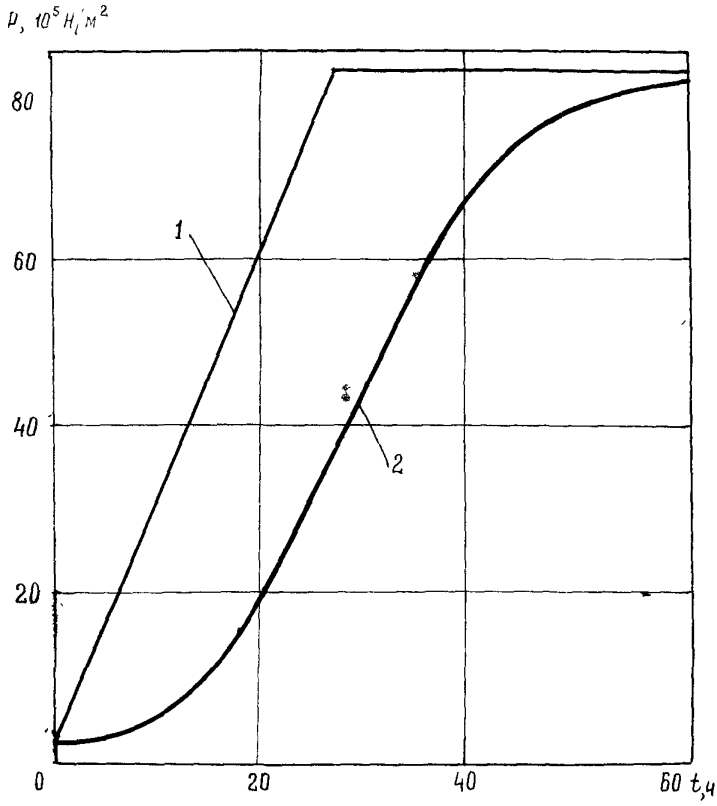


Рис.4. Изменение давления газа (Р) во времени (t) в начале (I) и конце (2) заполняемого газопровода

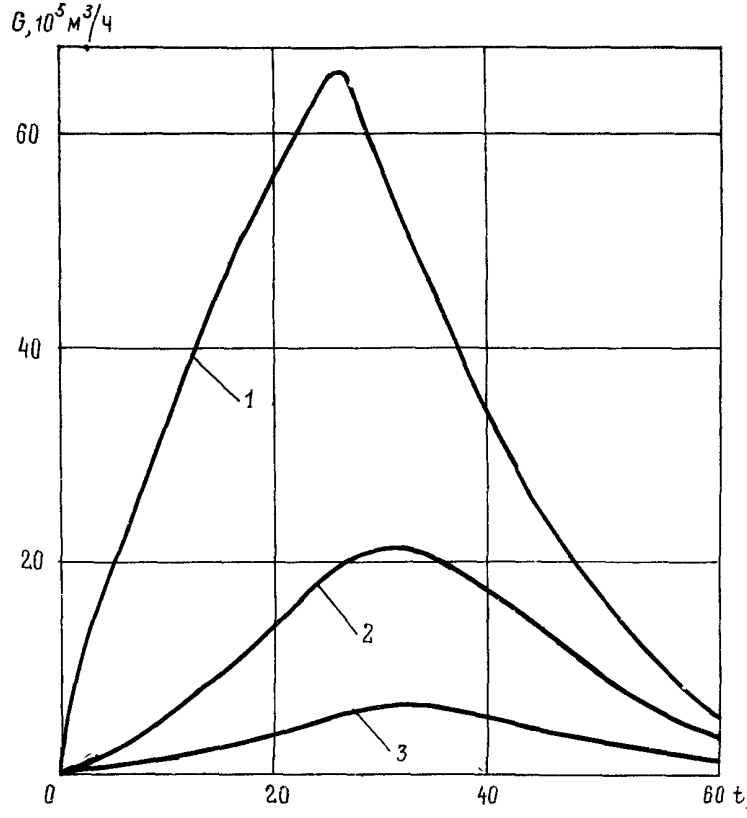


Рис.5. Изменение расхода газа (G) по времени (t) в различных сечениях газопровода:
I - 0 км; 2 - 250 км; 3 - 416 км

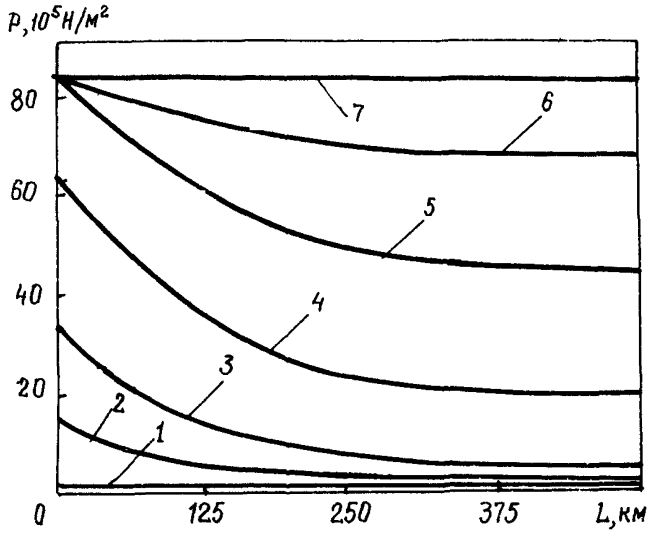


Рис.6. Распределение давления газа (P) по длине газопровода (L) в различные моменты времени:
I - 0 ч; 2 - 4 ч; 3 - I0 ч; 4 - 20 ч; 5 - 30 ч;
6 - 40 ч; 7 - 60 ч

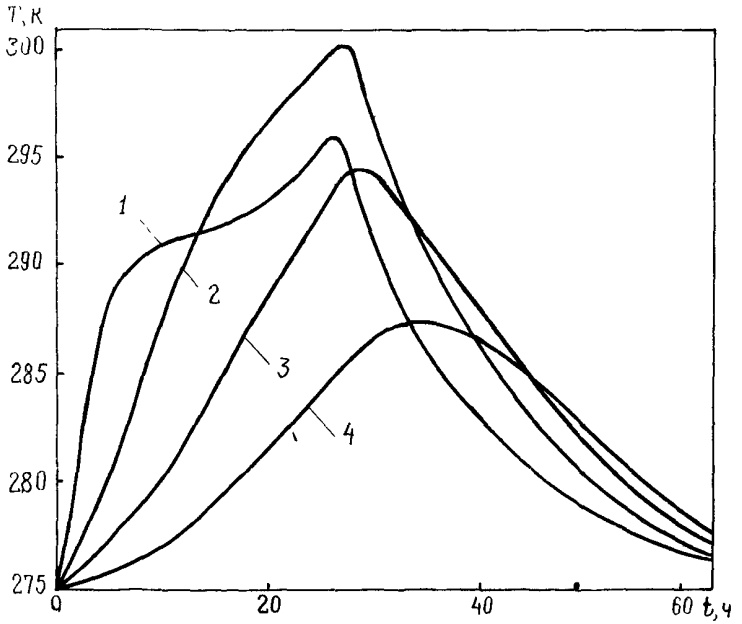


Рис.7. Изменение температуры газа (Т) во времени (t) в различных сечениях газопровода:
I - 80 км; 2 - I60 км; 3 - 250 км; 4 - 500 км

ПРИМЕРЫ ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

Пример I.

Необходимо найти время заполнения участка трубопровода газом, изменение давления газа внутри заполняемого участка во времени (в данном примере принимается, что замеры давления производятся в сечениях $x = 0$ и $x = 200$ км).

Исходные параметры:

L = 200 км - длина участка газопровода;

D = I400 мм - диаметр газопровода;

$P_{исп} = 80{,}9 \cdot 10^5$ Н/м^2 - испытательное давление;

$P_н = 0{,}98 \cdot 10^5$ Н/м^2 - начальное давление газа в газопроводе;

α = 8I,75 Н/м^2·с - скорость подъема давления во входном сечении заполняемого участка;

c = 450 м/с - скорость звука в метане;

λ = 0,02 - коэффициент гидравлического сопротивления.

Решение

Примем следующую последовательность расчета.

I. Задаем величину допустимой погрешности измерения давления манометрами с классом точности I,5 по формуле (39):

$$\xi = 0{,}005 \cdot P_{исп} = 80{,}9 \cdot 10^5 \cdot 0{,}005 = 0{,}4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2.$$

2. По формуле (40) определяем время заполнения данного участка газопровода природным газом до испытательного давления:

$$t_{зап} = \frac{2 \cdot 81{,}75 \cdot 0{,}02 \cdot (2 \cdot 10^5)^3}{3 \cdot (3{,}14)^2 \cdot (450)^2 \cdot 1{,}4 \cdot 3{,}92 \cdot 10^5} \times$$

$$\times \ln \left\{ \frac{8 \cdot (81{,}75)^2 \cdot 0{,}02 \cdot (2 \cdot 10^5)^3 \cdot \left[\exp\left(\frac{3 \cdot 79{,}92 \cdot 10^5 \cdot (3{,}14)^2 \cdot 450^2 \cdot 1{,}4 \cdot 3{,}92 \cdot 10^5}{2 \cdot (81{,}75)^2 \cdot 0{,}02 \cdot (2 \cdot 10^5)^3} \right) - 1 \right]}{3 \cdot 0{,}4 \cdot 10^5 \cdot (450)^2 \cdot 1{,}4 \cdot 3{,}92 \cdot 10^5 \cdot (3{,}14)^3} \right\} = 33 \text{ ч}.$$

3. Определяем τ_0 и t_0 из соотношений (34) и (36):

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot 81{,}75 \cdot 0{,}02 \cdot (2 \cdot 10^5)^8}{3 \cdot (3{,}14)^2 \cdot (450)^2 \cdot 1{,}4 \cdot 3{,}92 \cdot 10^5} = 2{,}2 \text{ ч},$$

$$t_0 = \frac{80{,}9 \cdot 10^5 - 0{,}98 \cdot 10^5}{81{,}75 \cdot 3600} = 27{,}1 \text{ ч}.$$

4. По формулам (30) и (38) находим изменение давления газа в начале и конце заполняемого участка. Результаты расчетов приведены в табл.2.

Таблица 2

Время, ч	Изменение давления газа внутри заполняемого газопровода (10^5 Н/м^2) в различных сечениях	
	давление газа на 0 км	давление газа на 200 км
0	0,98	0,98
2	6,86	1,76
4	12,75	5,69
8	24,52	16,48
16	48,06	39,92
24	71,61	63,47
28	79,95	76,91
30	80,93	78,77
33	80,93	80,54

Таким образом, в результате расчетов получаем величину времени заполнения ($t_{зап}$) и характер изменения давления газа внутри заполняемого участка.

Пример 2.

Необходимо в сечениях $x = 0$, $x = 150$ км, $x = 300$ км найти давление как функцию времени.

Исходные параметры:

$L = 300$ км;

$D = 1400$ мм;

$P_{исп} = 80{,}9 \cdot 10^5$ Н/м^2;
$\alpha = 54{,}5$ Н/м$^2 \cdot$с;
$P_н = 0{,}98 \cdot 10^5$ Н/м^2;
$c = 450$ м/с;
$\lambda = 0{,}02$.

Решение

1. По формуле (39) находим ξ:
$\xi = 0{,}005 \cdot P_{исп} = 0{,}4 \cdot 10^5$ Н/м^2.

2. По формуле (40) находим $t_{зап}$:
$t_{зап} = 57$ ч.

3. По формулам (34) и (36) определяем τ_0 и t_0 :
$\tau_0 = 4{,}9$ ч, $t_0 = 40{,}75$ ч.

4. Величину давления газа внутри газопровода по времени находим по формуле (30) в сечении $x = 0$, по формуле (37) в сечении $x = \frac{1}{2} L = 150$ км, по формуле (38) в сечении $x = L = 300$ км. Результаты расчетов приведены в табл.3.

Таблица 3

Время, ч	Изменение давления газа внутри заполненного газопровода (10^5 Н/м^2) в различных сечениях		
	на 0 км	на 150 км	на 300 км
0	0,98	0,98	0,98
4	8,83	4,02	1,96
8	16,67	9,71	6,77
12	24,52	16,58	13,34
16	32,37	24,03	20,6
20	40,22	31,68	28,15
?	48,07	39,43	35,9
28	55,92	47,28	43,65
32	63,76	55,13	51,5
36	71,61	62,98	59,35
40	79,46	70,83	67,2
44	80,93	73,87	73,87
48	80,93	77,5	77,5
52	80,93	78,67	78,67
57	80,93	80,54	80,54

В результате расчетов получены величины времени заполнения и давлений газа внутри газопровода в процессе заполнения.

ЛИТЕРАТУРА

I. Бобровский С.А., Щербаков С. Г., Яковлев Е. И. Трубопроводный транспорт газа. М., "Наука", 1976.

2. Васильев О. Ф., Бондарев Э. А., Воеводин А. Ф., Каниболотский М. А. Неизотермическое течение газа в трубах. Новосибирск, "Наука", 1978.

3. Климовский Е. М. Очистка полости и испытание магистральных и промысловых трубопроводов. М., "Недра", 1972.

4. Рихтмайер Р. Д., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М., "Мир", 1972.

5. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы. Правила производства и приемки работ. СНиП Ш-Д.10-72. М., Стройиздат, 1972.

6. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., "Наука", 1972.

7. Ходанович И. Е., Кривошеин Б. Л., Бикчентай Р.Н. Тепловые режимы магистральных газопроводов. М., "Недра", 1971.

8. Чарный И. А. Основы газовой динамики. М., Гостоптехиздат, 1961.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3

2. Методика расчета газодинамических параметров при заполнении магистральных газопроводов газом для испытаний 4

3. Аналитический метод расчета процесса заполнения участка магистрального трубопровода газом для испытаний I3

Приложения I9

Литература 42

Руководство
по расчету основных параметров заполнения газопроводов газом для испытания

Р 40I-80

Издание ВНИИСТа

Редактор Т.Я.Разумовская
Корректор Г.Ф.Меликова
Технический редактор Т.В.Березева

Л- 78647 Подписано в печать 6/У I98I г. Формат 60x84/I6
Печ.л. 2,75 Уч.-изд.л. 2,2 Бум.л. I,375
Тираж 900 экз. Цена 22 к. Заказ 59

Ротапринт ВНИИСТа

О П Е Ч А Т К А

Стр.	Пункт	Напечатано	Должно быть
3	I.I	СНиП Ш-Д.IO-72	СНиП Ш-42-80

gost.e-ecolog.ru