

8. ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ СҰЙЫҚТЫҢ МӘЖБҮРЛІ АҒУЫ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУ БЕРУ КОЭФФИЦИЕНТТЕРІН АНЫҚТАУ

Дөңгелек көлденең қималы тегіс құбырлардың ламинарлы және турбулентті ағын кезіндегі жылу беру. Гидродинамикалық және термиялық тұрақтандыру учаскесінің әсері. Дөңгелек емес қималы құбырлардағы жылу алмасу ерекшеліктері. Беттің кедір-бұдырлығының құбырлардағы жылу алмасуға әсері.

8.1. Дөңгелек көлденең қималы тегіс құбырлардың ламинарлы және турбулентті ағын кезіндегі жылу беру. Гидродинамикалық және термиялық тұрақтандыру учаскесінің әсері

Тұтқырлық режимі сұйықтың ламинарлы ағыны кезінде $Re = \frac{w \cdot d}{\nu} < 2300$ және

ауырлық күшінің $Ra = g\beta \frac{(t_c - t)d^3}{\nu^2} Pr < 8 \cdot 10^5$ әсері болмағанда орын алады.

Пластинаны орай ағу кезіндегі және құбырдың бастапқы учаскесінде жылу беру процесінің дамуы ұқсас өтеді. Тұтқырлы ағын кезінде бастапқы термиялық учаске үлкен ұзындыққа ие болады және жылу алмасу аппаратының мөлшерінен (ұзындығынан немесе биіктігінен) асуы мүмкін. Сол себепті анықтаушы мөлшер ретінде тіптен жеткілікті ұзын құбырлар үшін кейбір авторлармен құбырдың басынан бастап қарастырылатын қиманың x арақашықтығы қабылданған. Канал қисығының және құбырдың қабырғаларымен ағынды қысудың әсері $(x/d)^{0,1}$ кешенімен есепке алынады.

Г.М. Кржижановский атындағы Энергетикалық институттың мәліметі бойынша тұтқырлы режим кезінде жылу беру тұрақты коэффициентін есептеу үшін эмпирикалық формула ұсынылған [3]:

$$Nu_{ж\ x} = 0,33 Re_{ж\ x}^{0,5} Pr_{ж\ x}^{0,43} (Pr_{ж\ x} / Pr_c)^{0,25} (x/d)^{0,1}. \quad (8.1)$$

Мұнда анықтаушы мөлшер ретінде құбырдың басынан бастап қарастырылатын қима арақашықтығы қабылданған, ал анықтаушы температура ретінде сұйық температурасының берілген қима үшін орташа мәні (жылу ағынының бағытын есепке алу үшін қажетті осы қимадағы қабырға температурасы кезінде алынған Прандтль санынан басқа). (8.1) формуласы қабырғадағы тұрақты жылу ағыны шартымен және $l/d \leq 216$ мәндерінде алынған, мұндағы l – құбыр ұзындығы, d – оның ішкі диаметрі. Құбырға кіріс жатық та, өткір жиекпен де болуы мүмкін.

Құбырлардағы тамшылы сұйықтардың тұтқырлы режимі кезінде жылу беру орташа коэффициентін қабырғаның тұрақты температурасы кезінде Гретц-Нуссельт есебін шығаруға негізделген формула бойынша шығаруға болады [1]:

$$Nu_{r,d} = 1,55 \left(Pe_r \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon; \quad (8.2)$$

мұндағы $Nu_{r,d} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_r}$; $Pe_r \frac{d}{l} = \frac{4G \cdot c_{p,r}}{\pi \cdot l \cdot \lambda_r}$; $\alpha = \frac{q}{t_{ж} - t_c}$, «с» және «г» индекстері сұйықтың

физикалық қасиеттерінің таңдалатындығын білдіреді, осыған сәйкес, қабырғаның t_c температурасы және шекаралық қабаттың температурасы $t_r = 0,5(t_{ж} - t_c)$ кезінде; ε – гидродинамикалық тұрақтандыру учаскесіне түзету

$$\varepsilon = 0,6 \left(\frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} \right).$$

Бұл түзету құбырдың жылытылатын учаскесінің алдында гидродинамикалық тұрақтандыру учаскесі және $\left(\frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} \right) < 0,1$ кешені жоқ кезде енгізіледі. Формуланы қолдану шектері: $Pe_r \frac{d}{l} \leq 0,05$, $0,07 \leq \frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \leq 1500$.

Термиялық тұрақтандыру учаскесінен тысқары жылу беру орташа коэффициентін қабырғаның тұрақты температурасы үшін өрнектерден анықтаймыз $Nu = 3,66$, қабырғадағы тұрақты жылу ағыны үшін $Nu = 4,36$.

Тұтқырлы-гравитациялық режим сұйықтың ламинарлы ағыны $Re < 2300$ және ауырлық күшінің әсерінің $Ra > 8 \cdot 10^5$ болуы кезінде орын алады. Табиғи конвекцияның әсері жылу беру коэффициентінің белгілі бір шарттарда тұтқырлы режиммен салыстырғанда бес есе өсуі мүмкін. Құбырдың әр түрлі күйлерінде табиғи конвекцияны оны жылыту мен салқындатудың әр түрлі шарттарымен үйлесімді есепке алу қиын міндет болып табылады. Тәжірибелік мәліметтерді неғұрлым көп немесе аз дәл жалпылау тек тұтқырлы-гравитациялық режимнің жағдайлары үшін алынған. М.А. Михеев келесі формула бойынша жылу беру орташа коэффициентін жуықтап есептеуді жүргізуді ұсынады [3]:

$$Nu_{ж d} = 0,15 Re_{ж d}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} (Ra_{ж d})^{0,1} (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25} \cdot \varepsilon_l. \quad (8.3)$$

Мұнда анықтаушы түрінде құбырдағы сұйықтың орташа температурасы қабылданған, анықтаушы мөлшер құбырдың ішкі диаметрі болып табылады. Сонда Релей саны анықталады:

$$Ra_{ж d} = g \beta_{ж} \frac{(t_c - t_{ж}) d^3}{\nu_{ж} a_{ж}}.$$

Гидродинамикалық тұрақтандыру учаскесіне түзету ламинарлы режим ε_l кезінде енгізіледі, егер $l/d < 50$ және 8.1-кестеден анықталады.

8.1-кесте

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

Жылу беру коэффициенттерінің неғұрлым дәл мәнін (8.3) формуласы көлденең құбырлар үшін береді.

Параметрлердің неғұрлым шектелген интервалы үшін орташа жылу беру тұтқырлы-гравитациялық режимде көлденең құбырлардағы ағын және $Re_{ж} < 3000$ келесі формула бойынша есептелуі мүмкін [3]:

$$Nu_{r,d} = 0,8 \left(Pe_r \frac{d}{l} \right)^{0,4} Ra_{r,d}^{0,1} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{0,14},$$

мұндағы $Ra_{r,d} = g \beta_r \frac{(t_c - t_{ж}) d^3}{\nu_r a_r}$; $Pe_r = \frac{w \cdot d}{a_r}$. «с», «ж» және «г» индекстері қабырғаның,

сұйықтың және шекаралық қабаттың температурасын білдіреді. Формула $20 \leq Pe_r \frac{d}{l} \leq 120$; $2 \leq Pr_r \leq 10$; $10^6 \leq Ra_{r,d} \leq 13 \cdot 10^6$ кезінде қолданылады.

Тік құбырларда сұйықтың қозғалысы кезінде, еркін және мәжбүрлі конвекцияның бағыттары сәйкес келгенде жылу беру орташа коэффициенті келесі формула бойынша есептелуі мүмкін [5]:

$$Nu_c = 0,35 \left(Pe_r \frac{d}{l} \right)^{0,3} \left(Ra_{r,d} \frac{d}{l} \right)^{0,18}.$$

Формула $Re_{жс} > 2300$; $\left(Pe_r \frac{d}{l} \right)_{ac} \leq Pe_r \frac{d}{l} \leq 110$; $8 \cdot 10^5 \leq Ra_{r,d} \leq 4 \cdot 10^8$ кезінде дұрыс.

Мұнда $\left(Pe_r \frac{d}{l} \right)_{ac} \approx 1,5 \left(Ra \frac{d}{l} \right)_r^{0,25}$ – Пекле санының асимптотикалық мәні.

Сұйықтың тік құбырларында, еркін және мәжбүрлі конвекцияның қарама-қарсы бағытында сұйықтың қозғалысы кезінде жылу беру орташа коэффициентін есептеу үшін [5] формуласын пайдалануға болады:

$$Nu_{жс} = 0,037 Re_{жс}^{0,37} Pr_{жс}^{0,4} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^n,$$

мұндағы жылыту кезінде $n = -0,11$; салқындату кезінде $n = -0,25$. Формула $250 \leq Re_{жс} \leq 2 \cdot 10^4$; $1,5 \cdot 10^6 \leq Ra_{r,d} \leq 12 \cdot 10^6$ кезінде дұрыс.

Турбулентті режим. Әр түрлі сұйықтың турбулентті ағыны кезінде (сұйық металлдардан басқа) жылу беру орташа коэффициентін есептеу үшін $Re = \frac{w \cdot d}{\nu} > 10^4$ М.А.

Михеевпен әр түрлі зерттеулердің эксперименттік мәліметтерінің үлкен санын жалпылудан кейін келесі теңдеу алынған [6]:

$$Nu_{жс,d} = 0,021 Re_{жс,d}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l. \quad (8.4)$$

Турбулентті режим кезінде гидродинамикалық тұрақтандыру учаскесіне түзету ε_l енгізіледі, егер $l/d < 50$ болса, және 8.2-кестесінен анықталады.

8.2-кесте

Re	l/d									
	1	2	5	10	15	20	30	40	50	
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1,00	
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,00	
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,00	
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,00	
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00	

8.2. Дөңгелек емес қималы құбырлардағы жылу алмасу ерекшеліктері

Қазіргі уақытта дөңгелек құбырлардағы жылу беру жақсы зерттелген. Егер құбыр дөңгелек емес көлденең қимаға ие болса, онда жылу беруті есептеу оларда диаметрмен дөңгелек көлденең қиманың кейбір балама құбырында сондай шамада анықталуға әкеледі

$$d_э = 4 \frac{f}{u},$$

мұндағы f – құбырдың көлденең қимасы; u – оның периметрі.

Балама және гидравликалық диаметрдің көмегімен жылу беруті есептеу әдісі жуықталған болып табылады, оны қолданудың дәл шектері анықталмаған. М.А. Михеевтің ұсыныстары бойынша, сұйықтың турбулентті ағыны кезінде тік бұрышты және үш бұрышты қималардың каналдарында, сондай-ақ құбыр бумасының бойлық шайылуы кезінде балама диаметр үшін жылу беруті есептеулерді келесі формула бойынша жүргізуге болады (8.4).

Құбырлар бумасы үшін балама диаметр формуласы бойынша есептеледі [7]

$$d_g = \frac{4f}{u} = \frac{4 \left(s_1 s_2 - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)}{\pi \cdot d} = 4 \frac{s_1 s_2}{\pi \cdot d} - d.$$

Сонымен қатар жоғары температураға ие газдар үшін жылу ағынының бағытын $(Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25}$ есепке алатын түзету қолданылмайды. Мұнда есептеу газдардың абсолютті температураларына қатысы бойынша жүргізіледі $\Theta = T_c / T_{жс}$:

$$Nu = Nu_{жс} (1,27 - 0,27\Theta),$$

салқындату кезінде $0,5 \leq \Theta \leq 1,0$,

$$Nu = Nu_{жс} \Theta^{-0,55}$$

жылыту кезінде $1,0 \leq \Theta \leq 3,5$,

мұндағы $Nu_{жс}$ (8.4) формуласы бойынша есептеледі.

Бұл есептеу әдісі ламинарлы ағын және балқыған металдар ағыны кезінде жарамсыз болып саналады.

В.П. Исаченко мәліметтері бойынша жылу бергіштің орташа коэффициенттері ішкі қабырғада сақиналы көлденең қима каналдарында газдардың және тамшылық сұйықтардың турбулентті ағыны кезінде [3] теңдеуі бойынша есептеуге болады.

$$Nu_{жс,d} = 0,017 Re_{жс,d}^{0,8} Pr_{жс}^{0,4} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18} \cdot \varepsilon_l,$$

мұндағы $d = d_2 - d_1$ – сақиналы каналдың балама диаметрі.

8.3. Беттің кедір-бұдырлығының құбырлардағы жылу алмасуға әсері

Кедір-бұдырлы құбырларда сұйықтардың турбулентті ағыны кезінде елеулі гидродинамикалық түрленулер жүзеге асады. Кедір-бұдырлықтың биіктігі ламинарлық қабаттың қалыңдығынан аз болуы мүмкін, сонда олардың болуы ағысқа, демек, жылу беруге әсер етпейді. Егер бұдырлардың биіктігі үлкен болса, онда ламинарлы қабаттағы ағын бұзылады, олардың ажыраған, құйынды орай ағуы жүзеге асады. Сұйықтың турбулентті ағыны кезінде жылу беру негізгі термиялық кедергісі ламинарлық қабатта шоғырландырылғандықтан, оның бұзылуы салдарынан жылу беру елеулі артуы жүзеге асады, ол тегіс құбырмен салыстырғанда үш еселік шамаға жетуі мүмкін.

Тәжірибелер кедір-бұдырлы құбырларда жылу беру тегіс құбырлармен салыстырғанда үстіңгі бетінің кедір-бұдырлығының түріне тәуелді болады, қатысты кедір-бұдырлық шамалары, бұдырлар концентрациясының шамалары және т.б. Барлық осы факторларды есепке алатын жалпыланған формулалар, қазіргі уақытта жоқ. Техникалық есептеу үшін жиі кедір-бұдырлықтың тегіс құбырлар үшін жылу беру коэффициентін 10 % көбейтумен әсерін есепке алады.