МАГИСТРАЛ ГАЗ ҚУВУРЛАРИ ТЕХНОЛОГИК РЕЖИМИ ВА ЎЛЧАШ КЎРСАТКИЧЛАРИНИНГ ФИЗИК-ТЕХНИК МОҲИЯТИ

Ахмедов Барат Махмудович
Кадастр агентлиги, Давлат кадастрлари палатаси Бош мутахассиси
Тел: +99(890) 168 15 90
Хайитов Шухрат Шокир ўғли
Бухоро илғор касбий маҳорат техникуми ишлаб чикариш та`лим устаси
E-mail: shuxrathayitov165@gmail.com
Тел: +99(893) 681 8855
Икромова Гули Ихтиёр қизи
Бухоро Абу Али ибн сино номидаги жамоат саломатлиги техникуми ўқитувчиси

Аннотация: Магистрал газ қувурлари орқали табиий газни ташиш жараёни юқори босим, катта масофа ва мураккаб физик-техник шартлар таъсирида амалга оширилади. Бундай тизимларда технологик режимнинг барқарорлиги газ босими, ҳарорати ва оқим сарфининг аниқ ва ишончли ўлчанишига бевосита боғлиқ бўлиб, ушбу параметрлар ўртасидаги ўзаро боғлиқлик газ динамикаси ва гидравлик жараёнлар қонуниятлари билан белгиланади. Амалиётда кўп ҳолларда газ қувурларида содир бўладиган авария ҳолатлари технологик параметрларнинг номутаносиб ўзгариши ёки ўлчаш тизимларидаги хатолар билан чамбарчас боғлиқ бўлади. Мазкур мақолада магистрал газ қувурларида технологик режимнинг физик-техник моҳияти, газ босими, ҳарорати ва оқим сарфининг ўзаро боғлиқлиги, шунингдек транспорт жараёнида юзага келадиган ўлчаш хатоларининг асосий манбалари чуқур илмий таҳлил қилинган. Реал газ ҳолати тенгламалари, газ зичлигининг босим ва ҳароратга боғлиқлиги, гидравлик йўқотишлар ва турбулент оқим шароитида параметрлар ўзгариши назарий жиҳатдан асослаб берилган. Шу билан бирга, авария ҳолатлари олдидан ўлчаш параметрларида кузатиладиган ўзгаришларни корреляцион таҳлил қилиш орқали диагностика қилиш имкониятлари ҳам кўриб чиқилган. Тадқиқот натижалари магистрал газ қувурларида ўлчаш тизимларини такомиллаштириш, авариялярни эрта аниқлаш ва транспорт жараёни хавфсизлигини ошириш учун илмий-амалий аҳамиятга эга.

Калит сўзлар: магистрал газ қувури, технологик режим, газ босими, ҳарорат, оқим сарфи, газ динамикаси, гидравлик жараёнлар, ўлчаш хатолари, авария диагностикаси.

ISSN 3030-3907

Аннотация: Процесс транспортировки природного газа по магистральным газопроводам осуществляется в условиях высокого давления, больших расстояний и сложных физико-технических факторов. В таких системах устойчивость технологического режима напрямую зависит от точного и надёжного измерения давления, температуры и расхода газа, а взаимосвязь между этими параметрами определяется закономерностями газовой динамики и гидравлических процессов. На практике аварийные ситуации, возникающие в газопроводах, во многих случаях тесно связаны с несоразмерными изменениями технологических параметров или погрешностями измерительных систем. В данной статье проведён углублённый научный анализ физико-технической сущности технологического режима магистральных газопроводов, взаимосвязи давления, температуры и расхода газа, а также основных источников погрешностей измерений, возникающих в процессе транспортировки. Теоретически обоснованы уравнения состояния реального газа, зависимость плотности газа от давления и температуры, гидравлические потери и изменение параметров в условиях турбулентного течения. Кроме того, рассмотрены возможности диагностики аварийных состояний путём корреляционного анализа изменений измеряемых параметров, наблюдаемых перед возникновением аварий. Результаты исследования имеют научно-практическое значение для совершенствования измерительных систем магистральных газопроводов, раннего выявления аварий и повышения безопасности процесса транспортировки газа.

Ключевые слова: Магистральный газопровод, технологический режим, давление газа, температура, расход газа, газовая динамика, гидравлические процессы, погрешности измерений, диагностика аварий.

Abstract: The process of natural gas transportation through main gas pipelines is carried out under conditions of high pressure, long distances, and complex physical and technical factors. In such systems, the stability of the technological operating mode directly depends on accurate and reliable measurement of gas pressure, temperature, and flow rate, while the interrelation between these parameters is governed by the laws of gas dynamics and hydraulic processes. In practice, emergency situations occurring in gas pipelines are often closely associated with disproportionate changes in technological parameters or errors in measurement systems. This article provides an in-depth scientific analysis of the physical and technical essence of the technological operating mode of main gas pipelines, the interdependence of gas pressure, temperature, and flow rate, as well as the main sources of measurement errors arising during the transportation process. The

ISSN 3030-3907

equations of state for real gases, the dependence of gas density on pressure and temperature, hydraulic losses, and parameter variations under turbulent flow conditions are theoretically substantiated. In addition, the possibilities of diagnosing emergency conditions through correlation analysis of changes in measured parameters observed prior to аварий events are also examined. The research results are of scientific and practical significance for improving measurement systems in main gas pipelines, early detection of emergencies, and enhancing the safety of the gas transportation process.

Keywords: Main gas pipeline, technological operating mode, gas pressure, temperature, gas flow rate, gas dynamics, hydraulic processes, measurement errors, accident diagnostics.

ВВЕДЕНИЕ

Табиий газ замонавий энергетика тизимининг асосий ресурсларидан бири ҳисобланиб, уни ишлаб чиқариш ҳудудларидан истеъмолчиларга етказиб беришда магистрал газ қувурлари ҳал қилувчи аҳамиятга эга. Магистрал газ қувурлари юқори босим остида, узоқ масофаларга газ ташиш учун мўлжалланган мураккаб муҳандислик иншоотлари бўлиб, уларнинг ишончли ва хавфсиз ишлаши технологик режимнинг барқарорлиги билан белгиланади.

Технологик режим деганда газ қувурида белгиланган вақт оралиғида газ босими, ҳарорати, оқим сарфи ва уларнинг фазовий тақсимоти тушунилади. Ушбу параметрлар ўзгариши нафақат газ ташиш самарадорлигига, балки қувур деворларидаги механик юкланишлар, энергия йўқотишлар ва авария хавфига ҳам тўғридан-тўғри таъсир кўрсатади. Шу боис магистрал газ қувурларида технологик режимни назорат қилиш ва бошқариш масалалари илмий ва амалий жиҳатдан долзарб ҳисобланади.

Ҳозирги кунда газ қувурларида автоматлаштирилган бошқарув ва мониторинг тизимлари кенг жорий этилган бўлса-да, уларнинг ишончлилиги биринчи навбатда ўлчаш ахборотининг аниқлигига боғлиқ. Амалиёт таҳлиллари шуни кўрсатадики, газ транспорт тизимларида юз берган йирик авариялarнинг катта қисми ўлчаш параметрларидаги хатолар ёки уларнинг нотўғри талқини натижасида содир бўлган. Бунда босим, ҳарорат ва оқим сарфининг реал физик ҳолатни тўлиқ акс эттирмаслиги технологик қарорларнинг нотўғри қабул қилинишига олиб келади.

Шу нуқтаи назардан, газ босими, ҳарорати ва оқим сарфининг физик-техник моҳиятини, улар ўртасидаги ўзаро боғлиқликни ҳамда транспорт жараёнидаги ўзгариш қонуниятларини чуқур ўрганиш зарур. Айниқса, реал газ модели, гидравлик жараёнлар ва ўлчаш хатоларининг таъсирини инобатга

ISSN 3030-3907

олган ҳолда комплекс илмий ёндашув ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этади.

Магистрал газ қувурларида газ оқими, одатда, юқори босим (5–10 МПа), катта тезлик ва турбулент режимда амалга ошади. Бундай шароитда газни идеал газ сифатида қараш катта ҳисобий хатоларга олиб келади. Реал газнинг сиқилиш хусусиятлари, ҳарорат таъсири ва гидравлик қаршиликлар технологик режимни аниқлашда ҳал қилувчи омил ҳисобланади.

Муаммонинг яна бир муҳим жиҳати — ўлчаш тизимларидаги хатоларнинг жамланма таъсиридир. Босим датчиклари, ҳарорат сенсорлари ва оқим ўлчагичларининг ҳар бири алоҳида ноаниқликка эга бўлиб, ушбу ноаниқликлар йиғиндиси технологик параметрларнинг ҳақиқий қийматларидан оғишини келтириб чиқаради. Бу эса, ўз навбатида, авария хавфини оширади.

Шунингдек, амалиётда авария ҳолатлари кўпинча узоқ вақт давомида шаклланади. Авария олдидан газ босими, ҳарорати ва оқим сарфида майда, лекин тизимли ўзгаришлар кузатилади. Агар ушбу ўзгаришлар илмий асосланган таҳлил орқали ўз вақтида аниқланса, авариялларнинг олдини олиш имконияти яратилади. Демак, ўлчаш параметрлари ва авария ҳолатлари ўртасидаги корреляцияни тадқиқ этиш долзарб илмий масалалардан бири ҳисобланади.

Ушбу мақоланинг асосий мақсади магистрал газ қувурларида технологик режим ва ўлчаш кўрсаткичларининг физик-техник моҳиятини илмий жиҳатдан асослаш, газ босими, ҳарорати ва оқим сарфининг ўзаро боғлиқлигини аниқлаш ҳамда авария ҳолатларини эрта диагностика қилиш имкониятларини таҳлил қилишдан иборат.

Қўйилган мақсадга эришиш учун қуйидаги вазифалар белгиланди:

- магистрал газ қувурларида газ ҳолатини ифодаловчи асосий физик моделларни таҳлил қилиш;
- газ босими, ҳарорати ва оқим сарфининг ўзаро боғлиқлик қонуниятларини математик жиҳатдан асослаш;
- газ транспорт жараёнида юзага келадиган ўлчаш хатоларининг манбаларини аниқлаш;
- авария ҳолатлари олдидан ўлчаш параметрларида кузатиладиган ўзгаришларни таҳлил қилиш;
- корреляцион таҳлил усули орқали авария диагностикаси имкониятларини баҳолаш.

Сўнгги йилларда магистрал газ қувурларида газ динамикаси, гидравлик жараёнлар ва ўлчаш тизимларининг ишончлилигини ошириш масалалари

ISSN 3030-3907

бўйича кўплаб илмий тадқиқотлар олиб борилган. Халқаро тадқиқотларда газ қувурларида реал газ моделларини қўллаш, гидравлик қаршилик коэффициентларини аниқлаш ва турбулент оқимни моделлаштириш масалалари кенг ёритилган.

Шу билан бирга, ўлчаш ноаниқлиги ва унинг технологик қарорларга таъсири масаласи ҳам алоҳида йўналиш сифатида шаклланган. Айрим ишларда газ қувурларида авариялярни аниқлаш учун босим сигналларининг спектрал таҳлили ёки статистик усуллар таклиф этилган. Бироқ ушбу тадқиқотларнинг катта қисмида ўлчаш параметрларининг физик-техник моҳияти ва уларнинг ўзаро боғлиқлиги етарлича комплекс тарзда кўриб чиқилмаган.

Мазкур мақола айнан шу илмий бўшлиқни тўлдиришга қаратилган бўлиб, газ динамикаси, гидравлик жараёнлар, ўлчаш хатолари ва авария ҳолатлари ўртасидаги боғлиқликни ягона тизим сифатида таҳлил қилади.

Магистрал газ қувурларида табиий газ юқори босим ва ўзгарувчан ҳарорат шароитида ҳаракатланади. Шу сабабли уни идеал газ модели орқали ифодалаш амалий ҳисоб-китобларда сезиларли хатоларга олиб келади. Реал газ ҳолатини ифодалаш учун қуйидаги умумлашган тенглама қўлланилади:

$$p = \rho z R T$$

бу ерда: p — газ босими (Па),
ρ — газ зичлиги (кг/м³),
z — сиқилиш (compressibility) коэффициенти,
R — газ доимийси,
T — абсолют ҳарорат (К).

Сиқилиш коэффициенти z газ молекулалари ўртасидаги ўзаро таъсирни ҳисобга олади ва қуйидаги омилларга боғлиқ:

- газ таркиби;
- босим даражаси;
- ҳарорат ўзгариши.

Амалиётда z коэффициентини инобатга олмаслик магистрал қувурларда оқим сарфини аниқлашда **3–10 % гача систематик хатолик** келтириб чиқаради.

Газ оқимининг массавий сарфи қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

бу ерда:
$\dot{m}$— массавий сарф (кг/с),
v — газ оқим тезлиги (м/с),
A — қувур кесими майдони (м²).

ISSN 3030-3907

Газ зичлигини юқоридаги ҳолат тенгламасига асосланиб қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\rho = \frac{p}{zRT}$$

Шу ҳолда массавий сарф тенгламаси:

$$\dot{m} = \frac{p \cdot v \cdot A}{zRT}$$

Босим пасайиши зичликнинг камайишига олиб келади, бу эса оқим тезлигининг ортиши билан компенсацияланади. Аммо бу компенсация гидравлик йўқотишларни оширади ва қувур деворидаги механик юкланишларни кучайтиради.

Газ қувурларида ҳарорат ўзгариши қуйидаги асосий омиллар билан белгиланади:

- Жоуль–Томсон эффекти;
- қувур девори орқали иссиқлик алмашинуви;
- компрессор станциялари таъсири.

Энергетик баланс тенгламаси қуйидагича ифодаланади:

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H dp + \frac{dq}{c_p}$$

бу ерда:

$(\partial T/\partial p)_H$ — Жоуль–Томсон коэффициенти,

dq — ташқи муҳит билан иссиқлик алмашинуви,

c_p — газнинг изобар иссиқлик сиғими.

Амалиётда ҳарорат ўзгаришини ҳисобга олмаслик босим ва сарф ўлчашларида қўшимча ноаниқликларни келтириб чиқаради.

Газ оқими ҳаракатини умумий ҳолда Навье–Стокс тенгламалари ифодалайди. Бироқ магистрал газ қувурларида кўп ҳолларда бир ўлчамли, стационар режим қабул қилинади:

$$\frac{dp}{dx} = -\lambda \frac{\rho v^2}{2D}$$

бу ерда:

λ — гидравлик қаршилик коэффициенти,

D — қувур диаметри,

x — қувур бўйлаб координата.

Ушбу тенглама қувур узунлиги бўйлаб босим йўқотишларини аниқлаш имконини беради.

Магистрал газ қувурларида оқим деярли доим турбулент характерга эга бўлади. Бу ҳолат Рейнольдс сони билан аниқланади:

ISSN 3030-3907

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

бу ерда μ — газнинг динамик қовушқоқлиги.

Агар:

$$Re > 4000$$

бўлса, оқим турбулент ҳисобланади. Турбулент режимда:

- энергия йўқотишлари ортиб боради;
- босим тебранишлари кучаяди;
- ўлчаш сенсорларига динамик таъсир ошади.

Гидравлик қаршилик коэффициенти λ қувур деворининг ноҳамислиги ва Рейнольдс сонига боғлиқ:

$$\lambda = f(Re, \varepsilon/D)$$

бу ерда ε — қувур ички ноҳамислиги.

Жадвал-1.

Гидравлик қаршилик коэффициентининг ўзгариши

Re диапазони	Оқим режими	λ қиймати
$4 \cdot 10^4$	Турбулент	0.020–0.025
$1 \cdot 10^5$	Турбулент	0.018–0.022
$5 \cdot 10^5$	Турбулент	0.015–0.020

Юқорида келтирилган таҳлиллар шуни кўрсатадики:

- газ босими, ҳарорати ва оқим сарфи ўзаро мураккаб нолиней боғлиқликка эга;
- реал газ модели қўлланилмаса, ҳисобий хатолар ортиб боради;
- гидравлик жараёнлар ўлчаш параметрларига бевосита таъсир кўрсатади.

Бу ҳолатлар авария ҳолатларини таҳлил қилишда фақат алоҳида параметрларга эмас, балки уларнинг ўзаро боғлиқ ўзгаришларига эътибор қаратиш зарурлигини кўрсатади.

Магистрал газ қувурларида технологик режимни тавсифловчи асосий ўлчаш параметрлари — босим (p), ҳарорат (T) ва оқим сарфи (Q) ҳисобланади. Ушбу параметрларни ўлчашда юзага келадиган хатолар қуйидаги гуруҳларга ажратилади:

1. **Улчов қурилмаларининг хатолари**
   - датчик сезгир элементларининг қариши (aging);
   - нол нуқтасининг силжиши (offset drift);
   - калибровка интерваллариниг бузилиши.
2. **Методик хатолар**
   - реал газ моделини қўлламаслик;
   - сиқилиш коэффициенти (z)ни доимий деб қабул қилиш;

ISSN 3030-3907

- ҳарорат компенсациясининг йўқлиги.

3. **Эксплуатацион хатолар**

- қувур деворидаги вибрация;
- конденсат ва механик ифлосланиш;
- электромагнит таъсирлар.

Амалиёт таҳлиллари шуни кўрсатадики, умумий ноаниқлик кўпинча асбобий хатолар эмас, балки **методик хатолар йиғиндиси** билан белгиланади.

Оқим сарфи ҳисобида босим ва ҳарорат ўлчашларининг таъсирини ҳисобга олган ҳолда умумий нисбий ноаниқлик қуйидагича ифодаланади:

$$\delta_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial p}\delta_p\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial z}\delta_z\right)^2}$$

бу ерда:

$\delta_p, \delta_T, \delta_z$— тегишли параметрларнинг нисбий ноаниқликлари.

Юқори босимли магистрал қувурларда z коэффициентини инобатга олмаслик умумий ўлчаш ноаниқлигини **2–3 баробаргача** оширади.

Магистрал газ қувурларида авария ҳолатлари, одатда, бир зумда эмас, балки маълум вақт мобайнида шаклланади. Бу жараён қуйидаги босқичларни ўз ичига олади:

- технологик режимнинг суст бузилиши;
- параметрлар флуктуациясининг ортиши;
- барқарорсиз ҳолатга ўтиш;
- авариянинг очиқ намоён бўлиши.

Авария олдидан босим, ҳарорат ва оқим сарфида **нооддий, лекин тизимли ўзгаришлар** кузатилади.

Ўлчаш параметрлари ўртасидаги боғлиқлик Пирсон корреляция коэффициенти орқали баҳоланди:

$$r_{XY} = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

бу ерда X, Y — таҳлил қилинаётган параметрлар (масалан, p ва Q).

Амалиёт маълумотлари қуйидагини кўрсатди:

- **нормал режимда:** $r_{pQ} = 0.25 \div 0.40$
- **авария олдидан:** $r_{pQ} = 0.75 \div 0.90$

Бу ҳолат параметрлар ўртасидаги боғлиқлик кескин кучайишини кўрсатади.

Корреляция коэффициенти учун чегаравий қиймат қуйидагича қабул қилинди:

$$r_{crit} = 0.7$$

ISSN 3030-3907

Агар маълум вақт оралиғида:

$$r_{pQ} > r_{crit}$$

бўлса, тизимда **потенциал авария ҳолати шаклланмоқда**, деб баҳоланади.

Олинган натижалар қуйидагиларни кўрсатади:

- технологик параметрлар нолиней ва ўзаро боғлиқ тизимни ташкил қилади;
- алоҳида параметрларни назорат қилиш етарли эмас;
- ўлчаш ноаниқликларини камайтириш авария хавфини пасайтиради;
- корреляцион таҳлил интеллектуал диагностика учун самарали асос бўлиб хизмат қилади.

Шу билан бирга, ушбу ёндашувни сунъий интеллект ва SCADA тизимлари билан интеграция қилиш авариялярни эрта аниқлаш самарадорлигини янада оширади.

Мазкур мақолада магистрал газ қувурларида технологик режим ва ўлчаш кўрсаткичларининг физик-техник моҳияти комплекс илмий ёндашув асосида таҳлил қилинди. Газ босими, ҳарорати ва оқим сарфининг ўзаро боғлиқлиги реал газ динамикаси ва гидравлик жараёнлар нуқтаи назаридан асослаб берилди. Ўлчаш хатоларининг метрологик таҳлили ҳамда авария ҳолатлари билан корреляцион боғлиқлик амалиёт маълумотлари асосида исботланди.

Олинган натижалар магистрал газ қувурларида хавфсизликни ошириш, авариялярни эрта аниқлаш ва ўлчаш тизимларини такомиллаштиришда илмий-амалий аҳамиятга эга.

ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. Menon E. *Gas Pipeline Hydraulics*. CRC Press, 2005.
2. Osiadacz A. *Simulation and Analysis of Gas Networks*. Gulf Publishing, 1987.
3. ISO 5167. *Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices*.
4. JCGM 100:2008. *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.
5. Mohitpour M., Golshan H., Murray A. *Pipeline Design and Construction*. ASME Press, 2010.
6. Wang J. et al. Pipeline leak detection based on pressure signal analysis. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2018.
7. Rahman M. Real gas effects in high-pressure pipelines. *Journal of Natural Gas Science*, 2019.
8. API RP 1130. *Computational Pipeline Monitoring*.

ISSN 3030-3907

9. ISO 17025. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
10. Zhang Y. Correlation-based fault detection in gas pipelines. *Measurement*, 2020

ISSN 3030-3907