

6. ҚҰБЫРЛАР МЕН ҚҰБЫРЛАР БУМАСЫНЫҢ МӘЖБҮРЛІ КӨЛДЕНЕҢ ОРАЙ АҒУЫ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУ БЕРУ

Жалаң дөңгелек цилиндрін көлденең орай ағу кезіндегі гидродинамика және жылу алмасу. Ламинарлы және турбулентті шекаралық қабаттың ажырау бұрышы. Цилиндр шеңбері бойынша жылу беру коэффициентін өзгерту. Көлденең шайылатын цилиндрдің орташа жылу бергіштігі. Цилиндрдің жылу беру коэффициентінің шабуыл бұрышына тәуелділігі. Құбырлардың дәліздік және шахматтық бумаларын көлденең орай ағу кезіндегі жылу алмасу.

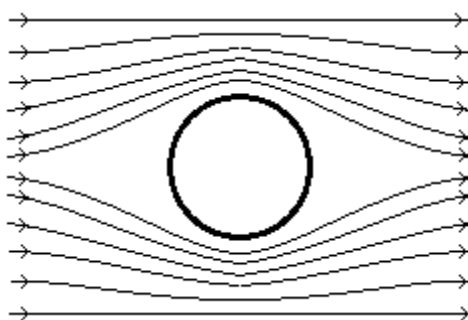
6.1. Жалаң дөңгелек цилиндрін көлденең орай ағу кезіндегі гидродинамика және жылу алмасу. Ламинарлы және турбулентті шекаралық қабаттың ажырау бұрышы.

Цилиндр шеңбері бойынша жылу беру коэффициентін өзгерту

Құбырды сұйықтың көлденең ағынымен орай ағу бірқатар ерекшеліктермен сипатталады. Бірқалыпты, үзіліссіз цилиндрді орай ағу (6.1-сурет) тек Рейнольдс

$$Re = \frac{w_0 \cdot d}{\nu} < 5 \quad (w_0 - \text{шоғырланатын ағын жылдамдығы, } d - \text{цилиндрдің сыртқы диаметрі})$$

санының мәндерінде орын алады. $Re > 5$ кезінде көлденең орай ағылатын цилиндр қиын орай ағылатын дене болып табылады.



6.1-сурет. Бірқалыпты, үзіліссіз цилиндрді орай ағу

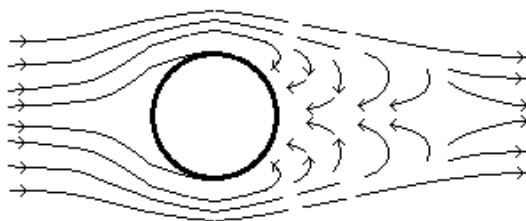
Құбырдың алдыңғы жартысында түзілетін шекаралық қабат, артқы бөлігінде оның үстіңгі бетінен ажыратылады және цилиндрдің артында екі симметриялы құйын түзіледі (6.2-сурет).



6.2-сурет. Цилиндрді орай ағу

Рейнольдс санын әрі қарай көбейту кезінде құйындар ағын бойынша цилиндрден барынша алыс созылады. $Re > 10^3$ кезінде құйындар оқтын-оқтын құбырдан ажыратылады және цилиндрдің артында құйын жолын түзе отырып, сұйық ағынымен айналып әкетіледі (6.3-сурет). Шекаралық қабаттың ажырауы ағын бойында қысымның өсу және сұйықты қатты қабырғамен тежеу салдары болып табылады. Цилиндрдің алдыңғы жарты бөлігін

орай ағу кезінде ағын қимасы азаяды, ал сұйықтың жылдамдығы артады. Бұл ретте цилиндрдің үстіңгі бетіндегі статикалық қысым түседі. Керісінше, артқы бөлігінде статикалық қысым артады, себебі мұнда жылдамдық азаяды. Тұтқырлық күші әсерінің есебінен және осыған сәйкес цилиндрдің үстіңгі бетіндегі сұйықтың кинетикалық энергиясы аз болады. Ағын бойымен қысымның өсуі сұйықты тежеуге және келесі кері қозғалыстың пайда болуына әкеледі. Қайтарма ағын дененің үстіңгі бетінен шекаралық қабатты ығыстырады, ағынның ажырауы және құйындардың түзілуі жүзеге асады.

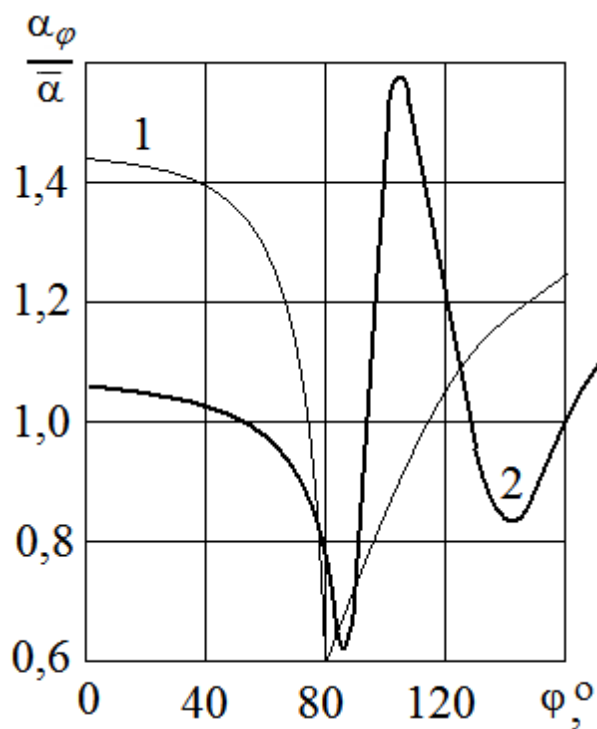


6.3-сурет. Цилиндрді орай ағу

Құбыр бетінен шекаралық қабаттың үзілу орны ламинарлы немесе турбулентті ұзу орнының алдында қабаттағы қозғалыс болып табылатындығына байланысты. Рейнольдс санының салыстырмалы шағын мәндерімен және шоғырланатын ағынның турбуленттілігінің аз дәрежесімен сипатталатын ламинарлы шекаралық қабаттың ажырауы, шамамен, $82-84^\circ$ -қа тең ϕ бұрышында (бұрыш құбырдың алдыңғы нүктесінен есептеледі) орын алады. Re өсуі кезінде шекаралық қабаттың кинетикалық энергиясы артады. Қысым өсуінің есебінен ағынды тежеу ажырауға емес, қабаттағы қозғалыстың турбулентті түрге ауысуына әкеледі. Қосымша кинетикалық энергия турбулентті үлгілер есебінен сыртқы ағыннан қабатқа ауыстырылады. Нәтижесінде ажырау орны ағын бойынша төмен жылжиды және турбулентті шекаралық қабат $120-140^\circ$ бұрышында ажырайды. Ажырау орнын жылжыту цилиндрдің артындағы құйынды аймақты азайтуға әкеледі, цилиндрді орай ағу жақсарады.

Шекаралық қабатта турбулентті ағын басталатын Re санының критикалық мәні әр түрлі қондырғыларда эксперименттер жасаған әр түрлі авторлармен $10^5 - 4 \cdot 10^5$ шектерінде алынған. Оның шамасына цилиндрге құйылатын сұйық ағынының турбуленттілік дәрежесі және басқа да факторлар, оның ішінде тәжірибелік қондырғының конструкциясы айтарлықтай әсер етеді. Сол себепті $Re_{кр} = 2 \cdot 10^5$ мәні қабылданған.

Құбырды орай ағудың өзіндік сипаты жылу беруке де әсер етеді. Ламинарлы ағын кезінде цилиндрдің шеңбері бойынша жылу беру коэффициентін өзгерту қисығы (6.4-сурет) бір минимумға ие (1), ол шекаралық қабаттың ажырау нүктесіне сәйкес келеді. Цилиндрдің артқы бөлігі күрделі құйынды қозғалыс сипатына ие сұйықпен шайылады, онымен жылу беру коэффициентінің мәні анықталады. Шағын Re кезінде цилиндрдің артқы бөлігінің жылу бергіштігі аз болады, Re санының өсуімен ол көбейеді және құбырдың алдыңғы бөлігінің жылу бергіштігімен теңелуі мүмкін. (2) қисықта екі минимум бар. Біріншісі ламинарлы ағыннан турбуленттіге ауысуға сәйкес келеді. Бұл ретте жылу беру коэффициенті күрт өседі. Re санының үлкен мәндерінде ол екі-үш есе артуы мүмкін. Жылу беру ең үлкен шамасы $\phi = 120^\circ$ кезінде болады. Екінші минимум турбулентті шекаралық қабаттың ажырау орнына сәйкес келеді.



6.4-сурет. Ламинарлы ағын кезінде цилиндрдің шеңбері бойынша жылу беру коэффициентін өзгерту қисығы

Ажырау алдында жылу беру төмендеуін шекаралық қабатты тежеумен түсіндіруге болады. Ажырау орнының артында құбыр күрделі қозғалыс сипатына ие құйындармен шайылады. Мұнда жылу беру бірнеше есе өседі. Біздің құйынды аймақ туралы біліміміз аса шектелген.

6.2. Көлденең шайылатын цилиндрдің орташа жылу бергіштігі. Цилиндрдің жылу беру коэффициентінің шабуыл бұрышына тәуелділігі

Осылайша, цилиндрдің жылу бергіштігі шаю сипатымен тығыз байланысты. Шаю көрінісінің күрделілігіне байланысты жылу беруді өзгерту сипаты да күрделі, бұл есепті теориялық шығару қиындығын анықтайды. Қазіргі уақытқа дейін теориялық формулалармен тек ламинарлы қабатпен шайылатын цилиндр учаскесінің жылу бергіштігін сипаттау мүмкін болды.

Шеңбері бойынша орташа цилиндрді толық эксперименттік зерттеулер А.А. Жукаускаспен жүргізілген. Ол басқа авторлардың тәжірибелік деректерін пайдаланған. Тәжірибелік деректерді жалпылау нәтижесінде шеңбері бойынша орташа цилиндрдің жылу беру коэффициентін есептеуді келесі формулалар бойынша жүзеге асыруға болатындығы алынған [3]:

$8 < Re_{cd} < 10^3$ кезінде;

$$Nu_{cd} = 0,5 \cdot Re_{cd}^{0,5} \cdot Pr_c^{0,38} \cdot (Pr_c / Pr_\kappa)^{0,25}; \quad (6.1)$$

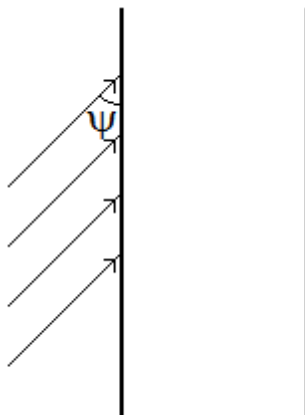
$10^3 < Re_{cd} < 2 \cdot 10^5$ кезінде;

$$Nu_{cd} = 0,25 \cdot Re_{cd}^{0,6} \cdot Pr_c^{0,38} \cdot (Pr_c / Pr_\kappa)^{0,25}. \quad (6.2)$$

Осыған ұқсас өлшемдерді есептеу кезінде анықтаушы сызықтық өлшемге құбырдың сыртқы диаметрі қабылданды, ал жылдамдық цилиндр орналасқан арнаның ең тар көлденең қимасына орналастырылған. Қабырғаның орташа температурасы кезінде алынған Прандтль санын қоспағанда, сұйықтың орташа температурасы анықтаушы температура болып табылады.

(6.1) және (6.2) формулалары құбырдың осімен ағынның бағытымен жасалған шабуыл бұрышы $\psi = 90^\circ$ болған кездегі жағдай үшін дұрыс (6.5-сурет). Егер $\psi < 90^\circ$, жылу беру азаяды. $\psi = 30 - 90^\circ$ бұрыштары үшін жуықталған тәуелділікті пайдалануға болады:

$$\varepsilon_\psi = \alpha_\psi / \alpha_{90^\circ} = 1 - 0,54 \cdot \cos^2 \psi.$$

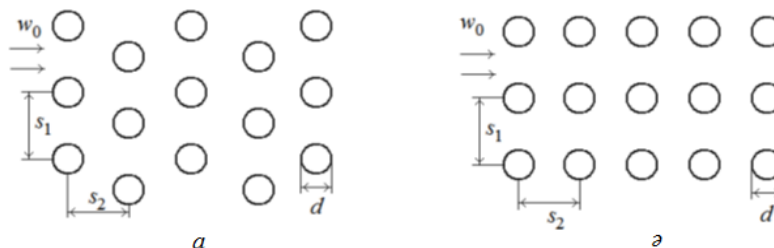


6.5-сурет. Құбырдың осімен ағынның бағытымен жасалған шабуыл бұрышы

$\psi = 0^\circ$ шабуыл бұрышы құбырды сұйық ағынымен бойлық шаю сәйкес келеді. Формулада көрініп тұрғандай, бойлық шаю неғұрлым жоғары жылу беругі береді. Шабуылдың $\psi = 0 - 30^\circ$ бұрыштарында ε_ψ мәні шабуыл бұрышынан басқа өзге де факторларға тәуелді болады, сол себепті қарапайым аналитикалық тәуелділік болмайды.

6.3. Құбырлардың дәліздік және шахматтық бумаларын көлденең орай ағу кезіндегі жылу алмасу

Жылу алмасу құрылғылар сирек бір көлденең шайылатын құбырлардан орындалады, себебі бұл кезде жылу алмасудың үстінгі беті үлкен болмайды. Әдетте құбырларды бумаға жинайды. Техникада құбырлар бумасының негізгі екі типі жиі кездеседі (6.6-сурет): шахматтық (а) және дәліздік (ә).



6.6-сурет. Құбырлар бумасының негізгі типі

Бума сипаттамалары көлденең қадам s_1 (құбыр осьтерінің арасындағы арақашықтық сұйықтың көлденең ағынының бағытында) және бойлық қадам s_2 (бірінен кейін бірі орналасқан құбырлардың көршілес екі қатары осьтерінің арасындағы арақашықтық сұйық

ағынының бағытында) болып табылады. Сонымен қатар бумалар құбырлардың сыртқы диаметрімен d және сұйықтың жүрісі бойынша құбыр қатарларының санымен n сипатталады. Белгілі бір бума үшін s_1 және s_2 қадамдары және құбырларлардың диаметрі d әдетте сұйықтың ағынын бойлап та, көлденең де тұрақты болып табылады.

Бумадағы сұйық ағыны жеткілікті күрделі сипатқа ие. Себебі жанында тұрған бума құбырлары бір-біріне әсер етеді, буманың жеке құбырларын шаю жалғыз құбырды орай ағудан ерекшеленеді. Әдетте құбырлар бумасын қандай да бір каналда орнатады. Сол себепті бумадағы ағын каналдағы ағынмен байланысты болуы мүмкін.

Сұйық ағынының екі негізгі режимі белгілі: ламинарлы және турбулентті. Бұл режимдер бумадағы сұйықтың қозғалысы кезінде де орын алуы мүмкін. Бумадағы сұйық ағынының түрі көбіне бума алдындағы каналдағы ағын сипатына тәуелді. Егер осы шығын мен температураларда бума орнатылған арнадағы ағын бума болмаған кезде турбулентті, онда ол міндетті түрде турбулентті және бумада болады, өйткені буманың өзі турбулизатор. Алайда егер бума оны орнатқанға дейін ламинарлы ағын режимі болған каналға орнатылған болса, онда бұл жағдайда Re санына тәуелді бір немесе екінші ағын түрін алуға болады. Рейнольдс саны аз болған сайын ламинарлық ағын солғұрлым тұрақты. Аз Re кезінде құбыр арасындағы саңылау айнымалы қиманың жеке саңылаулы түрдегі каналдарын түзеді (құбырлардың арасындағы ара қашықтық өте үлкен болатын шектік жағдайды қоспағанда).

Техникада бумадағы сұйық ағының турбулентті түрі жиі кездеседі. Мысалы, қазандық агрегаттарының көлденең шайылатын құбырдың жылытылатын үстіңгі беттері турбулентті ағынмен шайылады. Алайда бұл жағдайда да жылу алмасудың әр түрлі заңдары орын алады. Бұл құбыр қабырғаларындағы ағынның әр түрлі сипатымен түсіндіріледі. Жылу алмасу заңы құбырлардың үстіңгі бетінде турбулентті шекаралық қабаттың пайда болуы кезінде өзгереді. Егер жеке құбыр үшін $Re_{кр} = 2 \cdot 10^5$ болса, онда бумалар үшін турбулентті шекаралық қабат Re аз сандарында пайда болуы мүмкін және оны жуықтап $Re_{кр} = 1 \cdot 10^5$ ретінде қабылдауға болады.