

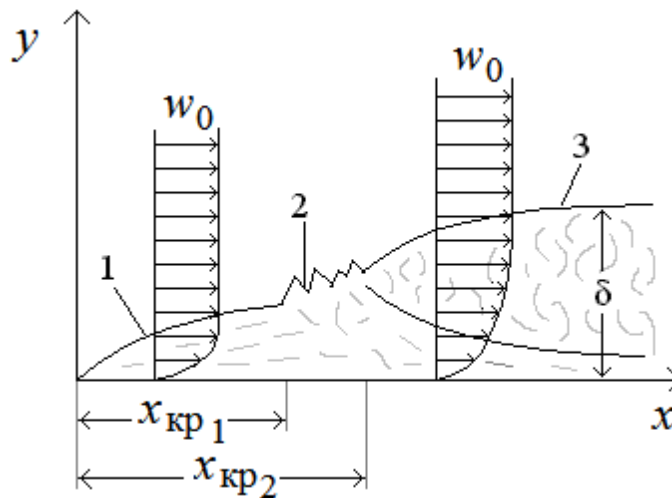
5 ЖАЗЫҚ БЕТТІ МӘЖБҮРЛІ БОЙЛАЙ ОРАЙ АҒУ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУ БЕРГІШТІК

Жылу бергіштіктің сұйықтың ағу режиміне тәуелділігі. Пластинаны орай ағу кезіндегі ламинарлы шектес қабат. Блаузиус есебі. Пластинаны орай ағу кезіндегі жылулықты шектес қабаты. Польшаузен есебі. Сұйықтың физикалық параметрлерін өзгертуге жылу өткізгіштіктің тәуелділігі. Крузилиннің интегралдық ара қатысы. Турбулентті шектес қабат кезіндегі жылу бергіштік.

5.1 Жылу бергіштіктің сұйықтың ағу режиміне тәуелділігі. Пластинаны орай ағу кезіндегі ламинарлы шектес қабат. Блаузиус есебі.

Оңай болуы үшін жазық жылдамдығы мен температурасы қатты денеден алыста тұрақты және, осыған сәйкес, w_0 және t_0 тең сұйықтың ағынымен орай ағылады (5.1-сурет) деп болжаймыз. Ағын пластинаның үстіңгі бетіне параллель. Пластинаның үстіңгі бетінің маңында гидродинамикалық шектес қабат түзіледі, оның шегінде сұйықтың жылдамдығы нөлден ұйытқамаған ағынның жылдамдығына дейін өзгереді. Шектес қабаттағы ағын ламинарлы да (1), және турбулентті де (3) болуы мүмкін. Алайда турбулентті ағу режимінде қабырғаның үстіңгі бетінде ламинарлы ағын режимімен тұтқыр астыңғы қабат түзіледі.

Ламинарлы ағын түрінен турбуленттіге ауысу нүктеде емес, оның шегінде ағын тұрақты емес сипатқа ие және ауыспалы деп аталатын кейбір учаскелерде (2) жүзеге асады.



5.1-сурет. Жазық пластинаны ағынымен орай ағу

Жылу алмасу заңдары ламинарлы шектес қабатта және турбулентті шектес қабатта әртүрлі (ламинарлы шектес қабатта жылуды тасымалдау тек жылу өткізгіштікпен жүзеге асырылады, ал турбулентті шектес қабатта конвекция қосылады), сол себепті қабаттардың шегін анықтау үлкен мәнге ие. Ағын түрі туралы сыни шама бойынша пайымдайды

$$Re = \frac{w_0 \cdot x}{\nu}$$
, мұнда x – жиегінен бастап есептелетін пластинаның бойымен ұзындық.

Тәжірибелер ауысудың 10^4 бастап $4 \cdot 10^6$ дейін Рейнольдс санының мәндері кезінде жүзеге асатындығын көрсетеді. Сонымен қатар, ламинарлы шектес қабаттың бұзылуының басталу координатына шоғырланатын ағынның турбуленттілік дәрежесіне әсер етеді, оны анықтау

елеулі қиындықтар тудырады, себебі бұл шама көптеген факторларға тәуелді болады, сол себепті ағындар режимінің жақындастырылған шегі қабылданған – $Re=10^5$.

Пластинаның үстіңгі бетінде жылу алмасудың болуы кезінде, гидродинамикалықтан басқа, жылулық шектес қабат түзіледі.

Шектес қабат үшін конвективтік жылу алмасудың дифференциалды теңдеулер жүйесі елеулі жеңілдетілген болуы мүмкін. Бұл теңдеулер жүйесі Навье – Стокс теңдеуінен алынады және Прандтль теңдеуі атауына ие. Ол тұрақты физикалық қасиеттерімен сығылмайтын сұйықтар үшін алынған, бұл ретте үйкеліс салдарынан жылуды бөлу сұйық энтальпиясын өзгертуге іс жүзінде әсер етпейді.

Шексіз жазық пластинаны ламинарлы орай ағу кезінде шектес қабаттағы жылдамдық ағын бойымен және оған көлденең, сондай-ақ үйкеліс коэффициенті Блаузиус есебін шығарумен анықталады. Сонымен қатар, бұл есепті шығару процесінде біз координаттан шектес қабаттың қалыңдығы үшін өрнекті аламыз [1]:

$$\delta = \eta \sqrt{\frac{\nu \cdot x}{w_0}},$$

мұнда $\eta = \frac{y}{x} \sqrt{Re}$ – өлшемсіз Блаузиус айнымалысы.

Шектес қабатта сұйық ағынының режимінің жылу бергіштікке әсері жылуды тасымалдау механизмдерінің айырмашылығынан тұрады. Ламинарлы шектес қабатта жылу қабатқа көлденең тек жылу өткізгіштікпен тасымалданады, ал турбулентті шектес қабатта жылу өткізгіштіктен басқа қосымша турбулентті толықсулар есебінен туындайды.

5.2 Пластинаны орай ағу кезіндегі жылулықты шектес қабат. Польшаузен есебі.

Сұйықтың физикалық параметрлерін өзгертуге жылу өткізгіштіктің тәуелділігі

Жазық шектес қабатты қарастыратын боламыз (5.1-сурет). Шоғырланатын тоқтың температурасы T_0 дененің үстіңгі бетінің температурасына T_c қарағанда көп деп шамалайық. Шектес қабаттағы температуралық өріс өлшемсіз температуралық арын үшін

жазылған энергияның стационарлық теңдеулерін шешу нәтижесінде болады $\Theta = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_c}$

[5]:

$$w_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} = a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}.$$

Шектес шарттар:

1) $y \rightarrow \infty$ $\Theta=0$ кезінде денеден алыста;

2) $y=0$ $\Theta=1$ кезінде дененің үстіңгі бетінде.

Берілген есеп Э. Польшаузенмен шығарылған (1921 ж.).

Энергия теңдеуі қарапайым дифференциалды теңдеуге түрлендіріледі, егер оған кіретін туындылар айнымалы бойынша туынды арқылы өрнектеледі және Блаузиустың жылдамдықтар үшін ара қатысының гидродинамикалық есептерін шығарудан туындайтындығын ескереді. Нәтижесінде дифференциалды теңдеу алынады

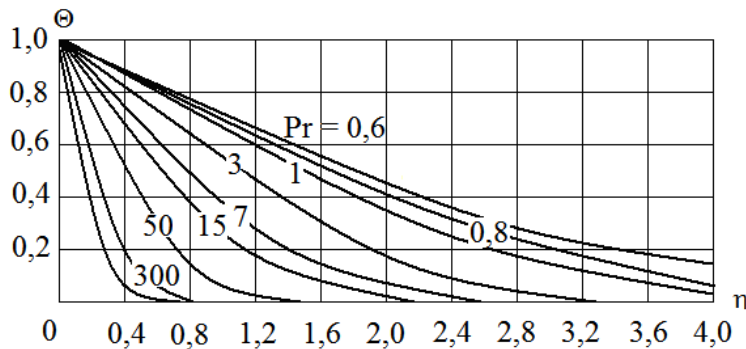
$$\Theta'' + \frac{1}{2} Pr \varphi \Theta' = 0,$$

мұнда φ – мұндай функция, бұл $\varphi'(\eta) = \nu_x / \nu_0$.

Бұл дифференциалды теңдеуді шығару келесі түрге ие:

$$\Theta = 1 - \frac{\int_0^\eta (\varphi'')^{\text{Pr}} d\eta}{\int_0^\infty (\varphi'')^{\text{Pr}} d\eta}.$$

Графикалық түрдегі есептеудің нәтижелері 5.2-суретте берілген.



5.2-сурет. Есептеудің нәтижелері

Тұрақты Нуссельт саны үшін аламыз:

$$Nu_x = F(\text{Pr}) \cdot \sqrt{\text{Re}_x}.$$

0,6 ≤ Pr ≤ 50 Прандтль сандары үшін есептеулерді нәтижелерін аппроксимациялаушы формула алынған F(Pr):

$$Nu_x = 0,33 \cdot \sqrt{\text{Re}_x} \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}}.$$

Бұл жағдайда $\frac{k}{\delta} = \frac{1}{\text{Pr}^{1/3}}$. Сонымен қатар, Нуссельт саны үшін берілген формула

пластинаның тұрақты температурасы кезінде тұрақты қасиеттермен сұйықтар үшін дұрыс болады $T_c = \text{const}$. Егер шектес қабатта температураның айырмасы үлкен болмаса, онда алғашқы жуықтауда сұйықтың қасиетін тұрақты деп санауға болады және оларды температураға жатқызады T_f – шектес қабаттың орташа температурасына тең $T_f = 0,5 (T_0 + T_c)$.

Осылайша, жылу бергіштіктің тұрақты коэффициенті жылдамдық, сызықтық мөлшер және физикалық параметрлер функциясы болып табылады: жылу өткізгіштік, климаттық тұтқырлық және температура өткізгіштік, – олар, өз кезегінде, температура функциясы болып табылады. Сол себепті, қандай сызықтық мөлшер сипатты болып табылатындығын көрсететін «x» индексінен басқа (мұнда пластинаның алдыңғы жиегінен есептелетін ағымдағы координат), оның барысында физикалық параметрлер алынуы тиіс температураны көрсету керек. «ж» индексі сұйықтың температурасына сәйкес келеді, «с» индексі – қабырғаның температурасына. Сонымен қатар, тәжірибеден Нуссельт критерийі жылу ағынының бағытына тәуелді болатындығы алынған, яғни сұйық жылытылады немесе суытылады. Бұл мәселені еңсеру үшін формулаға ағынның көлденең қимасында физикалық параметрлердің айнымалылығына түзету енгізіледі, ол А.В. Михеев атымен аталады, ағынның ортасындағы сұйықтың температурасы кезінде және қабырғаның температурасы кезінде алынған Прандтль сандарының қатысының дәрежелік тәуелділігін білдіреді $(\text{Pr}_{\text{жс}}/\text{Pr}_c)^{0,25}$. Бұл түзету тамшылы сұйықтардың ағуы кезінде жылу бергіштікті есептеу үшін қажет. Газдар үшін ол қолданылмайды.

Онда жазық пластинаны ламинарлы бойлай орай ағу кезінде жылу бергіштіктің тұрақты коэффициенті (10^5 аз Рейнольдс сандары үшін) шектес қабаттың шегінде температураның елеулі айырмасы келесі өрнекпен анықталады [18]:

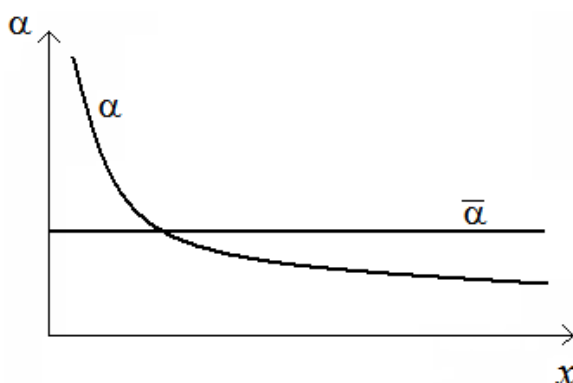
$$Nu_{x_{жс}} = 0,33 \cdot \sqrt{Re_{x_{жс}}} \cdot \sqrt[3]{Pr_{жс}} \cdot (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}.$$

Пластинаның ұзындығы бойынша орташа жылу бергіштік коэффициенті келесі өрнектен анықталады [3]

$$Nu_{l_{жс}} = 0,67 \cdot \sqrt{Re_{l_{жс}}} \cdot \sqrt[3]{Pr_{жс}} \cdot (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}.$$

Ол пластинаның ұзындығы бойынша алынған қосарланған тұрақтыға тең. Бұл жылу бергіштіктің орташа коэффициентін анықтаудан алынады (4.1) теңдеуі.

Координатадан жылу бергіштіктің тұрақты және орташа коэффициентінің графикалық тәуелділігі 5.3-суретте берілген. $x=0$ кезінде $\alpha \rightarrow \infty$ аламыз. Бұл температуралық арынның бұл нүктесінде соңғы және ϑ_0 тең, ал температура градиенті шексіздікке ауады.



5.3-сурет. Координатадан жылу бергіштіктің тұрақты және орташа коэффициентінің графикалық тәуелділігі

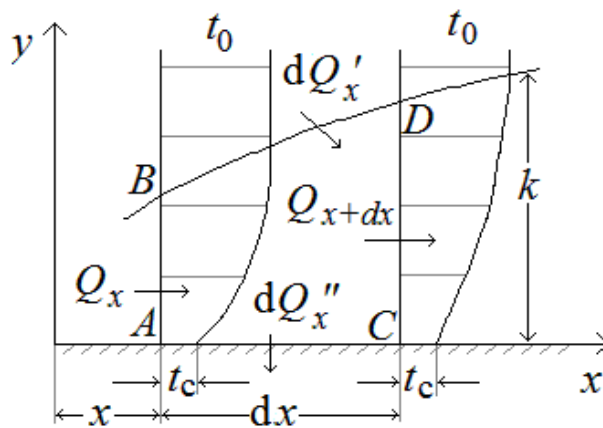
Пластинаны көлденең орай ағу кезінде жылу алмасу туралы есепті теориялық шығару қабырғаға тұрақты жылу ағыны жағдайында $q_c = \text{const}$ жылу бергіштіктің тұрақты коэффициенті үшін келесі өрнекке әкеледі (сұйықтың қасиеті шектес қабаттың температурасына жатады):

$$Nu_x = 0,46 \cdot \sqrt{Re_x} \cdot \sqrt[3]{Pr}.$$

5.3 Кружиллиннің интегралдық ара қатысы

Жылу масса алмасудың күрделі жағдайларында (сыртқы ағынның жылдамдығын күрделі өзгерту кезіндегі денені орай ағу, кеуекті қабырға арқылы салқындатушы газды үрлеу және т.б.) жылу бергіштік коэффициентін және үйкеліс кедергісін есептеуді жуықталған әдісі қолданылады. «Интегралдық» деп аталатын әдістің негізінде қарапайым дифференциалды теңдеулер (интегралдық ара қатыстар) алынады, оларды қозғалыс және энергия теңдеуінің шектес қабатының қалыңдығы бойынша интегралдай отырып, алуға болады. Импульстардың интегралдық ара қатысы 1921 ж. Т.Карманмен алынған, ал жылу ағынының интегралдық теңдеуі алғаш рет 1936 жылы Г.Н. Кружиллинмен берілген.

Бір бірінен dx ара қашықтықта тұратын екі қималардың көмегімен жылулық шектес қабатты шексіз шағын көлемді V айырып аламыз (5.4-сурет).



5.4-сурет. Жылулық шектес қабат

Бұл көлемнің үстіңгі беті бақылау беті болып табылады. Бұл көлемді шектейтін жазықтықтар сызба бетіне параллель, бір бірінен бірлік қашықтықта болады. Жылу балансының теңдеуін жазамыз (энергия теңдеуі):

$$\rho \cdot c_p \cdot w_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \cdot c_p \cdot w_y \frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{\partial q}{\partial x}.$$

Бұл теңдеуді интегралдау және кейбір түрлендіру нәтижесінде Кружилиннің интегралды ара қатысын аламыз [3]:

$$\frac{d}{dx} \left(\int_0^k (T_0 - T) \cdot w_x \cdot dy \right) = \frac{q_c}{\rho \cdot c_p}.$$

5.4 Турбулентті шектес қабат кезіндегі жылу бергіштік

Сұйықтың турбулентті ағыны жылдамдықтың толтырылған профилімен сипатталады, жылдамдықты негізгі өзгерту ламинарлы тұтқыр қабатта шоғырландырылған. Сонымен қатар, турбулентті лүпіл салдарынан жылу көлденең бағытта жылжитын сұйықтың макроскопиялық бөлшектеріне ауысады. Жылдамдық профилі жағдайындағыдай, мұнда температура профилі параболалықтан елеулі ерекшеленеді, ол да неғұрлым толған.

Сұйықты араластыру көлденең бағытта жылу тек жылу өткізгіштікпен ғана емес, конвекциямен де тасымалданады, сол себепті жылу бергіштік коэффициенті пластинаны ламинарлы орай ағу кезіне қарағанда жоғары болуы тиіс. Пластинаны орай ағу кезінде турбулентті шектес қабатта жылу алмасудың теориялық есептулері көптеген авторларен жүргізілген. Нуссельт санын іс жүзінде есептеу үшін 10^5 үлкен Рейнольдс саны кезінде және 0,6 үлкен Прандтль сандары кезінде келесі формуланы пайдалануға болатындығы алынған [1]

$$Nu_x = 0,0296 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \varepsilon_T.$$

Ұқсастық сандарын анықтау кезінде физикалық қасиеттер ұйытқымаған ағынның температурасы бойынша таңдалады. Тамшылы сұйықтар үшін $\varepsilon_T = \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,11}$ жылыту

кезінде, $\varepsilon_T = \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,25}$ салқындату кезінде; газдар үшін $\varepsilon_T = \left(\frac{T_c}{T_{жс}} \right)^{-0,36}$ жылыту кезінде,

$\varepsilon_T = \left(\frac{T_c}{T_{жс}} \right)^{-0,5}$ салқындату кезінде.

Жылу бергіштіктің коэффициентін жуықтап есептеу үшін жылу бергіштіктің тұрақты коэффициенті келесі өрнектен анықталады

$$Nu_{жс} = 0,0296 \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25}.$$

Жылу бергіштіктің орташа коэффициентін келесі өрнектен анықтайды

$$Nu_{lжс} = 0,037 \cdot Re_{lжс}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25}.$$

Шектес қабат теориясының күрделі есептерін шығару үшін С.С. Кутателадзе және А.И. Леонтьев жуықтатылған әдісті әзірлеген, оның басымдылығы, оның көмегімен қабырғадағы шектес шарттар, шектес қабаттың жоғары бірқалыпсыздығы, газдың сығылғыштығы (Мах саны), қысым градиенті, газ ағынындағы химиялық реакциялар, кеуекті қабырға арқылы газды үрлеу немесе сору және т.б. секілді факторлардың үйкеліске және жылу алмасуға әсерін талдаудың қарапайымдылығына қатысты болуынан тұрады. Бұл толығырақ арнайы әдебиетте берілген.