

7. ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ СҰЙЫҚТЫҢ МӘЖБҮРЛІ АҒУ ПРОЦЕСІН СИПАТТАУ

Құбырлар мен каналдарда сұйықтардың ағуы кезіндегі гидродинамика және жылу алмасу. Гидродинамикалық және жылулық тұрақтандыру учаскелері. Ауырлық күшінің әсері. Жылу беру тұтқырлы және тұтқырлы-гравитациялық режимдері.

7.1. Құбырлар мен каналдарда сұйықтардың ағуы кезіндегі гидродинамика және жылу алмасу. Гидродинамикалық және жылулық тұрақтандыру учаскелері

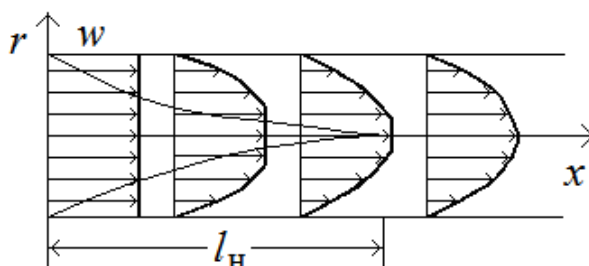
Құбырларда сұйықтардың ағуы кезіндегі жылу беру процесі денеден алыста ағатын сұйық қабырғадан келетін процестердің әсеріне ұшырамайтын үстіңгі беті шектелмеген ағынмен шаю кезіндегі жылу беру процесімен салыстырғанда неғұрлым күрделі болып табылады.

Құбырдың көлденең қимасы соңғы мөлшерге ие. Нәтижесінде құбырда кірісінен біраз қашықтықтан бастап сұйық барлық көлденең қимасы бойынша тұтқырлық күшінің тежеу әрекетіне ұшырайды. Құбырдың соңғы мөлшерінің салдарынан каналдың қимасы бойынша да, ұзындығы бойынша да сұйықтың температурасының өзгеруі жүзеге асады. Осының бәрі жылу беруке әсер етеді.

Құбырлардағы сұйықтың ағыны ламинарлы және турбулентті болуы мүмкін. Ағын режимін Рейнольдс санының шамасы бойынша пайымдайды $Re = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu}$, мұндағы $\bar{w}$ –

сұйықтың орташа жылдамдығы, d – құбырдың ішкі диаметрі. Режимдердің ауысуының төменгі шегі ретінде жуықталып, 2000 немесе 2300-ге тең болатын Рейнольдс санының мәні қабылданған. $Re > 2300$ кезінде жеке ауытқудан кейін ламинарлы ағынға қайта оралмайды. Техникалық құбырларда дамыған турбулентті ағын 10^4 үлкен Рейнольдс санының мәні кезінде орнатылады. Осы екі мәnnің арасында ағынның ауыспалы режимі орналасқан, оған жылу беру ауыспалы режимі де сәйкес келеді.

Егер сұйық құбырға үлкен көлемнен түсетін және құбырдың қабырғалары кірісінде дөңгелектелген болса, онда кірісінде жылдамдықты үлестіру біркелкі болады. Құбырдың бойымен қозғалыс кезінде қабырғаларда гидродинамикалық шекаралық қабат түзіледі, оның қалыңдығы біртіндеп өседі, ал содан кейін кірістен біраз қашықтықта ол l_H құбырына төгіледі және құбырда жылдамдықты тұрақты үлестіру орнатылады (7.1-сурет). Бұл арақашықтық гидродинамикалық бастапқы учаскенің ұзындығы немесе гидродинамикалық тұрақтындыру учаскесі деп аталады. Ағындардың екі типі үшін байқалады, алайда турбулентті режимде ерекше дамиды.



7.1-сурет. Құбырдың бойымен қозғалыс

Егер үлкен көлемнен сұйық тесікке бірқалыпты кіріспен ағатын болса, онда ағынның ламинарлы түрі болуы мүмкін. Түзілетін ламинарлы шекаралық қабат сыни қалыңдыққа жеткен кезде турбуленттіге ауысады, бұл ретте құбыр қимасын толтыру жылдам жүреді.

Ауысу аймағында ағын тұрақсыз болады. $Re > 5 \cdot 10^4$ кезінде құбырдың басынан бастап турбулентті шекаралық қабат дамиды. Егер құбыр өткір жиекті болса, онда ламинарлы шекаралық қабатты жылдам бұзатын турбулентті құйындар түзіледі.

Бастапқы гидродинамикалық учаскенің ұзындығы Рейнольдс санына тәуелді болады, оның жуықталған мәнін келесі формулалар бойынша есептеуге болады [1]:
ламинарлы ағын үшін

$$l_n / d = 0,065 \cdot Re,$$

турбулентті ағын үшін

$$l_n / d = 1,45 \cdot Re^{1/4}.$$

Егер гидродинамикалық ағын тұрақтандырылған болса, яғни $l > l_n$, онда изотермиялық ламинарлы ағын кезіндегі ағынның ағуы бойынша жылдамдық параболамен бөлінеді (Пуазейль профилі):

$$w = w_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right],$$

мұндағы r_0 – құбыр радиусы; $w_{\max}$ – құбыр осіндегі жылдамдық. Бұл ретте орташа жылдамдық ең жоғарғының жартысына тең: $\bar{w} = 0,5 \cdot w_{\max}$.

Турбулентті қозғалыс кезінде қимасы бойынша жылдамдықты үлестіруді бір теңдеумен сипаттау мүмкін болмайды, бұл турбулентті ағынның неғұрлым күрделі құрылысымен түсіндіріледі. Құбырдың барлық дерлік қимасы турбулентті ағатын сұйықпен толтырылған. Рейнольдс санының үлкен мәндерінде ламинарлы қабаттың қалыңдығы диаметрдің ең аз бөлігін құрайды. Осыған қарамастан ламинарлы қабат негізгі термиялық кедергі болып табылады, себебі ол арқылы жылу тек жылу өткізгіштікпен беріледі.

Сұйықтың тұрақтандырылған турбулентті ағыны кезінде құбырларда жылдамдықты көлденең қима бойынша үлестіру күрделі парабола түріне ие. Ең жоғарғы жылдамдық бұрынғысынша құбырдың осінде болады. Жылдамдық барынша қабырғаға жақын өзгереді.

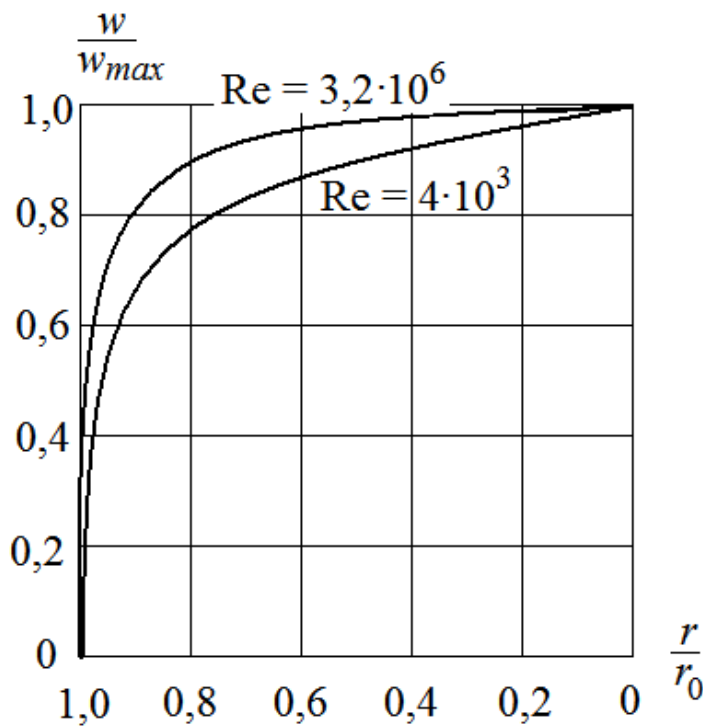
Турбулентті ағын кезінде $\frac{w}{w_{\max}} = f\left(\frac{r}{r_0}, Re\right)$. Бұл функцияның графигі 7.2-суретте берілген.

Рейнольдс саны үлкен болған сайын жылдамдық қабырға және құбырдың неғұрлым қуыс орталық бөлігіне жақын өзгереді. Ағынның орташа жылдамдығының максималдыға қатысы бұл жағдайда Рейнольдс санының функциясы болады. Эксперименттік жолмен орташа жылдамдықтың максималдыға қатысы $\bar{w} / w_{\max} = 0,8 - 0,9$ құрайтындығы алынған.

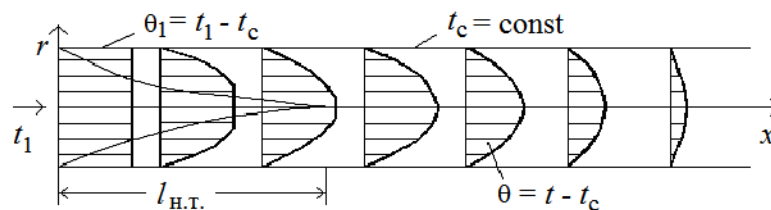
Қарастырылған сұйықтың құбырлардағы ағынының заңдылықтары изотермиялық ағын кезінде дұрыс.

Пластинаны шаю кезіндегідей, құбырдағы сұйықтың ағыны кезіндегі жылу беру ұзындығы бойынша бірдей емес. Сұйықтың құбыр бойымен қозғалыс шамасы бойынша қабырға маңылық қабаттардың жылуы немесе салқындауы байқалады.

Бұл ретте құбырдың басында сұйықтың орталық ядросы құбырдың кірісіндегі сұйықтың температурасына тең температураға ие болады және жылу алмасуға қатыспайды. Температураның барлық өзгерістері қабырға маңылық қабаттарға шоғырланған. Осылайша, құбырдың бетінде оның бастапқы бөлігінде жылулық шекаралық қабат түзіледі, оның қалыңдығы кірістен қашықтау шамасына қарай артады (7.3-сурет).



7.2-сурет. Турбулентті ағын кезінде $\frac{w}{w_{\max}} = f\left(\frac{r}{r_0}, \text{Re}\right)$ функцияның графигі



7.3-сурет. Құбырдың бетінде жылулық шекаралық қабат

Кірістен белгілі бір қашықтықта $l_{н.т.}$ тең жылу қабаттары қабысады, әрі қарай барлық сұйық жылу алмасуға қатысады. $l_{н.т.}$ ұзындықпен құбыр учаскесі жылулық тұрақтандыру учаскесі немесе бастапқы термиялық учаске атауымен аталады. Ламинарлы да, турбулентті де ағын кезінде байқалады. Жылулық тұрақтандыру учаскесінен кейін тек қимасы бойынша температура ғана емес, құбыр осіндегі сұйық температурасы да өзгереді, себебі жүйе жылулық тепе-теңдікке ұмтылады ($\vartheta \rightarrow 0$).

Жылулық тұрақтандыру учаскесінің ұзындығы факторлардың көп санына тәуелді болады. Шекаралық қабат теориясынан гидродинамикалық және жылулық шекаралық қабаттар қалыңдығының қатысы Прандтль санының шамасына тәуелді болатындығынан шығады, сол себепті $\text{Pr} < 1$ $l_{н.т.} < l_h$ үшін, ал $\text{Pr} > 1$ $l_{н.т.} > l_h$ үшін.

Ағынның ламинарлы режимі кезінде жылулық тұрақтандыру учаскесінің ұзындығын келесі формулалар бойынша анықтауға болады [1]:

$$\begin{aligned} t_c = \text{const} \quad l_{н.т.} / d &= 0,05 \cdot \text{Re}_ж \text{ шарты үшін,} \\ q_c = \text{const} \quad l_{н.т.} / d &= 0,07 \cdot \text{Re}_ж \text{ шарты үшін.} \end{aligned}$$

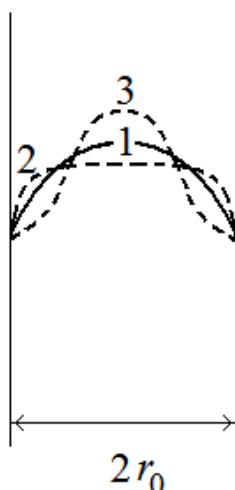
7.2. Ауырлық күшінің әсері. Жылу беру тұтқырлы және тұтқырлы-гравитациялық режимдері

Құбырдағы сұйықтың ламинарлы ағыны кезінде изотермиялық емес қозғалыстың екі режимі болады: тұтқырлы және тұтқырлы-гравитациялық, олар үшін жылу беру режимдері әр түрлі болады.

Тұтқыр режим тұтқырлық күш көтеру күштерінен басым болған кезде орын алады, яғни табиғи конвекцияның әсері болмаған кезде тұтқыр сұйықтардың ағынына сәйкес келеді. Тұтқыр режимнің ықтималдығы, егер құбыр диаметрі мен температуралық қысым аз болса, ал тұтқырлығы үлкен болса өседі.

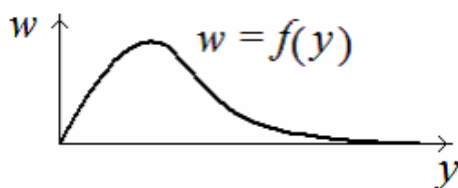
Тұтқыр-гравитациялық режим көтеру күштері жеткілікті үлкен болған жағдайда орын алады, бұл ретте сұйықтың мәжбүрлі қозғалысына табиғи конвекция ағыстары салынады.

Тұтқырлы изотермиялық емес режим кезінде (7.4-сурет) жылдамдық профилі параболалық пуазейлдіктен (1) тұтқырлықтың өзгеруі салдарынан ауытқиды және оның түрі процеске тәуелді болады. Егер жылыту жүретін болса, онда тамшылы сұйықтардың тұтқырлығы азаяды және қабырға маңындағы қабаттардағы жылдамдық артады (2), салқындату кезінде керісінше (3). Бұл факт жылу беру коэффициентін есептеу кезінде жазық пластинаны шаю кезіндегідей болады, қабырғаның температурасы мен сұйықтың температурасы кезінде алынған Прандтль сандары қатысының дәрежелік тәуелділігімен есепке алынатын болады.



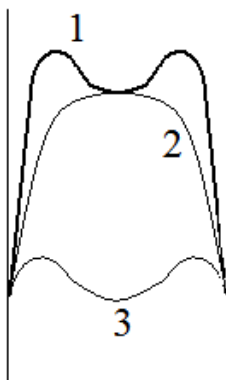
7.4-сурет. Жылдамдық профилі

Тұтқырлы-гравитациялық режим жағдайында жылдамдықты үлестіруге табиғи конвекция ағыстары салынады. Егер мәжбүрлі қозғалыс жоқ болса, онда сұйықтың қабырғадағы еркін қозғалысының жылдамдығының профилі 7.5-суретте берілген. Жылдамдық қабырғада да («жабысу» шарты) және гидродинамикалық шекаралық қабаттың сыртқы шегінде де (сұйықтың мәжбүрлі қозғалысы жоқ) нөлге тең. Еркін және мәжбүрлі қозғалыстың өзара бағытына байланысты олардың бірлесіп көрінуінің үш жағдайы мүмкін болады.



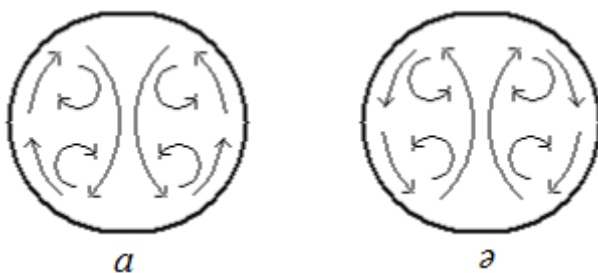
7.5-сурет. Еркін қозғалыс жылдамдығының профилі

1. Еркін (3) және мәжбүрлі (2) қозғалыс бағыттарының сәйкес келуі тік құбырда сұйықтың жоғары қарай ағынына және оны жылытуға немесе сұйықтың төмен қарай ағуына, оны салқындатуға сәйкес келеді (7.6-сурет). Бұл жағдайда қабырғадағы жылдамдық өседі (1), ал жылдамдық эпюрасы екі максимумға ие болады.



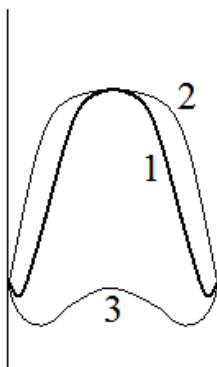
7.6-сурет. Жылдамдығының профилі

2. Еркін және мәжбүрлі қозғалыстың перпендикуляр бағыты көлденең құбырдағы сұйық ағынына сәйкес келеді. Қабырғалар бойымен көтерілетін (а) және төмен түсетін ағындармен салқындатқанда (ә) сұйықтың көлденең айналымы пайда болады (7.7 – сурет). Жылу беру бірінші жағдаймен салыстырғанда сұйықты қосымша араластыру есебінен көбейтіледі.



7.7-сурет. Сұйықтың көлденең циркуляциясы

3. Еркін (3) және мәжбүрлі (2) қозғалыстың қарама-қарсы бағыты (7.8-сурет) сұйықтың тік құбырда жоғары қарай ағуына және оны салқындатуға немесе сұйықтың төмен қарай ағуына және оны жылытуға сәйкес келеді.



7.8-сурет. Жылдамдығының профилі

Бұл жағдайда қабырғадағы жылдамдық кемиді және сұйықтың кері қозғалысымен аумақтар туындауы мүмкін (1). Сұйықты одан да көп араластыру салдарынан жылу беру коэффициентінің ең үлкен мәніне жетеді.

Осылайша, келесідей қорытынды жасауға болады: ламинарлық қозғалыстың изотермиялық ағында жылдамдықтардың параболалық үлестіруімен болмауы мүмкін. Ағынды өзгерту жылу беруге де өз көрінісін табады.