

ЭНЕРГЕТИКА

С. И. ЦАТУРЯН, С. С. МАРКЕЛОВ

О СРЕДНЕМ ЗНАЧЕНИИ ДАВЛЕНИЯ И АККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГАЗОПРОВОДА С РЕЗКИМ РАСШИРЕНИЕМ ПРИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ПОДКАЧКЕ

§ 1. *Постановка задачи.* Стационарное одномерное и изотермическое движение газа в магистральном газопроводе при сосредоточенной подкачке в рамках допускаемой линеаризации описывается системой дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\begin{cases} r \frac{dp}{dx} = -\lambda \rho u^2; & a = \frac{g u_0}{12}; \\ \frac{d}{dx} (\rho u s) - G_1 \sigma_1(x - x_1) = 0; & p = g R T_0, \end{cases} \quad (1.1)$$

где p , ρ , u — средние значения по сечению давления, плотности и скорости газового потока; r — радиус трубы; g — ускорение силы тяжести; R — газовая постоянная; T_0 — абсолютная температура газового потока; x — координата, отсчитываемая вдоль газопровода; s — площадь поперечного сечения; λ — безразмерный коэффициент сопротивления; G_1 — сосредоточенная подкачка в точке x_1 ; $\sigma_1(x)$ — дельта-функция Дирака.

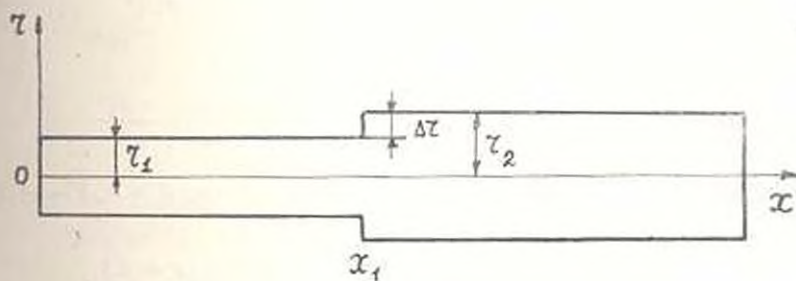


Рис. 1. Схема газопровода.

Допустим, что для увеличения пропускной способности газопровода [1], труба радиуса r_1 на расстоянии x , (где производится подкачка) от его начала заменена трубой радиусом r_2 ($r_2 > r_1$). В этом случае

в точке x , имеем резкое расширение трубопровода (рис. 1). Радиус газопровода при этом:

$$r = r_1 [1 + \alpha z_0(x - x_1)], \quad (1.2)$$

где $\alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_1}$; $z_0(x)$ — единичная функция Хевисайда.

Из первого уравнения системы (1.1) имеем:

$$\alpha a = -\frac{r}{3a} \frac{dp}{dx}, \quad (1.3)$$

из второго ($s = \pi r^2$) —

$$\frac{d}{dx}(\alpha a) + \frac{2}{r}(\alpha a) \frac{dr}{dx} = -\frac{G_1 z_0(x - x_1)}{\pi r^2}. \quad (1.4)$$

В силу (1.2) и (1.3) выражение (1.4) примет вид:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{3\alpha z_1(x - x_1)}{1 + \alpha z_0(x - x_1)} \frac{dp}{dx} = -\frac{3a}{\pi r_1^3} \frac{(i_1 z_1(x - x_1))}{[1 + \alpha z_0(x - x_1)]^2}. \quad (1.5)$$

Пусть:

$$\begin{aligned} p &= p_n \quad \text{при } x = 0; \\ p &= p_k \quad \text{при } x = l, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где l , p_n , p_k — длина газопровода, давление газа в его начале и конце.

Сущность работы заключается в следующем: решить дифференциальное уравнение (1.5) при крайних условиях (1.6) с целью определения: 1) давления газа в любом сечении газопровода; 2) среднее давление газа на первом (до расширения) и втором (после расширения) участках газопровода и по всей его длине; 3) получить формулу, характеризующую аккумулирующую способность газопровода как функцию от α , x , и G_1 .

§ 2. Решение уравнения (1.5) при условии (1.6). Так как [3]:

$$\frac{z_1(x - x_1)}{1 + \alpha z_0(x - x_1)} = \frac{z_1(x - x_1)}{1 + \alpha}, \quad \frac{\alpha_1(x - x_1)}{[1 + \alpha z_0(x - x_1)]^2} = \frac{z_1(x - x_1)}{(1 + \alpha)^2},$$

то уравнение (1.5) примет вид

$$\frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{3\alpha z_1(x - x_1)}{1 + \alpha} \frac{dp}{dx} = -\frac{3a(i_1 z_1(x - x_1))}{\pi r_1^3 (1 + \alpha)^2}. \quad (2.1)$$

Следуя [4], введем безразмерные величины $p = p_n p^*$, $x = lz$ в уравнение (2.1) и граничные условия (1.6):

$$\frac{d^2 p}{dz^2} + \frac{3\alpha z_1(z - z_1)}{1 + \alpha} \frac{dp}{dz} = -\frac{3alG_1 z_1(z - z_1)}{\pi r_1^3 p_n (1 + \alpha)^2}; \quad (2.2)$$

$$p = 1 \quad \text{при } z = 0$$

$$p = k \quad \text{при } z = 1; \quad k = \frac{p_k}{p_n} < 1. \quad (2.3)$$

Здесь и в дальнейшем ради простоты звездочки опущены. Применяя интегральное преобразование Лапласа и имея в виду основные свойства функции Дирака, решение уравнения (2.2) при граничных условиях (2.3) можно записать в виде

$$p(z) = 1 - (1-k)z - \frac{3\{a(1+\alpha)(1-k) - bG_1\}}{(1+\alpha)(1+\alpha+3az_1)} \times \\ \times [z(1-z_1) - (z-z_1)z_0(z-z_1)], \quad (2.4)$$

где $0 = aI/\pi r_1^3 \rho_m$.

Если $\alpha = 0$, то из (2.4) получим

$$p(z) = 1 - (1-k)z + 3bG_1[z(1-z_1) - (z-z_1)z_0(z-z_1)]. \quad (2.5)$$

Соотношение (2.5) совпадает с результатами [1, 2] для простого газопровода с путевым приходом.

§ 3. *Определение среднего давления.* Оно определяется как средне-интегральное значение давления вдоль трассы трубопровода

$$p_{cp} = \int_0^1 p(z) dz,$$

где $p(z)$ вычисляется из (2.4). Представим p_{cp} в виде

$$p_{cp} = p_{1cp} + p_{2cp} = \int_0^{z_1} p(z) dz + \int_{z_1}^1 p(z) dz, \quad (3.1)$$

где p_{1cp} , p_{2cp} — средние значения давления на первом и втором участках газопровода.

С учетом (2.4), после интегрирования для p_{1cp} и p_{2cp} получим:

$$p_{1cp} = z_1 - \frac{1-k}{2} z_1^2 - \frac{\Omega}{2} (1-z_1) z_1^2; \quad (3.2)$$

$$p_{2cp} = (1-z_1) - \frac{1-k}{2} (1-z_1^2) - \frac{\Omega z_1}{2} (1-z_1)^2, \quad (3.3)$$

где

$$\Omega = \frac{3\{a(1+\alpha)(1-k) - bG_1\}}{(1+\alpha)(1+\alpha+3az_1)}.$$

Из (3.1) с учетом (3.2) и (3.3) среднее значение давления вдоль трассы трубопровода определится по формуле

$$p_{cp} = \frac{1+k}{2} - \frac{3\{a(1+\alpha)(1-k) - bG_1\} z_1 (1-z_1)}{2(1+\alpha)(1+\alpha+3az_1)}. \quad (3.4)$$

Определим место вставки, т. е. z_1 , для которого среднее значение давления вдоль всей трассы при фиксированном α и отсутствии сосредоточенной подкачки было бы наименьшим. Из (3.4), z_1 определится формулой

$$z_1 = z_1^* = \frac{-(1+\alpha) + \sqrt{1+5\alpha+4\alpha^2}}{3\alpha} \quad (3.5)$$

Оттуда же следует, что при фиксированном α , если $\alpha < A$, где

$$A = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \frac{6G_1}{1-k}}, \quad (3.6)$$

величина $p_{\text{ср}}$ при $\alpha = z_1^*$ достигает максимального, а при $\alpha > A$ — минимального значения.

Среднее значение давления в простом газопроводе ($\alpha = 0$, $G_1 = 0$) обозначим через $p_{0\text{ср}}$. Тогда из (3.4) получим

$$p_{0\text{ср}} = \frac{1+k}{2}$$

Независимо от z_1 , согласно (3.4) условие равенства $p_{\text{ср}} = p_{0\text{ср}}$ имеет место при

$$\alpha = A. \quad (3.7)$$

§4. *Определение количества газа, содержащегося в газопроводе.* Количество газа Q , содержащегося в простом газопроводе, определяется формулой

$$Q = \frac{s_1 l}{RT} p_{\text{ср}}, \quad (4.1)$$

которая для нашего случая запишется в виде

$$Q = \frac{l p_0}{RT} [s_1 z_1 p_{1,\text{р}} + s_2 (1 - z_1) p_{2,\text{р}}], \quad (4.2)$$

где s_1 , s_2 — площадь поперечного сечения до и после расширения; $p_{1,\text{ср}}$ и $p_{2,\text{ср}}$ — определяются выражениями (3.2) и (3.3). Имея в виду, что $s_2 = s_1 \times (1+\alpha)^2$ и в силу соотношения (3.2) и (3.3), выражение (4.2) примет вид

$$Q^* = \frac{Q}{Q_0} = [z_1^2 + (1+\alpha)^2 (1 - z_1)^2] \left\{ 1 - \frac{\alpha}{2} z_1 (1 - z_1) \right\} - \\ - \frac{1-k}{2} [z_1^2 + (1 - z_1)^2 (1 + z_1) (1 + \alpha)^2],$$

где $Q_0 = s_1 l p_0 / RT$.

§ 5. *Пример.* Пусть [2]:

$$p_0 = 39,24 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad p_k = 31,39 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad \lambda = 0,012; \\ R = 490,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad T = 300 \text{ К}; \quad L = 10^3 \text{ м}; \\ r_1 = 0,35 \text{ м}; \quad r = 0,5 \text{ м}; \quad u_{\text{ср}} = 14 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

тогда $\alpha = 0,43$, $b = 0,026 \frac{\text{м}}{\text{Нс}}$, $G_0 = 57,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ [5].

На рис. 2—3 представлены результаты вычислений.

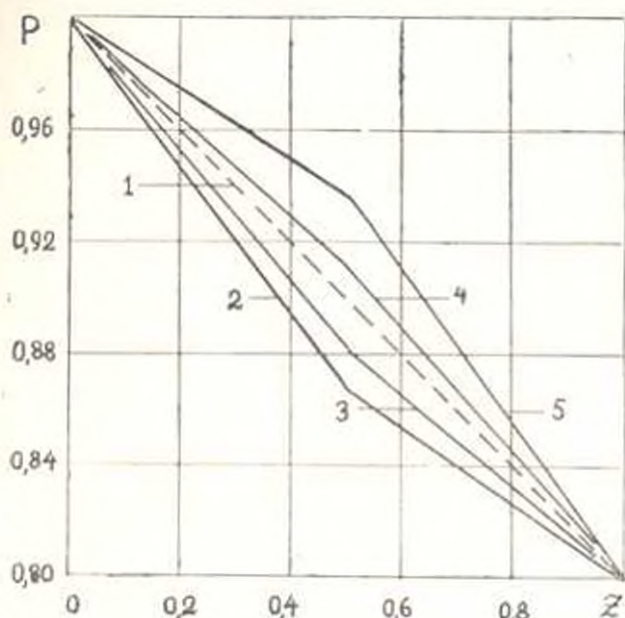


Рис. 2. Изменение безразмерного давления p в зависимости от z для $t_1 = 0,5$:

1 — $\alpha = 0$, $G_1 = 0$; 2 — $\alpha = 0,12$, $G_1 = 0$; 3 — $\alpha = 0,43$, $G_1 = 2,80 \text{ кг/с}$;

4 — $\alpha = 0,43$, $G_1 = 5,71 \text{ кг/с}$; 5 — $\alpha = 0,43$, $G_1 = 0,57 \text{ кг/с}$.

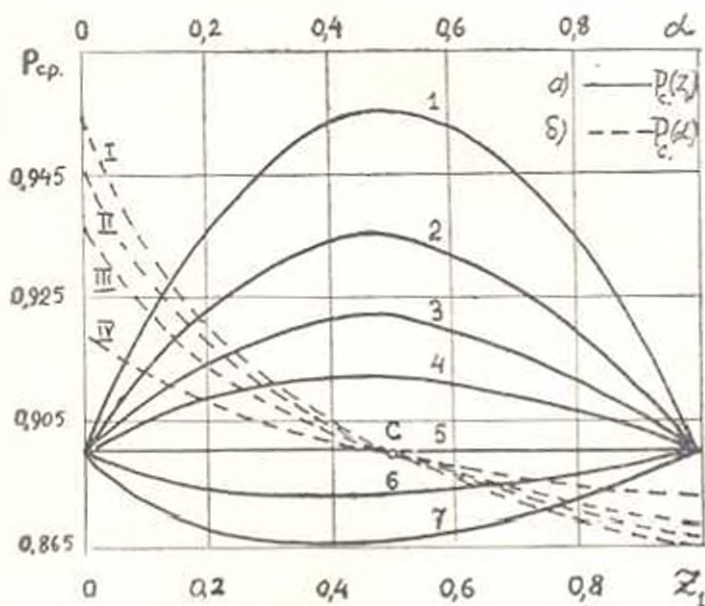


Рис. 3. Изменение среднего давления p_{cp} в зависимости от места и величины расширения для $G_1 = 5,71 \text{ кг/с}$:

1 — $\alpha = 0$; 2 — $\alpha = 0,1$; 3 — $\alpha = 0,2$; 4 — $\alpha = 0,3$; 5 — $\alpha = 0,5$;

6 — $\alpha = 0,7$; 7 — $\alpha = 1$;

I — $z_1 = 0,5$; II — $z_1 = 0,3$; III — $z_1 = 0,2$; IV — $z_1 = 0,1$.

Кривые (рис. 2), построенные по формуле (2.4) при данных (5.1) для $z_1 = 0.5$ и $G_1 = 5\% G_0, 10\% G_0, 15\% G_0$, показывают ход изменения давления газа в резко расширяющемся газопроводе при сосредоточенной подкачке в зависимости от z .

Кривые (рис. 3), построенные по формуле (3.4) при $k = 0.8$ $G_1 = 10\% G_0$, показывают изменение среднего давления во всей трассе в зависимости от z_1 и z .

Из соотношений (3.6) и (3.7) видно, что с увеличением подкачки G_1 значения A возрастают, т. е. точка C (рис. 3), где $p_{cr} = p_{cr0}$, движется вправо.

Полученные в работе аналитические зависимости позволяют определить основные динамические характеристики газового потока и могут быть использованы в практике проектирования и эксплуатации магистральных телескопических газопроводов с путевой подкачкой.

Тулский политехн. институт

Получено 18 V 1979

Ս. Ի. ՍԱՏՈՒԲՅԱՆ, Ս. Ս. Ս. Ս. ՄԱՐԿԵԼՈՎ

ԿՏՐՈՒԿ ԼԱՅՆԱՑՄԱՆ ԵՎ ՆԵՐՄԱՐԱՆ ԳԵՊԵՐՈՒՄ ԳԱՅԱՄՈՒՂՈՒՄ ՃՆՇՄԱՆ ՄԻՋԻՆ ԱՐԺԵՔԻ ԵՎ ՆՐԱ ԿՈՒՏԱԿՈՒՄ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Կտրուկ լայնացող երկար գազամուղներում գազի հաստատված իդոթերմիկ շարժումը ընտելագրող հախսատրումների համակարգից թույլատրվող դժայնացման սահմաններում ու գազի կենտրոնացված ներմղման առկայության դեպքում ստացված է դիֆերենցիալ հախսատրում, որը լուծվում է հապլասի ինտեգրալ ձևափոխությամբ:

Ստացված բանաձևերը հնարավորություն են տալիս՝

ա) կտրուկ լայնացող գազամուղի երկարությամբ հետևել գազի ճնշման փոփոխությանը ինչպես գազի կենտրոնացված ներմղման բացակայության, այնպես էլ առկայության դեպքում:

բ) որոշել ճնշման միջին արժեքը ու կուտակման ունակությունը՝ կտրված գազամուղի լայնացման տեղից, լայնացումը և ներմղումը ընտելագրող ջրացանիչներին:

ԼԻՆԵՐԱՏՐԱ

1. Бобровский С. А., Шербаков С. Г., Гусейн-заде М. А. Движение газа в газопроводах с путевым отбором. М., «Наука», 1972.
2. Бобровский С. А., Шербаков С. Г., Гусейн-заде М. А. Транспорт и хранение нефти и газа. Тр. МИНХ и ГП, вып. 97. М., «Недра», 1971.
3. Лашин В. А., Конешенко С. Н. Обобщенные функции и задачах механики. Киев, «Наукова думка», 1974.
4. Цагарян С. Н., Маркелов С. С. К задаче о нестационарных движениях газа в магистральных газопроводах. «Известия вузов. Нефть и газ», 1972, № 10.
5. Смирнов А. С., Генкина Я. А. и др. Транспорт и хранение газа. М., Гостехиздат, 1962.