

FTAMP 30.17.23

А.К. Кадириббетова¹ – негізгі автор, | ©
Р.Ж. Наметкулова²

ORCID

¹Магистр, аға оқытушы, ²Аға оқытушы¹<https://orcid.org/0000-0003-2839-6177>; ¹<https://orcid.org/0000-0002-1658-152X>

М.Х. Дулатиатындағы Тараз өңірлік университеті,



Тараз қ., Қазақстан Республикасы

¹ak.kadirimbetova@dulatv.kz<https://doi.org/10.55956/RHMF6822>

ҚЫЗДЫРЫЛҒАН БӨЛШЕКТІҢ ТҰТҚЫР СҰЙЫҚТАҒЫ ҚОЗҒАЛЫСЫН ТЕОРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Стокс жуықтауындағы Рейнольдс және Пекле сандарының кіші мәндері үшін қыздырылған қатты сфералық бөлшектің тұтқыр сұйықтағы қозғалысына бөлшектің беті мен одан алыс аймақ арасындағы температуралық ауытқуға байланысты ішкі жылу бөлінудің әсері туралы есептің жуықталған аналитикалық шешімі алынды. Гидродинамика теңдеулерін шешу үшін бөлшектің жылу өткізгіштік коэффициентінің температураға дәрежелік түрдегі және сұйық тұтқырлығының температураға экспоненттік-дәрежелік түрдегі тәуелділіктері қолданылды.

Тірек сөздер: тұтқыр сұйық, динамикалық тұтқырлық, Рейнольдс саны, температура, жылдамдық, жылу өткізгіштік коэффициенті, кедергі күші.



Кадириббетова, А.К. Қыздырылған бөлшектің тұтқыр сұйықтағы қозғалысын теориялық зерттеу [Мәтін] / А.К. Кадириббетова, Р.Ж. Наметкулова // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2024. – №2(84). – Б.448-457. <https://doi.org/10.55956/RHMF6822>

Кіріспе. Мақалада бүкіл кеңістікті алып тұрған тұтқыр сығылмайтын сұйықтағы радиусы R біртекті қыздырылған қатты сфералық бөлшектің орнықты қозғалысы қарастырылады. Қарастырылып отырған гидрозольдық бөлшек өзінің ішкі жылу көздерінің әсерінен қыздырылады. Ал ішкі жылу көздерінен таралатын жылу ағынының көлемдік тығыздығы $q_i(r, \theta)$, мұндағы r және θ – сфералық координаттар ($0 \leq \theta \leq \pi$). Ішкі жылу көздері көлем бойынша өтетін химиялық реакциямен, заттық бөлшектердің радиоактивтік ыдырауымен, сондай-ақ электромагниттік сәулелердің жұтылуымен және т.б. себептерден болуы мүмкін. Ендеше, ішкі жылу көздерінен таралатын жылу ағынының әсерінен бөлшектің бетіндегі орташа температура оның айналасындағы сұйықтың температурасымен бірдей болмауы мүмкін. Ары қарай бөлшектің бетінің температурасының артуы оны қоршаған сұйықтың термодинамикалық параметрлеріне, сұйықтың ағысының жылдамдығына және қысымның мәніне әсерін тигізеді. Тасымалдау процестерін сипаттайтын шамалардың ішінен тек тұтқырлық коэффициенті Сұйықтағы тасымалдау құбылыстарының барлық параметрлерінен тек тұтқырлық коэффициенті температураға тәуелділігін ерекше атап өтуге

болады. Сұйықтың динамикалық тұтқырлығының температураға тәуелділігін есептеу үшін

$$\mu_e = \mu_\infty \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \left(\frac{T_e}{T_\infty} - 1 \right) \right] \exp \left\{ -A \left(\frac{T_e}{T_\infty} - 1 \right) \right\}, \quad (1)$$

(1)-өрнекті қолданамыз. Бұл формула кең температуралық аралықта сұйық ішкі кедергісін анықтау мақсатында пайдаланылады ((1)-өрнектен Рейнольдс қатынасын $F_n = 0$ шарты орындалған жағдайда алуға болады [1]):

мұндағы A және F_n – тұрақтылар, $\mu_\infty = \mu_e(T_\infty)$, T_∞ – бөлшектен алыс жердегі сұйықтың температурасы. Мысалы, су үшін $A = 5.779$, $F_1 = -2.318$, $F_2 = 9.118$, $T_\infty = 273K$, ал глицерин үшін $A = 17.29$, $F_1 = -1.228$, $F_2 = 7.022$, $T_\infty = 303K$. (1)-формуланьң салыстырмалы қателігі бұл жағдайда 3%-дан аспайды.

Тұтқыр сұйыққа қатысты физикалық шамалар « e », ал бөлшекті сипаттайтын шамаларды « i » индекстерімен; бөлшектен шексіз алыс кеңістіктегі сұйықтың параметрлері « ∞ » индексімен белгіленген.

Бірқалыпты қыздырылмаған бетпен сұйық өзара әсерлесе отырып, осы бетпен жанаса температураның градиентімен бағыттал қозғала бастайды. Осылайша, жылулық сырғу деп аталатын құбылыс орын алады. Жылулық сырғудың әсерінен қосымша F_q күш пайда болады. Бұл күштің шамасы ортаның тұтқыр кедергі күшінің шамасына тең болған кезде, бөлшек бірқалыпты қозғала бастайды. Осылайша, бөлшектің айналасында үлкен салыстырмалы ауытқулары кезінде яғни $(T_{is} - T_\infty)/T_\infty \sim O(1)$ болғанда, мұнда T_{is} – тұтқыр ортадағы бөлшек бетінің орташа температурасы, қатты дененің тұрақталған қозғалысы пайда болуы мүмкін.

Электромагниттік сәуленің әсерімен газ бөлшектерінің қыздырылуы фотофорез деп аталады және бұл жақсы зерттелген құбылыс. Газдардағы қатты бөлшек бетіндегі жылдамдықтың жанама құраушысы ($r = R$):

$$U_\theta = K_{is} \frac{\nu_e}{RT_e} \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \quad (2)$$

мұндағы: U_θ – U ағыс жылдамдығының сфералық координаттардағы жанама құраушысы; ν_e – газдың кинематикалық тұтқырлығы; T_e – газдың термодинамикалық температурасы; K_{is} – газдардың молекулалық-кинетикалық теориясымен анықталатын жылулық сырғу коэффициенті (импульстің тангенциал құраушысы мен энергияның аккомодациялық коэффициенттері $\alpha_\tau = 1$, $\alpha_E = 1$ болғандағы $K_{is} = 1.152$)[4,2,3].

Қатты гидрозольды бөлшектің бетімен сұйықтың сырғуы туралы есепті алғаш рет Бассе [5] шешкен болатын. Ол сұйықтың қатты денеге қатысты оның бетіндегі тангенциаль жылдамдығы тангенциаль кернеуге тура пропорционал болады деп болжады. Осы екі шаманы байланыстыратын K_{is} пропорционалдық тұрақтыны ол сырғанау коэффициенті деп атады. Егер бұл коэффициент голден өзгеше болса, онда ол тек сұйықтың табиғатына және қатты бетке байланысты деп жорамалданады. Егер сфера тыныштықта тұрған болса, және сұйық оған жұғып ағатын болса, онда осесимметриялық ағыстарға арналған бұл гипотеза мына түрге келеді (Бассе гипотезасы):

$$U_e = K_{is}\mu_e \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} - \frac{U_\theta}{r} \right)$$

Изотермиялық емес тұтқыр сұйықтағы сфералық пішінді гидрозольды қатты бөлшектің ішкі жылу бөлінуінің әсері туралы теорияны құру өте күрделі мәселе болып табылады. Бұл мына жағдайларға байланысты:

а) нақты бөлшектің сұйықтағы қозғалысы гидродинамикалық және температуралық өрістердің бірқалыпсыз таралуынан туындайтын беттік құбылыстармен де, көлемдік құбылыстармен де анықталады;

ә) ағыстың себебі сұйықтың қатты бетті жанай сырғуы болып табылады. Біртекті емес сұйықтардың қатаң математикалық теориясы болмағандықтан қатты денелердің бетімен сұйықтың жылулық сырғу теориясы соңына дейін зерттелмегені белгілі.

б) бұл – бөлшек бетінің бірқалыпсыз қыздырылуы орын алуына себеп болатын жылулық энергияның қатты дененің ішінде таралу механизмі.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Бүкіл кеңістікті толтырып тұрған тұтқыр сығылмайтын сұйықтағы радиусы R қатты бірқалыпты емес қыздырылған сфералық бөлшектің орныққан қозғалысы қарастырылады. Гидрозольдық бөлшек оның көлемінде әртүрлі таралған тығыздығы $q_i(r, \theta)$ ішкі жылу көздерінен берілетін жылу есебінен қыздырылады. Есепте қабылданған шарттар: бөлшектің қозғалысы кезінде фазалық ауысу болмайды; бөлшектің жылу өткізгіштік коэффициенті қоршаған сұйықтың жылу өткізгіштік коэффициентінен едәуір үлкен; бөлшектің жылуөткізгіштік коэффициентінің температураға тәуелділігі келесі түрде берілген:

$$\lambda_i = \lambda_{i\infty} t_i^\omega,$$

мұндағы

$$\lambda_{i\infty} = \lambda_i(T_\infty), \quad t_i = \frac{T_i}{T_\infty}.$$

Есепте қарастырылған құбылыс сфералық симметриялы деп болжам жасалды, сондықтан шешу үшін r, θ, φ сфералық координаттар жүйесі қолданылды.

Жылдамдық $\vec{U}_e$, қысым P_e және T_e, T_i температуралар үшін шекаралық шарттар келесі түрде жазылады:

$$\nabla P_e = \mu_e \Delta \vec{U}_e + 2(\nabla \mu_e \nabla) \vec{U}_e + [\nabla \mu_e \times \text{rot} \vec{U}_e],$$

$$\text{div} \vec{U}_e = 0, \tag{3}$$

$$\Delta T_e = 0, \tag{4}$$

$$\text{div}(\lambda_i \nabla T_i) = -q_i. \tag{5}$$

$$r = R: \quad U_r = 0, \quad U_\theta = K_{ts} \frac{v_e}{RT_e} \frac{\partial T_e}{\partial \theta}, \quad T_e = T_i,$$

$$\lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial r} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} + \sigma_0 \sigma_1 (T_i^4 - T_\infty^4),$$

$$r \rightarrow \infty: \quad \vec{U}_e \rightarrow U_\infty \cos \theta \vec{e}_r - U_\infty \sin \theta \vec{e}_\theta,$$

$$P_e \rightarrow P_\infty, \quad T_e \rightarrow T_\infty, \quad (6)$$

$$r \rightarrow 0: \quad T_i \neq \infty.$$

мұндағы: U_r және U_θ – массалық $\vec{U}_e$ жылдамдықтың радиалдық және жанама құраушылары; U_∞ – бөлшекті орап өтетін жазық параллель ағыстың жылдамдығы ($\vec{U}_\infty \parallel OZ$); $\vec{e}_r$ және $\vec{e}_\theta$ – сфералық координаттар жүйесінің бірлік векторлары; $U_\infty = |\vec{U}_\infty|$; σ_0 – Стефан-Больцман тұрақтысы, σ_1 – аралықтың интегралдық дәрежесі.

Есептің анықтаушы параметрлері $\rho_e, \mu_\infty, \lambda_e$ коэффициенттері және сфералық бөлшектің қозғалысы кезінде сақталатын шамалар – R, T_∞ және U_∞ болып табылады. Осы параметрлердің көмегімен Рейнольдс санының формуласын алуға болады:

$$Re_\infty = \frac{\mu_\infty U_\infty R}{\rho_e} \ll 1.$$

(3)-(1) теңдеулері мен (6) шекаралық шарттарды келесі өлшем бірліксіз шамалар түрінде жазамыз:

$$\vec{V}_e = \frac{\vec{U}_e}{U_\infty}, \quad t_k = \frac{T_k}{T_\infty}, \quad p_e = \frac{P_e}{P_\infty}, \quad P_\infty = \frac{\mu_\infty U_\infty}{R}, \quad k = e, i.$$

$\varepsilon = Re_\infty$ болғанда сұйықтың ағысы тек қоздырушы әсер көрсетеді және сондықтан гидродинамика мен жылу тасымалдау теңдеулерінің шешімін келесі түрде іздестіру керек:

$$\vec{V}_e = \vec{V}_e^{(0)} + \varepsilon \vec{V}_e^{(1)} + \dots,$$

$$p_e = p_e^{(0)} + \varepsilon p_e^{(1)} + \dots, \quad t = t^{(0)} + \varepsilon t^{(1)} + \dots \quad (7)$$

Зерттеу нәтижелері. Температура өрісін анықтау. Гидрозольдық бөлшектің орныққан қозғалысының жылдамдығы мен күштің өрнегін қорытып шығару.

(7)-өрнекті (3)-(5) теңдеулер жүйесіне қойып, айнымалыларды ажырата отырып, массалық жылдамдық пен температура өрісінің құраушылары үшін келесі өрнектерді алдық:

$$V_r(y, \theta) = \cos \theta (1 + A_1 G_1(y) + A_2 G_2(y)),$$

$$t_e(y, \theta) = t_e^{(0)}(y) + \varepsilon t_e^{(1)}(y, \theta), \quad (8)$$

$$V_\theta(y, \theta) = -\sin \theta (1 + A_1 G_3(y) + A_2 G_4(y)),$$

$$t_i(y, \theta) = t_i^{(0)}(y) + \varepsilon t_i^{(1)}(y, \theta), \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
G_1 &= -\frac{1}{y^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Delta_n^{(1)}}{(n+3)y^n}, \\
G_2 &= -\frac{1}{y} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Delta_n^{(2)}}{(n+1)y^n} - \frac{\alpha}{y^3} \sum_{n=0}^{\infty} \left[(n+3) \ln \frac{1}{y} - 1 \right] \frac{\Delta_n^{(1)}}{(n+3)y^n}, \\
G_3 &= G_1 + \frac{y}{2} G_1', \quad G_4 = G_2 + \frac{y}{2} G_2', \\
t_e^{(0)}(y) &= 1 + \frac{y}{y}, \quad V = \frac{4}{3} \pi R^3, \\
t_i^{(0)}(y) &= \left(B_0 + \frac{1+\omega}{4\pi R \lambda_{i\infty} T_{\infty} y} \int_V q_i dV + \int_V \frac{f_0}{y} dy - \frac{1}{y} \int_V f_0 dV \right)^{\frac{1}{1+\omega}}, \\
y &= \frac{r}{R}, \\
t_i^{(1)}(y, \theta) &= \frac{\cos \theta}{(1+\omega)t_{i0}^{\omega}} \left(By + \frac{(1+\omega)RJ}{3\lambda_{i\infty} T_{\infty} y^2} + \frac{1}{3} \left[y \int_1^y \frac{f_1}{y^2} dy - \frac{1}{y^2} \int_1^y f_1 dy \right] \right), \\
t_e^{(1)} &= \frac{\Gamma}{y^2} \cos \theta, \\
f_n(y) &= -\frac{(1+\omega)R^2}{\lambda_{i\infty} T_{\infty}} y^2 \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^{+1} q_i(r, \theta) P_n(x) dx, \\
J &= \frac{1}{V} \int_V q_i z dV
\end{aligned}
\tag{10}$$

— жылу көздерінің тығыздығының дипольдік моменті, $P_n(x)$ — Л

— ежандр полиномы, $x = \cos \theta$, $z = r \cos \theta$.

(10)-өрнектегі G_1', G_2'' — сәйкес функциялардың y бойынша бірінші және екінші реттік туындылары ($k = 1, 2$). $\Delta_n^{(1)} (n \geq 1)$ және $\Delta_n^{(2)} (n \geq 3)$ коэффициенттерінің мәндері келесі рекурренттік қатынастардың көмегімен анықталады:

$$\begin{aligned}
\Delta_n^{(1)} &= -\frac{1}{n(n+5)} \sum_{k=1}^{\infty} [(n+4-k)(\alpha_k^{(1)}(n+5-k) - \alpha_k^{(2)}) + \alpha_k^{(3)}] \gamma^k \Delta_{n-k}^{(1)}, \\
\Delta_n^{(2)} &= -\frac{1}{(n+3)(n-2)} \left[-6\alpha_n^{(4)} \gamma^{(n)} + \sum_{k=1}^n \{ (n+2-k)(\alpha_k^{(1)}(n+2-k) - \alpha_k^{(2)}) + \alpha_k^{(3)} \} \times \right.
\end{aligned}$$

$$\times \gamma^k \Delta_{n-k}^{(2)} + \alpha \sum_{k=0}^n \left[(2n+5-2k) \alpha_k^{(1)} - \alpha_k^{(2)} \right] \gamma^k \Delta_{n-k-2}^{(1)}.$$

Жоғарыда келтірілген формулалар бойынша $\Delta_n^{(1)}$ және $\Delta_n^{(2)}$ коэффициенттерін есептеу кезінде келесі қатынастарды ескеру керек:

$$\Delta_0^{(1)} = -3, \quad \Delta_0^{(2)} = -1, \quad \Delta_2^{(2)} = 1, \quad \alpha_0^{(1)} = \alpha_0^{(4)} = 1, \quad \alpha_0^{(3)} = -4,$$

$$\alpha_n^{(1)} = F_n, \quad \alpha_n^{(1)} = (4-n)F_n + AF_{n-1}, \quad \alpha_0^{(2)} = 4, \quad \alpha_n^{(4)} = A^n/n!,$$

$$\alpha_n^{(3)} = 2AF_{n-1} - 2(n+2)F_n,$$

$$\Delta_n^{(1)} = -\frac{\gamma}{4} \left[6\alpha_1^{(4)} + 2(3\alpha_1^{(1)} - \alpha_1^{(2)}) + \alpha_1^{(3)} \right],$$

$$\alpha = \frac{\gamma}{15} \left\{ \begin{array}{l} -6\gamma\alpha_2^{(4)} + \left[3(4\alpha_1^{(1)} - \alpha_1^{(2)}) + \alpha_1^{(3)} \right] \Delta_1^{(2)} \\ - \left[2(3\alpha_2^{(1)} - \alpha_2^{(2)}) + \alpha_2^{(3)} \right] \end{array} \right\}.$$

(8) – (9)-формулаларына кіретін интегралдау тұрақтылары бөлшектің бетіндегі шекаралық шарттардан анықталады және содан кейін кернеулік тензорын бөлшектің беті бойынша интегралдау арқылы гидрозольдық бөлшекке әсер ететін, тұтқыр кедергі күші $\vec{F}_\mu$ мен $\vec{F}_q$ күштен тұратын $\vec{F}$ толық күш үшін келесі өрнекті аламыз:

$$\vec{F} = \vec{F}_\mu + \varepsilon \vec{F}_q, \quad (11)$$

мұндағы

$$\vec{F}_\mu = -6\pi R \mu_\infty U_\infty f_\mu \vec{n}_z, \quad \vec{F}_q = 6\pi R \mu_\infty f_q J \vec{n}_z,$$

$$f_\mu = \frac{2 N_2}{3 N_1} \exp(-A\gamma), \quad f_q = K_{is} \frac{4 v_{es}}{3 t_{es}} \frac{G_1}{N_1 \delta \lambda_{is} T_\infty} \exp(-A\gamma),$$

$$N_1|_{y=1} = G_1 G'_2 - G_2 G'_1, \quad N_1|_{y=1} = -G'_1, \quad t_{es} = t_e^{(0)} \Big|_{y=1},$$

$$\delta = 1 + 2 \frac{\lambda_{e\infty}}{\lambda_{is}} + 4 \frac{\sigma_0 \sigma_1}{\lambda_{is}} T_\infty^3 t_{es}^3, \quad \lambda_{is} = \lambda_{i\infty} t_{es}^\omega,$$

$\vec{n}_z$ – Z осі бағытындағы бірлік вектор. «s» индексімен келесі (12) – трансценденттік теңдеудің шешімімен анықталатын гидрозольдық бөлшектің бетінің орташа салыстырмалы $t_{es} = T_{es}/T_\infty$ температурасы кезінде алынған физикалық шамалар белгіленген:

$$\frac{T_{es}}{T_{\infty}} = 1 + \frac{1}{4\pi R \lambda_{e\infty} T_{\infty}} \int_V q_i(r, \theta) dV - \frac{\sigma_0 \sigma_1 R T_{\infty}^3}{\lambda_{e\infty}} \left[\left(\frac{T_{es}}{T_{\infty}} \right)^4 - 1 \right]. \quad (12)$$

(12)-өрнектегі интегралдау бөлшектің бүкіл көлемі бойынша жүргізіледі.

$\lambda_e \ll \lambda_i$ шарты орындалған жағдайда бөлшек-сұйық орта жүйесінде динамикалық тұтқырлық коэффициентіндегі θ бұрышына тәуелділікті ескермесе болады, және $\mu_e(t_e) \approx \mu_e(t_e^{(0)})$ есептелінеді. Осы жағдайды ескерсек (1)-өрнек келесі түрде жазылады:

$$\mu_e = \mu_{\infty} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \frac{\gamma^n}{y^n} \right] \exp \left(-A \frac{\gamma}{y} \right). \quad (13)$$

(13)-формулажылулық құбылысқа берілген есеп пен гидродинамикалық есепті жеке-жеке қарастыруға мүмкіндік береді. Есептердің шешімдерін біріктіріп, ұжымдастыру гидрозольдық бөлшектің бетіндегі шекаралық шарттардың көмегімен жүргізіледі.

Жалпы $\vec{F}$ күшті нольге теңестіріп, сфералық пішінді қатты бөлшектің тұтқыр изотермиялық емес сұйықтағы орныққан қозғалысының жылдамдығының өрнегін аламыз:

$$\vec{U}_q = -\varepsilon \frac{f_a}{f_{\mu}} J \vec{n}_z. \quad (14)$$

Ғылыми нәтижелерді талқылау. (14)-формула бойынша бөлшек қозғалатын сұйық тұтқырлығының температураға экспоненттік тәуелділігі түрінде бөлшектің қозғалыс жылдамдығына ішкі жылу көзінің әсерін бағалауға болады.

(11) және (14)-өрнектерден $\vec{F}_q$ күштің және $\vec{U}_q$ бөлшектің жылдамдығының модульдері мен бағыттары оның жылу өткізгіштігі мен жылу көздерінің тығыздығы, дипольдік моменттің бағыты мен шамасына тәуелді екені анықталды. $\lambda_i \rightarrow \infty$ болғанда F_q және U_q мәндері жылу көздерінің тығыздығының дипольдік моментінің бекітілген шамасында нольге ұмтылады.

Гидрозольды бөлшектің көлемінде біртекті таралған жылу көздерінің оның тұрақталған қозғалыс жылдамдығына қосатын үлесін бағалау үшін, жылу көздерінің табиғатын нақтылап анықтап алу керек. Қандай бір жағдайды алып қарайық. Мұнда бөлшектің электромагниттік сәуле шығаруы жылу көздерінің тығыздығымен жұтылуы мүмкін, сонымен қатар, бөлшектің сәулені жұтуы қара дененің сәуле жұтуымен бірдей деуге болады. Олай болса, сәуленің жұтылуы $\delta R \ll R$ қабатында болады, ал жылу шығаратын көздердің тығыздығы былай есептеледі:

$$q_i(r, \theta) = \begin{cases} -\frac{I_0}{\delta R}, & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi, & R - \delta R \leq r \leq R \\ 0, & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

мұндағы, I_0 – түскен сәуленің интенсивтілігі.

Осы шарттар орындалғанда

$$\int_V q_i(r, \theta) z dV = -\frac{3}{2} \pi R^3 I_0. \quad \int_V q_i(r, \theta) dV = \pi R^2 I_0$$

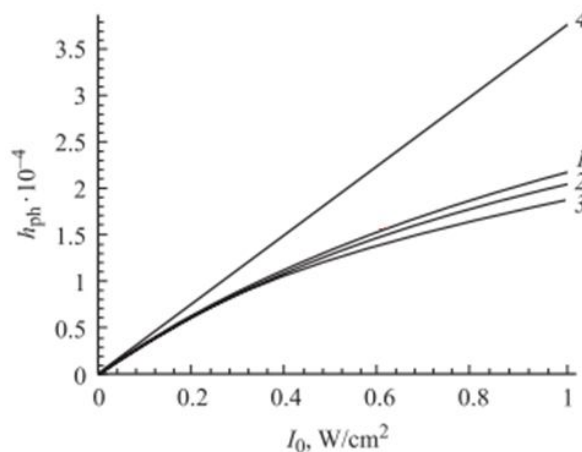
өрнектерін аламыз. Абсолюттік қара қатты дененің сфералық бөлшегінің орнықты қозғалыс жылдамдығы мен оған әсер етуші күшті келесі өрнектермен есептейміз:

$$F_{ph} = -\varepsilon 6 \pi R \mu_{\infty} K_{is} f_{ph}, \quad U_{ph} = \varepsilon K_{is} h_{ph},$$

мұндағы:

$$f_{ph} = \frac{2 v_{es}}{3 t_{es}} \frac{G_1}{N_1 \delta \lambda_{is} T_{\infty}} \exp\{-A\gamma\} I_0,$$

$$h_{ph} = \frac{v_{es}}{t_{es}} \frac{G_1}{N_2 \delta \lambda_{is} T_{\infty}} I_0. \quad (15)$$



Сурет 1. h_{ph} функциясының түсетін сәуленің интенсивтілігіне тәуелділігі I_0 , $\omega = 0.5$ (1); 0.7 (2); 1 (3). 4-қисық температураның аз ауытқуына сәйкес келеді

Ішкі жылу бөлінудің қатты гидрозольды бөлшектің қозғалыс жылдамдығына қосқан үлесін (суретті қара) көрсету үшін h_{ph} функциясының мәндерінің түстерін сәуленің I_0 интенсивтілігіне тәуелділігі (15)-формулада келтірілген. $T_{\infty} = 273 \text{ K}$, $\lambda_{i\infty} = \frac{55W}{m} \cdot \text{degree}$, және $\omega = 0.5$ кездегі (1 қисығы); 0.7 (қисық 2) және 1 (қисық 3) кезде суда өлшенген бор графитінің сандық бағалаулары. Қисық 4 температураның салыстырмалы аз ауытқуларында тұрғызылған ($\gamma \rightarrow 0$, $\omega = 0$), бірақ молекулалық тасымалдаудың коэффициенттері бөлшектің бетіндегі орташа температурасымен алынды. Есептеулер көрсеткендей, ішкі жылу бөлінуді есептеу гидрозольды бөлшектің тұрақталған қозғалысының жылдамдығына едәуір әсер етеді.

Қорытынды. Сфералық пішіндегі гидрозольды бөлшекке әсер ететін күшке және оның тұрақталған қозғалысының жылдамдығына оның беті мен

сұйық арасындағы, және одан алыс жердегі, жылудың көлем бойымен ішкі жылу көздерінің есебінен бөлшек бетінің қыздырылуынан біртекті емес температураның кез келген ауытқуына арналған өрнектер алынды. Жұмыстың нәтижелері тәжірибелік қондырғыларды жобалауда қолданыла алады, оларда гидрозольды бөлшектердің бағытталған қозғалысы қамтамасыз етілуі керек; арналардағы гидрозольды бөлшектердің тұну жылдамдығын бағалауда; химиялық реакциялардың өту аймақтарындағы гидрозольды бөлшектердің тасымалдау процестерін талдауда және т.с.с. Талқыланып отырған құбылыстың сандық зерттелуі қатты бөлшектер үшін нақты эксперименттік мәселе болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Коротких, А.Г. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах [Текст]: учебное пособие/ А.Г.Коротких, И.В.Шаманин. – Томск: ТГУ, 2007. – 117с.
2. Береснев, С.А. Оптика атмосферы и океана[Текст] / С.А.Береснев, Л.Б.Кочнева. – 2003. – Т. 16. – № 2. – С. 134-141.
3. Сенницкий, В.Л. Об управлении подъемной силой, действующей на твердое тело в вязкой жидкости [Текст]/ В.Л.Сенницкий// Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва. – Новосибирск: Изд-во Институт гидродинамики им.М.А.Лаврентьева СО РАН, 2017. – С.235-236.
4. Сахин, В.В. Конвективный теплообмен в однородной среде (теплоотдача) [Текст]: учебное пособие/ В.В. Сахин. – Санкт-Петербург: БГТУ, 2013. – 224с.
5. Қамбаров, Ж.К. Сұйық және газ механикасы [Мәтін]: оқу құралы/ Ж.К.Қамбаров, В.Э.Абсиметов, Б.Б. Унайбеков, Ж.А.Марденов, В.А.Арсенин. – Алматы: CyberSmith, 2021. – 140 бет.

Материал редакцияға 18.01.24 түсті.

А.К. Кадирибетова¹, Р.Ж. Наметкулова¹

¹Таразский региональный университет имени М.Х.Дулати, г.Тараз, Казахстан

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАГРЕТОЙ ЧАСТИЦЫ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Аннотация. Для малых значений чисел Рейнольдса и Пекле в приближении Стокса было получено приближенное аналитическое решение задачи о влиянии внутреннего тепловыделения на движение нагретой твердой сферической частицы в вязкой жидкости из-за температурных колебаний между поверхностью частицы и областью, удаленной от нее. Для решения уравнений гидродинамики использовались зависимости коэффициента теплопроводности частицы от температуры в степенном виде и вязкости жидкости в экспоненциально-степенном виде от температуры.

Ключевые слова: вязкая жидкость, динамическая вязкость, число Рейнольдса, температура, скорость, коэффициент теплопроводности, сила сопротивления.

А.К.Kadirimbetova¹, R.Zh.Nametkulova¹

¹M.Kh.Dulaty Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan

THEORETICAL STUDY OF THE MOTION OF A HEATED PARTICLE IN A VISCOUS LIQUID

Abstract. For small values of the Reynolds and Peclet numbers in the Stokes approximation, an approximate analytical solution was obtained to the problem of the effect of internal heat release on the motion of a heated solid spherical particle in a viscous liquid due to temperature fluctuations between the surface of the particle and a region remote from it. To solve the equations of hydrodynamics, the dependences of the thermal conductivity coefficient of a particle on temperature in a power-law form and the viscosity of a liquid in an exponentially power-law form on temperature were used.

Keywords: viscous liquid, dynamic viscosity, Reynolds number, temperature, velocity, coefficient of thermal conductivity, resistance force.

References

1. Korotkov, A.G., Shamanin, I.V. *Osnovy gidrodinamiki i teploobmena v yadernykh reaktorakh* [Fundamentals of hydrodynamics and heat transfer in nuclear reactors]: textbook. – Tomsk: TSU, 2007. – 117 p., [in Russian].
2. Beresnev S.A., Kochneva L.B. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean]. 2003. Vol. 16, No. 2. P. 134-141, [in Russian].
3. Sennitsky, V.L. *Ob upravlenii pod'yemnoy siloy, deystvuyushchey natverdoy telo v vyazkoy zhidkosti* [On the control of the lifting force acting on a solid in a viscous liquid] // *Sovremennyye problemy mekhaniki sploshnykh sred i fiziki vzryva* [Modern problems of continuum mechanics and explosion physics]. – Novosibirsk: Publishing house of the Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 2017. – 235-236 p., [in Russian].
4. Sakhin, V.V. *Konvektivnyy teploobmen v odnorodnoy srede (teplootdacha)* [Convective heat transfer in a homogeneous medium (heat transfer)]: textbook. – St. Petersburg: BSTU, 2013. – 224 p., [in Russian].
5. Kambarov, Zh.K., Absimetov, V.E., Unaibekov, B.B., Mardenov, Zh.A., Arsenin, V.A. *Suyiqjān gaz mexanikası* [Mechanics of liquid and gas]: textbook. – Almaty: CyberSmith, 2021. – 140 p., [in Kazakh].