

GAZ QUVURLARIDA O'TKINCHI REJIMLARDA BOSIM VA SARF TO'LQINLARINI SONLI HISOBLASH

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23384318>

Jo'rayev Muhridin Najmiddin o'g'li

muhridinjurayev8888@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada magistral gaz quvurlarida nostatsionar (vaqt bo'yicha o'zgaruvchan) oqim jarayonlarini tavsiflovchi bir o'lchamli matematik model ko'rib chiqilgan. Model massa, impuls va holat tenglamalariga asoslangan. Chiziqlashtirilgan tenglamalar sistemasi chekli ayirmalar usulida yechilib, quvur uzunligi bo'ylab bosim va gaz sarfining o'zgarishini hisoblash algoritmi bayon etilgan. Iste'molchi sarfining keskin o'zgarishi, kompressor stansiyasining to'xtashi kabi o'tkinchi jarayonlarni bashoratlash metodikasi taklif qilingan.

Kalit so'zlar: gaz quvuri, nostatsionar oqim, matematik modellash, bosim to'lqini, chekli ayirmalar usuli, gidravlik qarshilik, siqiluvchanlik.

1. Kirish

Gaz transport tizimlari ish rejimi doimiy ravishda o'zgarib turadi. Iste'molning mavsumiy va sutkalik tebranishi, kompressor stansiyalarining ishga tushishi va to'xtashi, quvurdagi jo'mraklarning ochilib-yopilishi, avariya uyuzilishlar gazning stasionar (barqaror) oqimini buzadi. Natijada quvur bo'ylab bosim va sarf to'lqinsimon o'zgaradi, quvur esa "zaxira sig'imi" (linepack) sifatida o'zini tutadi.

Stasionar hisoblash usullari bu jarayonlarni tavsiflay olmaydi. Ular quvurdagi gaz zaxirasining o'zgarishini, bosim tebranishlarining tarqalish tezligini va tizimning o'tkinchi javobini hisobga olmaydi. Shuning uchun gaz transporti tizimini loyihalash, dispetcherlik boshqaruvi va xavfsizlikni baholashda nostatsionar oqimning matematik modeli zarur.

Maqolaning maqsadi gaz quvurida nostatsionar oqimni tavsiflovchi matematik modelni tuzish, uni sonli yechish algoritmini bayon etish va oqim parametrlarining o'zgarish qonuniyatlarini tahlil qilishdir.

2. Masalaning qo'yilishi va asosiy farazlar

Uzunligi L , ichki diametri D , ko'ndalang kesim yuzasi $F = \pi D^2/4$ bo'lgan to'g'ri gorizonta quvurdagi gaz oqimi ko'rib chiqiladi. Model quyidagi farazlarga asoslanadi:

- oqim bir o'lchamli: parametrlar faqat x koordinata va t vaqtga bog'liq;
- gaz haqiqiy gaz holat tenglamasiga bo'ysunadi;

-jarayon izotermik: $T = \text{const}$ (uzun quvurlarda gaz harorati grunt harorati bilan tez tenglashadi);
-quvur devorlari deformatsiyalanmaydi;
-ishqalanish kuchi nostatsionar oqimda ham stasionar qarshilik formulasi bilan hisoblanadi.

3. Matematik model

3.1. Boshqaruvchi tenglamalar

Massaning saqlanish tenglamasi:

$$\partial \rho / \partial t + \partial (\rho w) / \partial x = 0 \quad (1)$$

Impulsning saqlanish (harakat) tenglamasi:

$$\partial (\rho w) / \partial t + \partial (\rho w^2 + p) / \partial x = -(\lambda / 2D) \rho w |w| - \rho g \sin \alpha \quad (2)$$

Holat tenglamasi:

$$p = z \rho \cdot R \cdot T \quad (3)$$

Bu yerda ρ - gaz zichligi (kg/m^3), w - tezlik (m/s), p - bosim (Pa), λ - gidravlik qarshilik koeffitsiyenti, g - erkin tushish tezlanishi, α - quvurning gorizontga og'ish burchagi, z - siqiluvchanlik koeffitsiyenti, R - solishtirma gaz doimiysi, T - absolyut harorat.

3.2. Massaviy sarf orqali yozilishi

Amaliyotda sarf $M = \rho w F$ (kg/s) qulay o'zgaruvchi hisoblanadi. Izotermik jarayonda tovush tezligining kvadrati $c^2 = zRT$. Gorizonttal quvurda konvektiv hadlar (ρw^2) ishqalanish va bosim gradiyentiga nisbatan kichik bo'lgani uchun, tenglamalar quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\partial \rho / \partial t + (c^2 / F) \cdot \partial M / \partial x = 0 \quad (4)$$

$$\partial M / \partial t + F \cdot \partial p / \partial x = -(\lambda \cdot c^2 / (2D \cdot F)) \cdot M |M| / p \quad (5)$$

(4)-(5) sistema p va M noma'lumlarga nisbatan yopiq. Uning o'ng tomonidagi nochiqli had ishqalanishni ifodalaydi.

3.3. Gidravlik qarshilik koeffitsiyenti

λ ni hisoblash uchun Altshul formulasidan foydalaniladi:

$$\lambda = 0,11 \cdot (68 / Re + \Delta / D)^{0,25} \quad (6)$$

Bu yerda $Re = w D \rho / \mu$ - Reynolds soni, Δ - quvur ichki yuzasining ekvivalent g'adir-budurligi, μ - dinamik qovushqoqlik. Yuqori Reynolds sonlarida (gaz quvurlari uchun odatiy) λ asosan Δ / D nisbatga bog'liq bo'ladi.

3.4. Boshlang'ich va chegaraviy shartlar

Boshlang'ich shart sifatida stasionar rejim olinadi. Unda $\partial / \partial t = 0$ va (5) dan bosim taqsimoti quyidagicha topiladi:

$$p_1^2 - p_2^2 = (\lambda \cdot c^2 \cdot M^2 \cdot L) / (D \cdot F^2) \quad (7)$$

Chegaraviy shartlar quvurning boshi va oxiridagi rejimga bog'liq:

-boshida (kompressor stansiyasi): $p(0, t) = p_1(t)$ yoki $M(0, t) = M_1(t)$;

-oxirida (iste'molchi): $M(L, t) = M_2(t)$ yoki $p(L, t) = p_2(t)$.

4. Sonli yechish usuli

4.1. Ayirmali sxema

Quvur uzunligi bo'yicha Δx qadamli to'r, vaqt bo'yicha Δt qadamli to'r kiritiladi. p va M noma'lumlar shaxmat to'r (staggered grid) ustida aniqlanadi: bosim to'r tugunlarida, sarf yarim butun tugunlarda. Bu usul bosim va sarf o'rtasidagi bog'lanishni to'g'ri aks ettiradi va sxemaning barqarorligini oshiradi.

Aniq sxema (4)–(5) uchun:

$$p_{i-1}^{(n+1)} = p_{i-1}^{(n)} - (c^2 \cdot \Delta t / (F \cdot \Delta x)) \cdot (M_{(i+1/2)}^{(n)} - M_{(i-1/2)}^{(n)}) \quad (8)$$

$$M_{(i+1/2)}^{(n+1)} = M_{(i+1/2)}^{(n)} - (F \cdot \Delta t / \Delta x) \cdot (p_{(i+1)}^{(n+1)} - p_{i-1}^{(n+1)}) - \Delta t \cdot \varphi_{(i+1/2)}^{(n)} \quad (9)$$

Bu yerda φ - ishqalanish hadi, ya'ni (5) ning o'ng tomoni.

4.2. Barqarorlik sharti

Aniq sxema Kurant–Fridriks–Levi sharti bajarilganda barqaror bo'ladi:

$$\Delta t \leq \Delta x / c \quad (10)$$

Odatiy sharoitda ($c \approx 350\text{--}400$ m/s, $\Delta x = 1$ km) $\Delta t \approx 2\text{--}3$ s tartibida olinadi. Uzoq muddatli jarayonlarni (soatlar, sutkalar) hisoblashda Δt ni kattalashtirish uchun oshkormas (implicit) sxemalar ishlatiladi. Bunda har bir vaqt qadamida uch diagonalli chiziqli tenglamalar sistemasi yuguruv usuli (progonka) bilan yechiladi.

4.3. Hisoblash algoritmi

1. Quvur geometriyasi, gaz xossalari va rejim parametrlari kiritiladi.
 2. (7) bo'yicha stasionar boshlang'ich taqsimot hisoblanadi.
 3. Har bir vaqt qadamida chegaraviy shartlar yangilanadi.
 4. (8) bo'yicha bosim, so'ngra (9) bo'yicha sarf yangi qatlamda topiladi.
 5. Har qadamda λ (6) bo'yicha qayta hisoblanadi.
 6. Hisob belgilangan vaqtga yetguncha takrorlanadi, natijalar saqlanadi.
- Algoritmnin Python (NumPy) yoki MATLAB muhitida amalga oshirish qulay.

5. Modelni qo'llash: hisoblash tajribasining sxemasi

Modelni sinash uchun quyidagi test masalasini ko'rib chiqish tavsiya etiladi. $D = 1,0$ m, $L = 100$ km uzunlikdagi gorizontaal quvur. Gaz harorati $T = 288$ K. Quvur boshida bosim $p_1 = 5,5$ MPa doimiy saqlanadi. Boshlang'ich vaqtda quvur oxiridagi iste'mol sarfi stasionar qiymatga teng. $t = 0$ momentda iste'mol sarfi keskin 30 % ga kamayadi (yoki oshadi).

Bu masalada quyidagi qonuniyatlarni kuzatish mumkin:

- bosim o'zgarishi quvur oxiridan boshiga tomon tovush tezligiga yaqin tezlikda to'lqin sifatida tarqaladi;
- ishqalanish ta'sirida to'lqin amplitudasi so'nadi va frontlar yoyiladi;
- sarf kamayganda quvurda gaz to'planadi (linepack ortadi), oxirgi qismda bosim ko'tariladi, quvur boshidagi sarf esa sekinroq o'zgaradi;

-yangi stasionar rejimga o'tish vaqti quvur uzunligi va diametri ortishi bilan uzayadi.

Hisoblash natijalarini real quvurdagi SCADA tizimining o'lchov ma'lumotlari bilan solishtirib, modelning aniqligi (o'rtacha nisbiy xatolik) baholanadi. Bu bosqich modelni tasdiqlash (verifikatsiya) uchun majburiydir.

6. Muhokama

Taklif etilgan izotermik bir o'lchamli model hisoblash resursi nuqtai nazaridan samarali va dispatcherlik masalalari uchun yetarli aniqlik beradi. Uning cheklovlari quyidagilar:

-haroratning o'zgarishi (Joul-Tomson effekti, atrof-muhit bilan issiqlik almashinuvi) hisobga olinmagan; uzun quvurlarda va katta bosim tushuvida bu xatolik beradi;

-juda tez jarayonlarda (quvur yorilishi, jo'mrakning bir zumda yopilishi) konvektiv hadlar va nostatsionar ishqalanish muhim bo'ladi; bunda to'liq (1)-(3) sistemani yechish va energiya tenglamasini qo'shish kerak;

-tarmoqlangan tizimlarda tugunlar uchun massa balansi va bosim tengligi shartlari qo'shimcha kiritilishi lozim.

Keyingi tadqiqotlar modelga energiya tenglamasini qo'shish, siqiluvchanlik koeffitsiyentini (z) holat tenglamasi orqali aniqlashtirish, shuningdek kompressor va rostlagichlar xarakteristikalarini chegaraviy shartlar sifatida kiritishga qaratilishi mumkin.

7. Xulosa

1. Gaz quvurlarida nostatsionar oqimni massa, impuls va holat tenglamalariga asoslangan bir o'lchamli model orqali tavsiflash mumkin; sarf bo'yicha yozilgan (4)-(5) sistema amaliy hisoblash uchun qulay.

2. Shaxmat to'rida chekli ayirmalar usuli bosim va sarfni barqaror hisoblash imkonini beradi; aniq sxema uchun $\Delta t \leq \Delta x / c$ sharti bajarilishi kerak.

3. Nazariy tahlilga ko'ra, iste'molning o'zgarishi quvurda bosim to'lqinini hosil qiladi va quvur zaxira sig'imi vazifasini bajaradi; bu dispatcherlik boshqaruvida hisobga olinishi zarur.

4. Model energiya tenglamasi va tarmoqlangan tizimlar uchun kengaytirilishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. - М.: Недра, 1975.

2. Wylie E.B., Streeter V.L. Fluid Transients in Systems. - Prentice Hall, 1993.
3. Chaudhry M.H. Applied Hydraulic Transients. - Springer, 2014.
4. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. - М.: Нефть и газ, 2003.
5. Альтшуль А.Д., Киселёв П.Г. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1975.