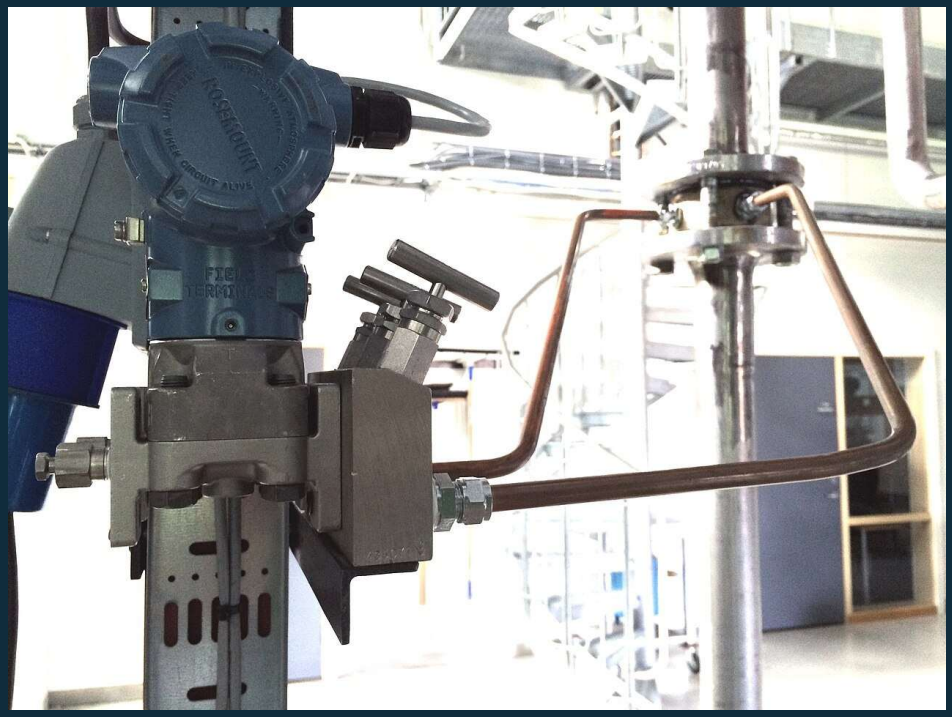
Дәріс 14.
Сығу құрылғысында қысымның төмендеуі бойынша сұйықтық, газ және бу шығыны мен мөлшерін өлшеу. Шығынның негізгі теориясы және теңдеуі. Стандартты сығу құрылғылары



Дәріскер: х.ғ.к., доцент

Кудьярова Ж.Б.

Дәрістің мақсаты: білім алушыларға сығу құрылғысында қысымның төмендеуі бойынша сұйықтық, газ және бу шығыны мен мөлшерін өлшеуді түсіндіру, шығынның негізгі теориясы және теңдеуін келтіріп, стандартты сығу құрылғыларын сипаттау

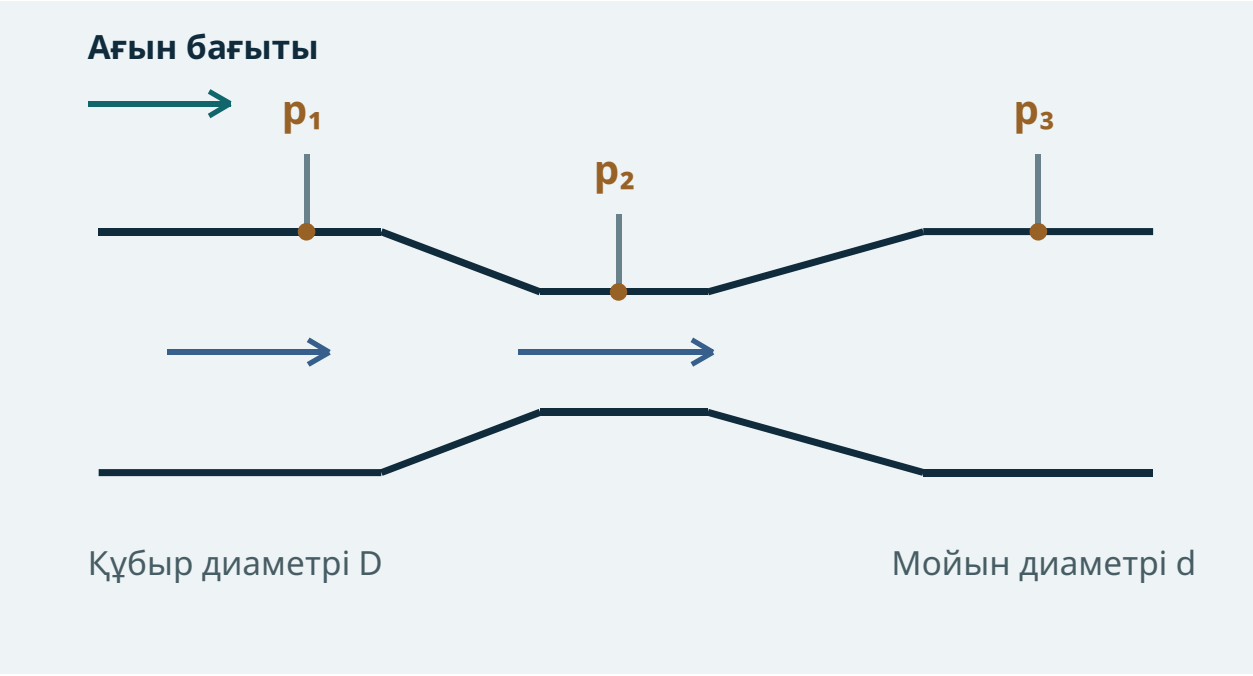
Шығын мен мөлшердің айырмасы

Шығын белгілі бір қимадан уақыт бірлігінде өтетін көлемді немесе массаны білдіреді.

Өлшенетін шама	Анықтамасы	SI бірлігі
Көлемдік шығын q_v	$q_v = dV/dt$	m^3/s
Массалық шығын q_m	$q_m = dm/dt = \rho q_v$	kg/s
Жиналған көлем V	$V = \int q_v(t)\, dt$	m^3
Жиналған масса m	$m = \int q_m(t)\, dt$	kg

Тарылған қимада қысым неге төмендейді?

Қима кішірейгенде ағын жылдамдайды. Құбырдағы екі нүктенің статикалық қысым айырмасы шығынды анықтауға мүмкіндік береді.



Вентури құбырының бойлық қимасы

Алдыңғы қима

p_1 қысымы тарылуға дейін өлшенеді. Қиманың ауданы $A_1 = \pi D^2/4$.

Тар мойын

p_2 төмен, ал жылдамдық жоғары. Қиманың ауданы $A_2 = \pi d^2/4$.

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

Бернулли теңдеуінен шығынды шығару

Горизонталь құбырдағы орныққан, сығылмайтын және үйкелісі еленбейтін ағынды қарастырамыз.

1 **Үздіксіздік теңдеуі**

$A_1v_1 = A_2v_2 = q_v$. $\beta = d/D$ болғанда $A_2/A_1 = \beta^2$ және $v_1 = \beta^2 v_2$.

2 **Бернулли теңдеуі**

$p_1 + \rho v_1^2/2 = p_2 + \rho v_2^2/2$. Орынбасудан $\Delta p = \rho v_2^2(1 - \beta^4)/2$ шығады.

$$q_{v,\text{идеал}} = A_2 \sqrt{[2\Delta p / (\rho(1 - \beta^4))]}$$

β^4 мүшесі алдыңғы қимадағы ағынның кинетикалық энергиясын ескереді.

Нақты ағынның негізгі теңдеуі

ISO 5167 массалық шығынға геометрияны, ағу коэффициентін және ортаның кеңеюін енгізеді.

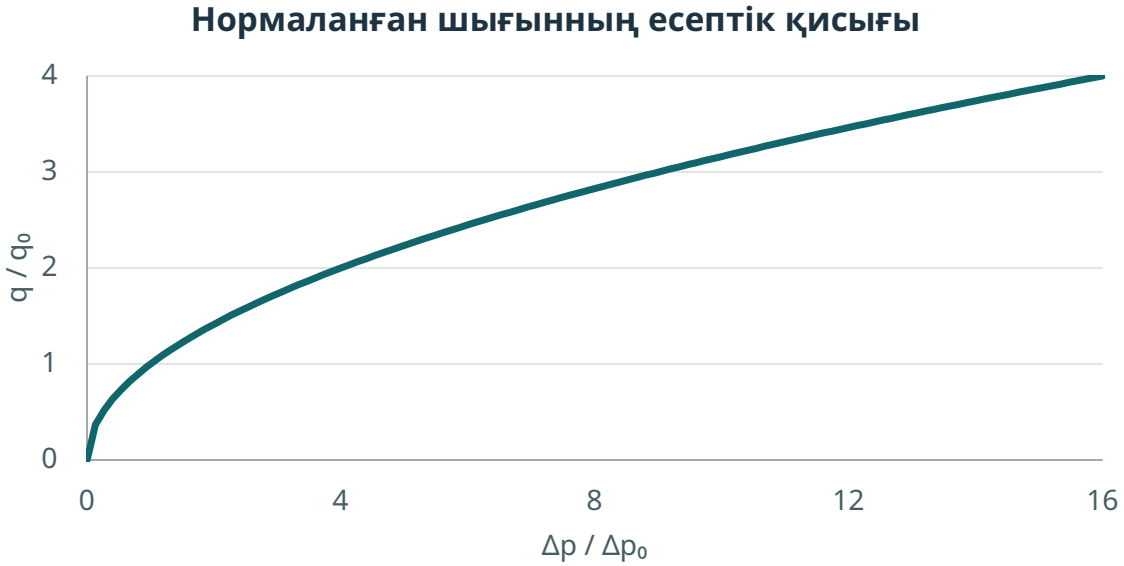
$$q_m = C\,\varepsilon\,(\pi d^2/4)\,\sqrt{[2\rho_1\Delta p\,/\,(1-\beta^4)]}$$

$$q_{v,1} = q_m/\rho_1$$

Белгі	Физикалық мағынасы
C	Шығын коэффициенті. Құрылғы геометриясы, қысым алу орны және Re_D әсер етеді.
ε	Кеңею коэффициенті. Сұйықтық үшін ε = 1. Газ бен бу үшін стандарт формуласы қолданылады.
ρ_1, β	Алдыңғы қимадағы тығыздық және d/D диаметрлер қатынасы.

Қысым айырмасы және квадрат түбір

C, ε және ρ_1 шамалары тұрақты болғанда, шығын Δp шамасының квадрат түбіріне пропорционал.



Δp 4 есе артса

Шығын 2 есе артады. Δp 9 есе артса, шығын 3 есе артады.

Түрлендіргіш шығысы

Сигнал Δp бойынша сызықтық болса, есептеуіш квадрат түбір шығарады. Баптауда оның қай жерде орындалатыны көрсетіледі.

Төмен Δp кезінде түрлендіргіштің нөлдік ығысуы мен ажыратымдылығы шығынның салыстырмалы қателігін арттырады.

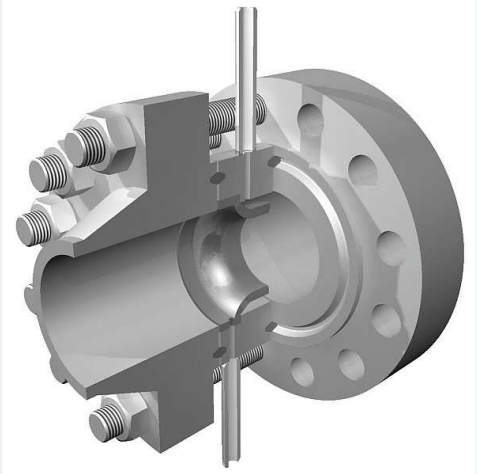
Үш негізгі тарылтқыш құрылғы

Диафрагма ағынды күрт тарылтады. Сопло мен Вентури құбырының кіреберісі біртіндеп тарылады.



Диафрагма

Өткір жиекті тесігі бар пластина.



ISA 1932 соплосы

Дөңгеленген кіреберіс және тар мойын.



Вентури құбыры

Кіреберіс, мойын және диффузор.

ISO 5167 бойынша құрылғы таңдау

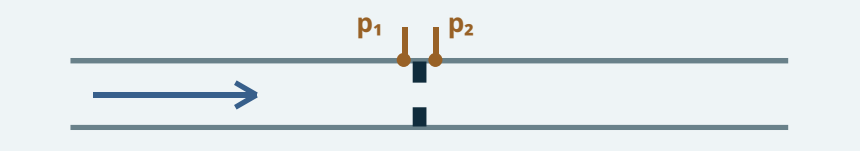
Алдымен қолдану шектерін тексереді. Одан кейін монтаж орны мен қысым шығынын салыстырады.

Құрылғы	ISO 5167	Жобалауда ескерілетін қасиет
Диафрагма	2-бөлім	Шағын, ауыстыруға ыңғайлы. Өткір жиектің күйі мен орны маңызды.
Сопло, Вентури соплосы	3-бөлім	Профильдің түріне қарай коэффициент пен жұмыс диапазоны өзгереді.
Вентури құбыры	4-бөлім	Диффузор қысымды ішінара қалпына келтіреді. Монтаж ұзындығы көбірек.
Конусты өлшегіш	5-бөлім	Құбыр ішіндегі конус сақиналы ағыс қимасын қалыптастырады.
Сыналы өлшегіш	6-бөлім	Тарылу сына тәрізді элементпен түзіледі.

> Құбыр толық толған, ағын бір фазалы, өлшеу аймағында дыбыстан баяу және пульсациясыз болуы керек.

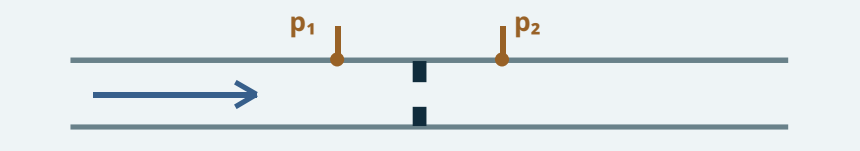
Диафрагмада қысымды алу орындары

Қысым алу тәсілі Δp мәніне және C коэффициентін есептеуге әсер етеді.



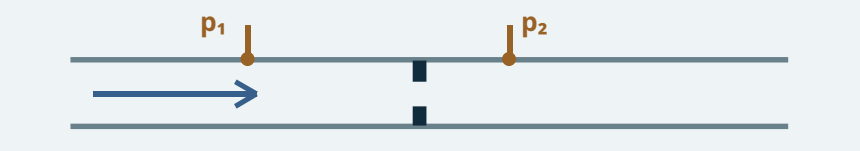
Бұрыштық

Тесіктер диафрагма беттеріне жанаса орналасады.



Фланецтік

Тесіктер тиісті беттерден 25,4 mm аралықта орналасады.



D және D/2

Алдыңғы тесік D, кейінгі тесік D/2 қашықтықта орналасады.

> D және D/2 аралықтары стандартта көрсетілген диафрагманың алдыңғы бетінен есептеледі.

Өлшенетін Δp және қысымның жоғалуы

Диффузорда ағын баяулағанда статикалық қысымның бір бөлігі қалпына келеді.



Өлшеу айырмасы

p_1 = 300 kPa және p_2 = 288 kPa болса, Δp = 12 kPa.

Қалпына келмейтін жоғалу

Бірдей диаметрлі, биіктігі бірдей алдыңғы және кейінгі қималарда $p_1 - p_3$ = 3 kPa (p_3 = 297 kPa).

Қысым профилі шартты. Энергия шығынын бағалағанда қалпына келмейтін жоғалу мен шығынды бірге қарайды.

Қысым сигналынан шығынға дейін

Екі статикалық қысым импульстік желілер арқылы Δp түрлендіргішіне беріледі.

Бастапқы элемент

Диафрагма, сопло немесе Вентури

→

Δp түрлендіргіші

Жоғары H және төмен L кірістері

→

Шығын есептеуіші

Δp, p_1, T_1 және құрылғы параметрлері

→

Жинақтағыш

Уақыт бойынша көлем немесе масса

Импульстік желілер

Газда жиналатын конденсат, сұйықта қалып қойған газ және бу желілеріндегі конденсат деңгейлерінің айырмасы Δp көрсетілімін ығыстырады.

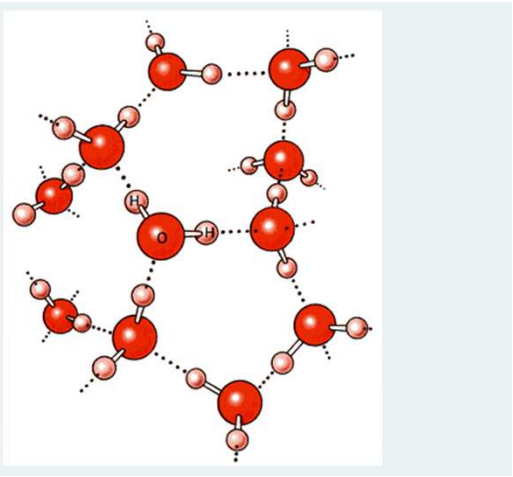
Монтаж және тексеру

Түзу учаскелерді стандарт кестесінен таңдаңыз. Түрлендіргіштің нөлін, диапазонын және желілердің герметикалығын тексеріңіз.

> Бу өлшеуінде конденсат бағандарының гидростатикалық әсері теңестіріледі. Монтаж сызбасы аспап нұсқаулығымен тексеріледі.

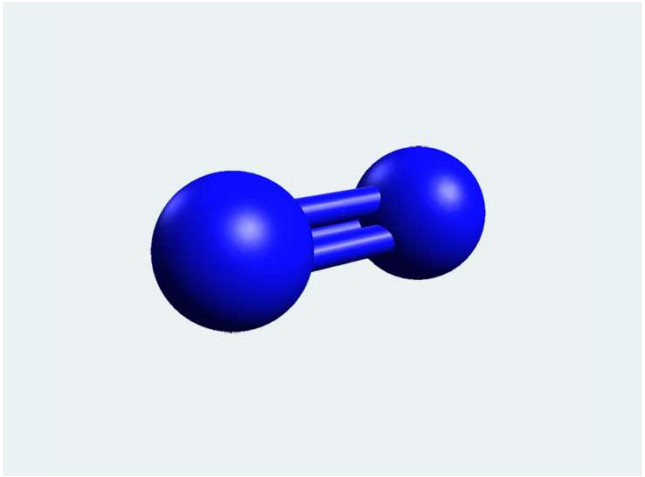
Сұйық, газ және будың молекулалары

Молекулалық құрылым мен фазалық күй ортаның тығыздығы мен сығылғыштығын түсіндіруге көмектеседі.



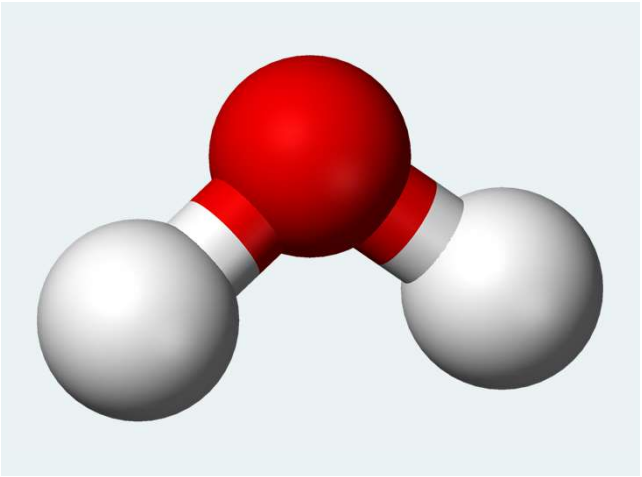
Сұйық су

O–H ковалентті байланысы. Нүктелі сызық су молекулаларының арасындағы сутектік байланысты көрсетеді.



Азот газы

N≡N үштік ковалентті байланысы. Тығыздықты табуға молярлық масса мен p, T қажет.



Су буы

H_2O молекуласының O–H байланыстары сақталады. Тығыздық бу кестесінен алынады.

Тығыздықты қайдан аламыз?

Қысым алу нүктесіндегі ρ_1 мәні өлшенген немесе есептелген термодинамикалық күйге сәйкес болуы керек.

Орта	Тығыздықты анықтау	Есепке қажет дерек
Сұйықтық	Қасиет кестесі, күй теңдеуі немесе тығыздық өлшеуі	Сұйықтық құрамы, T_1. Қажет болса p_1.
Газ	$\rho_1 = p_1 M/(Z_1 R T_1)$	p_1 — абсолют қысым, T_1 — К. M — молярлық масса, Z_1 — сығылғыштық коэффициенті.
Құрғақ қаныққан бу	Қанығу қисығындағы бу тығыздығы	Қанығу күйі расталса, p_1 немесе T_1 жеткілікті.
Аса қызған бу	IAPWS қасиет моделі немесе бу кестесі	p_1 және T_1 бірге қолданылады.

Газ бен будың кеңею коэффициенті

Тарылтқыштан өткенде сығылатын ортаның тығыздығы өзгереді. Диафрагма үшін ISO 5167-2 түзетуі қолданылады.

$$\varepsilon = 1 - (0{,}351 + 0{,}256\beta^4 + 0{,}93\beta^8)(1 - \tau)$$

$$\tau = (p_2/p_1)^{(1/\kappa)}$$

Қысымдар қатынасы

$p_2/p_1 = 1 - \Delta p/p_1$. p_1 және p_2 абсолют қысымдармен беріледі.

Изоэнтропиялық көрсеткіш κ

Орта күйіне сәйкес алынады. Идеал газ үшін $\kappa = c_p/c_v$. Бу үшін мәні қасиеттер моделінен анықталады.

> Бұл өрнек диафрагма үшін $p_2/p_1 \geq 0{,}75$ болғанда және стандарттың өзге қолдану шарттары орындалғанда жарамды.

Су шығыны · C коэффициентін табу

Бұрыштық қысым алуы бар диафрагма үшін D = 100 mm, d = 60 mm, Δp = 12,0 kPa. Су температурасы 20 °C.

β = 0,600 ρ_1 = 998,2 kg/m³ μ = 1,002 mPa·s ε = 1

Итерация	Есепте қолданылған C	q_m, kg/s	Re_D
Бастапқы жуықтау	0,61000	9,0485	114 979
Жаңартылған мән	0,60986	9,0464	114 953
Жинақталған шешім	0,60986	9,0465	114 953

$$q_{v,1} = (9{,}0465/998{,}2) \times 3600 \approx 32{,}63\ \text{m}^3/\text{h}$$

Азот шығыны · жұмыс және анықтамалық күй

Сол диафрагмада p_1 = 600 kPa (абс.), T_1 = 298,15 K және Δp = 24,0 kPa. Оқу есебінде Z_1 = 1 алынды.

1 Тығыздық пен кеңею түзетуі

M(N_2) = 0,0280134 kg/mol, κ = 1,40. $\rho_1 \approx 6{,}780$ kg/m³, $p_2/p_1 = 0{,}960$, $\varepsilon \approx 0{,}98851$.

2 Массалық шығын

C ≈ 0,60580. Негізгі теңдеу бойынша $q_m \approx 1{,}035$ kg/s.

3 Көлемдік шығын

Жұмыс жағдайында $q_{v,1} \approx 550$ m³/h. 273,15 K және 101,325 kPa (абс.) күйінде $q_{v,ref} \approx 2\,982$ m³/h.

Аса қызған будың массалық шығыны

Сол диафрагмада p_1 = 1,00 MPa (абс.), T_1 = 250 °C және Δp = 30,0 kPa.

Фазалық күй

1,00 MPa кезінде T_{sat} ≈ 179,88 °C. 250 °C осы мәннен жоғары, сондықтан бу аса қызған.

Кестелік тығыздық

NISTIR 5078, 3-кесте бойынша ρ_1 = 4,2965 kg/m³. Оқу есебінде к ≈ 1,30.

---

p_2/p_1 = 0,970 **ε ≈ 0,99074** **C ≈ 0,60599**

$q_m \approx 0{,}924$ kg/s ≈ 3,33 t/h

> Осы режим 30 минут сақталса, құбырдан шамамен 1,66 t бу өтеді.

Уақыт бойынша жиынтық мөлшер

Әр уақыт аралығында шығынды есептеп, оны сол аралықтың ұзақтығына көбейтеміз.

Су ағынының кезеңі	Δp, kPa	q_v, m^3/h	Ұзақтығы	Көлем, m^3
Бірінші кезең	12,0	32,63	20 min	10,88
Екінші кезең	3,0	16,31	40 min	10,88

$$V \approx \Sigma(q_{v,i}\,\Delta t_i) \approx 21{,}75\ m^3$$

Өлшеу белгісіздігін бағалау

Су мысалында ε = 1. Бір-біріне тәуелсіз кіріс шамалары үшін салыстырмалы үлестерді квадраттар қосындысымен біріктіреміз.

Кіріс шамасы	Стандартты u_r, %	Сезімталдық модулі	q_m белгісіздігіне үлесі, %
C	0,50	1	0,50
Δp	0,80	0,5	0,40
ρ_1	0,40	0,5	0,20
d	0,10	$2/(1-\beta^4) \approx 2{,}30$	0,23
D	0,10	$2\beta^4/(1-\beta^4) \approx 0{,}30$	0,03

$$u_r(q_m) \approx 0{,}71\ \%\qquad U_r(q_m) \approx 1{,}42\ \%\ \ (k = 2)$$

Өлшеуді тексеру және нәтижені рәсімдеу

Хаттама өлшеуді қайта есептеуге жеткілікті деректерді қамтиды.

Тексеру нысаны	Не тіркеледі?	Нәтижеге ықпалы
Құрылғы және монтаж	Түрі, D, d, β, қысым алу нүктелері және түзу учаскелер	Геометрия, C және ағын профилі
Аспап және жұмыс күйі	Δp диапазоны, нөлдік тексеру, p_1, T_1 және орта күйі	Δp, ρ_1 және ε есептері
Сигналды өңдеу	Түбірді алу орны, дискреттеу аралығы, қолданылған коэффициенттер	Шығын мен жиынтық мөлшердің дұрыстығы
Есептік нәтиже	q_m немесе q_v, бірлік, көлемнің анықтамалық күйі, белгісіздік	Қайта есептеуге және салыстыруға қажетті шарттар

> Δp күткеннен ауытқыса, алдымен нөлді, импульстік желілерді, ағын режимін және диафрагма жиегін тексереді.

Бақылау сұрақтары:

1. Шығынның түрлерін сипаттаңыз.
2. Тарылған қимадағы ағынның төмендеуін түсіндіріңіз.
3. Вентури құбырындағы шартты қысым профилін талдаңыз.
4. Нақты ағын теңдеуін келтіріңіз.
5. Тарылтқыш құрылғылардың түрлерін сипаттаңыз.
6. Сығу құрылғысында қысымның төмендеуі бойынша сұйықтық, газ және бу шығыны мен мөлшерін өлшеуді түсіндіріңіз.

Әдебиеттер:

1. Полуэктова В. А., Мухачева В. Д. Физико-химические методы анализа. Теория и практика: учебное пособие. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. — 200 с.
2. Шишмарёв В.Ю. Технические измерения и приборы. –М.: Академия, 2022. – 380с.
3. Инструментальные методы в химии / под ред. В. В. Лунина, А. К. Буряка. — М.: КУРС, 2024. — 360 с.