



III-ші және V-ші мұз күйлерінің серпімділік қасиеттеріне температура мен қысымның әсерін зерттеу

Т. Бижигитов *1 , Э. Мадалиева¹ , Л. Бижигитова²

¹М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан

²Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Тараз, Қазақстан

E-mail: bizhigitov_temirhan@bk.ru, elmirabegali@mail.ru, lyazzat.bizhigitova@gmail.com

Аңдатпа. Мақалада алғаш рет екі рет дистилляцияланған судан кристалданған, авторлар тұрғызған мұздың Р-Т координатасындағы фазалық диаграммасында III-ші және VI-ші түрлеріндегі 2,50-9,00 кбар қысым аралығындағы 250 К, 230 К, 210 К, 190 К температуралардағы серпімді кума, көлденең, толқындардың жылдамдықтарының, көлемдерінің қысымға тәуелділіктері тәжірибелік зерттеулер жүргізу арқылы өлшенді. Кума және көлденең толқын жылдамдықтарын пайдаланып, зерттелетін үлгілерде ультрадыбыс толқындарының орташа жылдамдықтарының қысымға тәуелділігі есептелді.

Зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін 0-25 кбар қысым мен 90-250 К температураға арналған автоматтандырылған қондырғы жинастырылып, физикалық параметрлерді өлшеу әдістері жан-жақты талқыланып көрсетілген.

Тәжірибе жүзінде және теориялық есептеулерден алынған нәтижелер бойынша тұрақты температураларда үлгілерде тарайтын серпімді толқындардың орташа жылдамдықтарының, Дебайдың сипаттамалық температураларының қысымға тәуелділіктері графиктер тұрғызу арқылы кескінделіп, теориялық тұрғыдан түсініктеме берілген. Қатты денелердегі ультрадыбыс толқындарының кума, көлденең және орташа жылдамдықтарының қысымға тәуелділіктерін зерттеу олардың серпімділік сипаттамаларын, сығылғыштығын, Дебайдың сипаттамалық температурасын анықтауға, бірқатар термодинамикалық шамалардың қысым мен температураға тәуелділіктерін есептеуге мүмкіндік туғызады. Сондықтан мақалада алғаш рет алынып отырған нәтижелердің физикалық үдерістердің механизмдері мен практикалық маңыздылығын ұғынуға үлкен ықпалын тигізеді.

Түйін сөздер: камера, көлденең және кума толқын жылдамдықтары, орташа жылдамдық, фазалық диаграмма.

Жіберілді 28.04.2026. Өзгертілді 19.05.2026. Қабылданды 26.05.2026. Онлайн қол жетімді 30.06.2026.

*хат-хабар авторы

Кіріспе

Антарктидада, Гренландияда және басқа арктикалық тау аралдары мен Күн жүйесіндегі планеталарда массалары өте үлкен Жер бетінде, атмосферасында өтетін физикалық, химиялық, биологиялық үдерістер мен экологияға әсер ететін тұщы су, табиғи газ бен мұнай қатты күйінде табылып отыр. Сондықтан қазіргі таңда тұщы судың жоғары қысым мен төменгі температурадағы [1,2,3] P-T координатасындағы фазалық диаграммасындағы мұз түрлерінің физикалық қасиеттерін зерттеу ғылымның өзекті мәселелеріне жатады. Мысалы, Антарктидада мұздың қалыңдығы 5000 метрге жететіндіктен, оның қабаттарында үлкен қысымдар туындайды. Демек қысым мен температураға тәуелді мұз қабаттары фазалық диаграммадағы физикалық қасиеттері әртүрлі мұз түрлерінен тұрады. Поликристалл мұздардың тығыздықтарының, көлемдік ұлғаю және адиабаталық сығылу коэффициенттерінің, олардағы ультрадыбыс толқындарының жылдамдықтары мен орташа жылдамдықтарының, термодинамикалық сипаттамалық функциялардың, Дебайдың сипаттамалық температурасының сыртқы параметрлерге тәуелділігін зерттеу үшін ғалымдар радиофизикалық, электромагниттік, акустикалық әдістерді қолданулары қажет. Өкінішке орай, осы уақытқа дейін тұщы судан кристалданған мұз түрлерін зерттеуге арналған жұмыстар шамалы. Баспадан жарық көрген мақалалар теңіз, мұхит суларынан кристалданған мұздарға арналған. Ғылыми еңбектердің [4,5,6,7] авторлары теңіз және мұхит суларының физикалық қасиеттерін (268-253)K температура мен 0-1,5 кбар аралығында зерттеген. [8] мақалада 240K температурадан жоғары және 1,5 кбар қысымнан төменгі қысымдарда пайда болған мұз түрлерінің құрылымдары анықталған. Ал, [9] ғылыми мақалада авторлар VI-шы мұз түрінің жан-жақты сығылу модульдерінің температура мен қысым бойынша алынған дербес туындыларының қысымға және температураға тәуелділіктерін есептеп тапқан [10] мақаланың авторлары VI-шы мұз түрінің Юнг және ығысу модульдері мен онда тарайтын серпімді толқындардың жылдамдықтарының әртүрлі қысымдардағы температураға тәуелділігін зерттеген.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Дебайдың теориясы бойынша оның сипаттамалық температурасын поликристалл денелерде таралатын ультрадыбыс толқындарының жылдамдықтарының орташа мәні арқылы бағалай аламыз. Теория сонымен қатар сипаттамалық температураларды қатты денелердің серпімді тұрақтыларын қолданып Дебайдың температурасын есептеуге мүмкіндік береді. Сипаттамалық температура серпімді толқындардың таралу жылдамдықтарының орташа мәніне пропорционал болғандықтан, [11,12] тәжірибе жүзінде қума және көлденең толқындардың жылдамдықтарын анықтау, зерттеліп отырған дененің серпімділік тұрақтылары мен термодинамикалық функцияларын есептеуге мүмкіндік туғызады:

$$\theta_D = \frac{\beta v}{\sqrt[3]{V}} = \frac{h}{k} \left(\frac{9N}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\bar{v}}{\sqrt[3]{V}} = 3.6 \times 10^{-5} \frac{\bar{v}}{\sqrt[3]{V}} \quad (1)$$

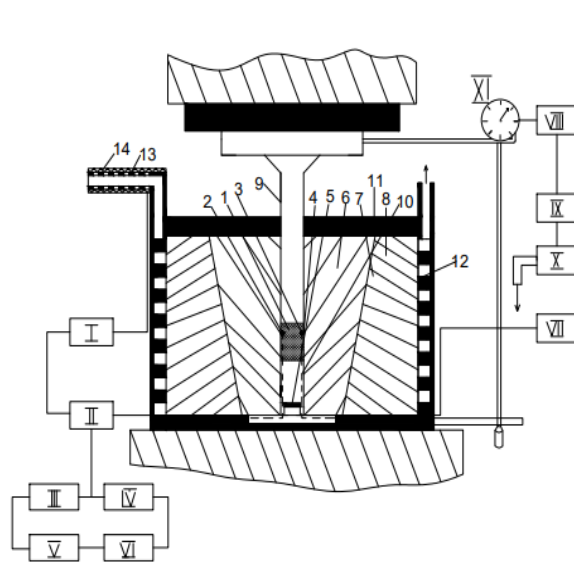
Мұндағы, $\beta = \frac{1}{P_0} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$ қысымның термиялық коэффициенті, - серпімді толқынның орташа жылдамдығы, V – зерттеліп отырған III-ші, V-ші мұз түрлерінің көлемдерінің әртүрлі температуралардағы қысымға тәуелді өзгерісі, $h=6,62$ Планк тұрақтысы, $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ Больцман тұрақтысы. Қатты денелерде тарайтын серпімді толқын қума және көлденең толқындардан тұрады. Олардың орташа жылдамдығы төменде келтірілген формуламен есептелінді:

Бұдан
$$\frac{1}{v_{\perp}^3} + \frac{2}{v_{\parallel}^3} = \frac{3}{v^3} \quad (2)$$

Немесе
$$\frac{-3}{v} = \frac{3}{\frac{1}{v_{\perp}^3} + \frac{2}{v_{\parallel}^3}} \quad (3)$$

Немесе
$$\bar{v} = \left(\frac{3}{\frac{1}{v_{\perp}^3} + \frac{2}{v_{\parallel}^3}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Тәжірибелік өлшеулер жүргізетін қондырғының сызбасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. Жоғары қысым мен төменгі температураларда үлгінің көлемнің өзгерісі мен онда тарайтын серпімді толқындардың жылдамдықтарын өлшейтін қондырғының құрылымы

1-зерттелетін үлгі, 2-мыс-константан термोजұбы, 3-(Sn) қалайлы және (Ga) галлий өткізгіштері, 4-графит жалатылған қабырғасы жұқа фторопласт, 5-резонанстың жиілігі 10МГц кварцтан жасалған пьезоэлемент, 6,7,8 – үшқабатты камераның термоөңделген маркалары X12M(HRC=58÷60), P18(HRC=60÷62), X12M(HRC=48÷50) құрыштардан жасалған бөлшектері, 9,10 камераның жоғары және төменгі поршеньдері, 11-шыны текстолит жылу оқшаулағыш, 12-камерадағы үлгіні суытатын азот буы өтетін арналар, 13-қыздырғыш, 14-пенопласт жылу оқшаулағыш, I-айнымалы тоқ көзі, II-температура реттейтін жүйе, III-генератор, IV-күшейткіш, V-өлшеуіш құрал, VI- осциллограф, VII-Sn, Ga өткізгіштерінің электр кедергісін өлшейтін құрал, VIII-цифрларды басатын құрылғы және цифрлық табло, IX-қысымды түрлендіргіш, X-сыққышқа май арқылы баяу қысым беретін қондырғы, XI-поршеннің ілгермелі қозғалысын электр импульстеріне айналдыратын түрлендіргіш. Үлгінің көлемі мен оның ішінде туындайтын қысымның арасындағы тәуелділікті цифрларды басатын (цифрлық табло) анықтайды. III-ші және V мұз түрлері екі рет дистилляцияланған судан көлемі 1,4 см³ цилиндр ішінде кристалданған 1h мұз түрін төменгі температураларда сығу арқылы алынды.

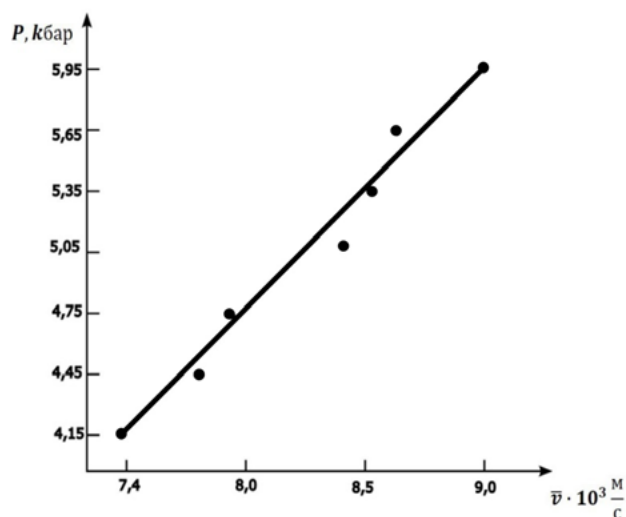
Поршеннің ілгермелі қозғалысын электр импульстеріне айналдыратын түрленгішті калибрлеу камераның сыртында орналасқан микрометрлік бұрандамен жабдықталған арнайы құрал арқылы іске асырылды. Поршеннің ΔL орын ауыстыруын өлшегенде түрлендіргішті калибрлеудің кездейсоқ қателігін ескердік. Оның шекті мәні $\Delta L = \pm 5 \cdot 10^{-3}$ мм тең. Поршень 8мм орын ауыстырғанда $\Delta L = \pm 7 \cdot 10^{-3}$ мм, ал салыстырмалы қателігі $\varepsilon = 0,055\%$ құрайды. 30 кбар қысым ауқымында поршеннің біртекті емес деформациясы орын ауыстыруын өлшегенде жүйелі түрде жіберетін қателігі $5 \cdot 10^{-3}$ мм, салыстырмалы қателігі 0,03%. Маркасы P18 болаттың термиялық ұлғаю коэффициентінің енгізетін қателігін $\pm 0,3 \cdot 10^{-5}$ тең [13] деп анықтамадан алдық. Қысымды өлшегендегі қателік 1h→мұз III, мұз VI→мұз VII, қалайы II→1-ге өткенде, галлий I→II түрленулерді градуирлегенде жүйелі [14,15] жіберетін қателіктердің қосындыларынан тұрады. 30 кбар қысымда үлгі манометрдің дәлділігімен өлшенетін оның мәні 0,2% құрайды. Камераның поршенінің үйкеліс күшінен туындайтын қателік $T = \text{const}$ болғандағы графигіндегі нүктелердің ауытқуы арқылы бағаланды. Біздің есептеуіміз бойынша ол 1,2% артық емес [16]. Ғылыми мақалада жоғары қысым мен төменгі температурада 1h мұз түрінің серпімділік қасиеттеріне сыртқы параметрлердің әсері зерттелген. Қысым 40 кбар болғанда 1000С температурада мыс – константан термोजұбына енгізілетін түзету ± 20 С. Температура төмендеген сайын түзету кемитіндіктен біздің тәжірибемізде мыс-константан термोजұбына қысымның әсері [17] ескерілмеді.

Импульстік ультрадыбыстық қондырғының жұмыс істеу принципі тәжірибелік өлшеулерде жиі қолданылатын қондырғылардың негізінде [18] құрастырылған. Ультрадыбыстық толқындардың көзі және шағылған толқындарды қабылдайтын қабылдағыш ретінде резонанстық жиілігі 10 МГц кварцтан жасалған қума және көлденең толқындарды тарататын пьезоэлементті қолдандық. Биіктіктері белгілі үлгілерде тарайтын толқындардың жүріп өткен жолына кеткен уақыт осциллограф экранындағы импульстерді беттестіру әдісімен анықтадық.

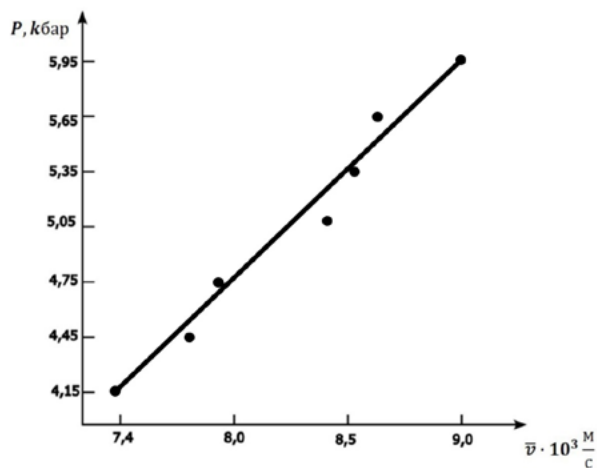
Нәтижелер мен талдаулар. 1-кестеде поликристалл III-ші, V-ші мұз күйлерінде тарайтын серпімді қума және көлденең толқындардың жылдамдықтары мен орташа жылдамдықтарының, көлемдері мен Дебайдың сипаттамалық келтірілген температураларының 250 К, 230 К, 210 К, 190 К, температуралардағы қысымға тәуелділіктері келтірілген.

1-кесте. III-ші және V-ші мұз түрлеріндегі әртүрлі температуралардағы $v_{\parallel} = v_{\parallel}(P)T$, $v_{\perp} = v_{\perp}(P)$, $\bar{v} = \bar{v}(P)$, $V = V(P)_T$, $\theta_D = \theta_D(P)_T$ тәуелділіктері

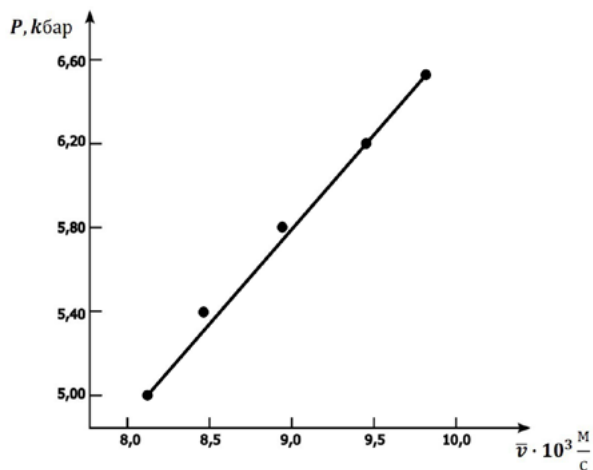
Фаза	T, К	P, кБар	$v_{\parallel} \times 10^2 \frac{M}{c}$	$v_{\perp} \times 10^2 \frac{M}{c}$	$\bar{v} \times 10^3 \frac{M}{c}$	$V \times 10^{-3} M^3$	θ_D, K	$\frac{T}{\theta_D}$
III	250	2,50	50,10	38,90	4,15	1,112	144	1,73
		2,60	50,60	39,40	4,21	1,089	147	1,70
		2,70	51,30	40,17	4,28	1,065	151	1,65
		2,80	51,90	40,77	4,34	1,043	154	1,62
		2,90	52,18	40,98	4,40	1,022	157	1,59
V	250	4,15	82,00	70,50	7,36	1,085	258	0,96
		4,45	86,00	74,50	7,76	1,084	272	0,91
		4,75	87,50	76,00	7,93	1,082	278	0,89
		5,10	93,00	81,49	8,49	1,081	298	0,83
		5,35	94,00	82,47	8,56	1,079	300	0,83
		5,65	96,00	84,48	8,72	1,078	306	0,81
		5,95	98,10	89,46	9,20	1,076	318	0,78
	230	5,00	96,00	76,81	8,14	1,084	285	0,80
		5,20	98,00	78,80	8,34	1,083	292	0,78
		5,40	99,20	79,72	8,47	1,081	297	0,77
		5,60	102,10	82,80	8,79	1,080	309	0,74
		5,80	105,01	85,73	9,06	1,079	318	0,72
		6,00	106,15	86,62	9,12	1,077	320	0,71
		6,20	109,10	89,70	9,46	1,076	332	0,69
		6,40	110,15	90,73	9,57	1,075	335	0,68
	210	6,40	112,30	92,75	9,78	1,073	337	0,68
		5,50	103,50	87,61	9,18	1,084	322	0,65
		6,00	110,41	94,00	9,84	1,083	345	0,60
		6,50	120,11	104,12	10,86	1,082	380	0,55
		7,00	123,50	107,50	11,60	1,081	407	0,51
	190	7,50	140,21	119,45	12,51	1,080	439	0,47
		7,55	140,40	98,52	10,69	1,185	366	0,51
		8,50	147,50	115,00	12,00	1,186	411	0,46
		9,00	157,62	131,53	12,80	1,186	438	0,43



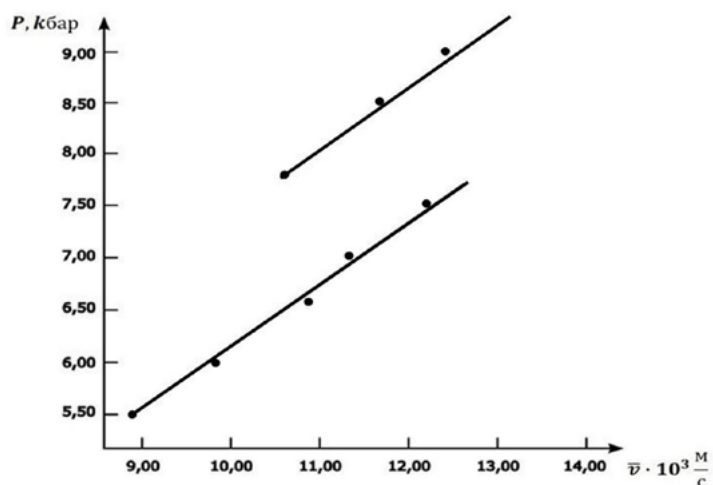
2-сурет. III-мүз күйінде тарайтын серпімді толқынның 250 К температурадағы орташа жылдамдығының қысымға тәуелділігі



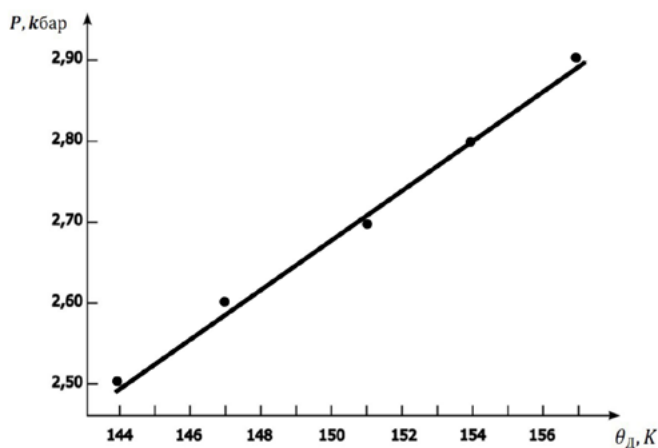
3-сурет. V-ші мүз күйінде тарайтын серпімді толқынның 250 К температурадағы орташа жылдамдығының қысымға тәуелділігі



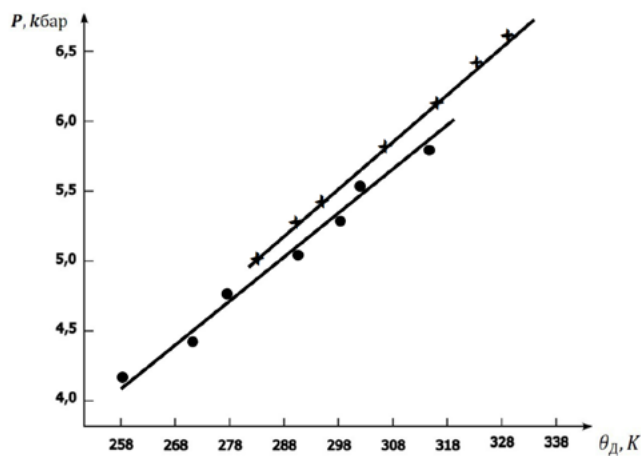
4-сурет. V-ші мүз күйінде тарайтын серпімді толқынның 230 К температуралардағы орташа жылдамдығының қысымға тәуелділігі



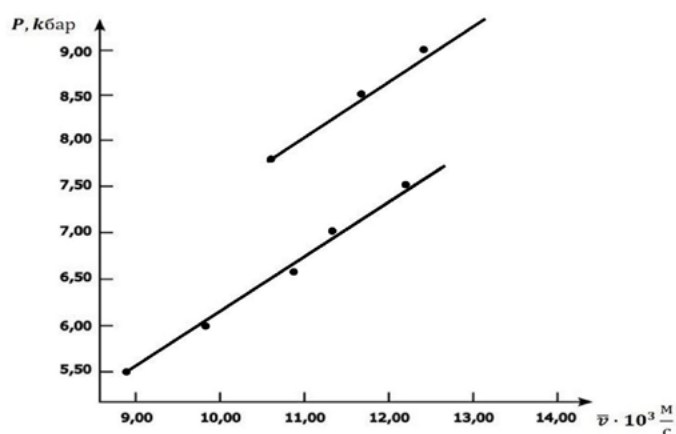
5-сурет. V-ші мұз күйінде тарайтын серпімді толқынның 190 К, 210 К температуралардағы орташа жылдамдықтарының қысымға тәуелділігі



6-сурет. III-ші мұз күйінің 250 К температурадағы Дебайдың сипаттамалық температураның қысымға тәуелділігі



7-сурет. V-ші мұз күйінің +250 К, +230 К температуралардағы Дебайдың сипаттамалық температурасының қысымға тәуелділігі



8-сурет. V-ші мұз күйінің 210 К, 190 К температуралардағы Дебайдың сипаттамалық температурасының қысымға тәуелділігі

Келтірілген кестелер мен графиктерден тұрақты 250 К, 230 К, 210 К, 190 К температураларда серпімді толқындардың қума, көлденең және орташа жылдамдықтарының артатындығын көреміз. Ал V-ші мұз күйінде 190 К, 210 К температураларда тарайтын серпімді толқындардың орташа жылдамдықтары шамамен бірдей болғанда температура 20 К төмендегенде қысым 1,10 кбар артады. III мұз түрінде 250 К температурада Дебайдың сипаттамалық температурасы қысым артқанда ұлғаяды. V-ші мұз түрінде қысымдар теңеліп, температура 20 К төмендегенде Дебай температурасы шамамен оңға қарай 3,33 К ығысып артады. Ал III-ші және V мұз түрлерінің әртүрлі температуралардағы сан мәндері қысым артқанда шамалы ұлғаяды. Тәжірибелік өлшеулер мен теориялық есептеулерден алынған нәтижелер физиканың заңдарына сәйкес келеді. Зерттеу барысында аномальді құбылыстарды байқамадық.

Поликристалдарда қатты денелердегі сияқты температура төмендегенде ультрадыбыс жылдамдықтары мен орташа жылдамдық артады. Өйткені серпімді толқындардың поликристалдардағы таралу жылдамдығы Юнг модулі мен тығыздығына тәуелді. Сығылған кезде кристалдық тор сығылып, атомдардың арақашықтықтары кеміп атомаралық байланыстары күшейеді. Нәтижесінде, серпімділік модулі тығыздықпен салыстырғанда едәуір жылдам артады. Сондықтан ультрадыбыс импульсі атомнан атомға жылдам беріледі.

Қорытынды

1. P-T координатасындағы мұз түрлерінің жоғары 0-25 кбар қысым мен төменгі 90-250 К температурада көлемдерінің өзгерістерін және оларда тарайтын серпімді толқындардың әртүрлі температуралардағы қысымға тәуелділігін анықтайтын қондырғы жинастырылды.

2. Алғаш рет III-ші және V-ші мұз түрлерінде тарайтын серпімді толқындардың 250 К, 230 К, 210 К, 190 К, температуралардағы жылдамдықтарының қысымға тәуелділік графиктері тұрғызылып зерттелді.

3. Тәжірибелік өлшеулер мен теориялық есептеулерден алынған мұз күйлерінде тарайтын серпімді толқынның орташа жылдамдықтары мен көлемдерінің өзгерістерін пайдаланып келтірілген температураның Дебайдың температурасына қатынасының қысымға тәуелділігі алғаш рет анықталды.

4. Поликристалдардағы ультрадыбыс толқындарының қума, көлденең және орташа жылдамдықтарының қысымға тәуелділіктерін зерттеу олардың серпімділік сипаттамаларын, сығылғыштығын, Дебайдың сипаттамалық температурасын анықтауға, бірқатар термодинамалық шамалардың қысым мен температураға тәуелділіктерін есептеуге мүмкіндік туғызады. Сондықтан мақалада алғаш рет алынып отырған нәтижелердің физикалық үдерістердің механизмдерін ұғынуға және арктикалық тау аралдары мен Күн жүйесіндегі планеталарда орналасқан мұздықтардағы тұщы судан кристалданған мұз қабаттарының қандай тереңдікте, қабаттарының биіктігін анықтау үшін қолдануға болады.

Алғыс

Қаржыландыру көздері және басқа жарналар, алғыстар, сондай-ақ мүдделер қақтығысы жоқ.

Авторлардың қосқан үлесі

Т.Бижигитов – «III-ші және V-ші мұз күйлерінің серпімділік қасиеттеріне температура мен қысымның әсерін зерттеу» тақырыбында жазылған шетелдік ғылыми мақалаларға талдаулар жасап, аталған мұз түрлеріне жоғарғы қысым мен төменгі температураларда серпімділік қасиеттерін жоспарлау.

Э.Мадалиева – зерттеу мақсатында жинастырылған қондырғыдан алынған тәжірибелік нәтижелерді пайдаланып Юнг, ығысу модульдерін есептеу әдістерін көрсету.

Л.Бижигитова – тәжірибеден алынған физикалық параметрлерді пайдаланып, олардың арасындағы тәуелділіктер графиктерін тұрғызып, оларға теориялық тұрғыдан түсініктеме беру.

Әдебиеттер тізімі

1. P.V.Hobbs, Ice physics. Oxford, Clarendon Press, (1974).
2. N.Bizhigitov, A.Sembiyeva, Study the Diagram of the Thermodynamic state of ice at High-Pressure and how temperature in the P-T Coordinate, Journal of Adv Research in Dynamical control systems, vol.11, No.6 (2019).
3. Д.Эйзенберг, В.Кауцман, Структура и свойства воды, /пер. с англ./ Под ред. В.В.Богородского. Л: Гидрометеоиздат, Ил., 280 б. (1975).
4. С.М. Ковалев, В.А. Бородкин, Н.В.Колабутич, А.А.Ньюбом, Основные физические и механические характеристики льда по результатам работы экспедиции «Трансарктика-2019», қолжетімді адресі: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-293-320>
5. А.В.Марченко, Е.Б. Карулин, П.В. Чистяков, Экспериментальное определение упругих характеристик морского ледяного покрова, Вестник газовый науки (2020).
6. Johnston M.E. Strength, Temperature Relationships for First-year, second-year and Multi-year Sea, Ice Proceedings of the Twenty-ninth, International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 707-714 (2019).
7. Korulina M., Full-Scale Ficturat Strength of Sea Ice and freshwater Ice in Spitsbergen Fjords and North-west Barents Sea, Applied Ocean Research 90, 101-106, (2019)
8. Е.С.Шокомбалова, Ю.Н.Журавлев, Структура и свойства фазовых состояний льда, Журнал структурной химии ДАН. том 60, №1, 64-70 (2019).
9. T.Bizhigitov, A.Yelibayeva, The dependence of the ice-six compression modules and the volumetric expansion coefficient on pressure and temperature, Bulletin of KAZNPU named after Abay, Kazakh National Pedagogical University "Physical and mathematical Sciences". Series 2 (70) (2020).
10. T. Bizhigitov, E. Zhumadilov, Study the dependence of Young's shear modulus and ultrasonic waves propagation of the VI ICE modification to the pressure at a constant temperature. Bulletin of L. N. Cymilyov Eurasian National University. Physics, Astronomy Series 4(133) (2020).
11. Т. Бижигитов, Молекулалық физика, Оқулық, Алматы, ЛантарBooks, 728 б. (2026)
12. Т. Бижигитов, Статистикалық физика. Физикалық кинетика негіздері. Оқулық, Алматы, Альмонахъ, 250 б. (2022).
13. Кушербаева М.Р., Бижигитов Т., Устройство для получения давления до 3000 МПа. [Механика и технологии. Научный журнал] 1, 162-167. (2017).
14. Бижигитов Т., Кушербаева М.Р., Измерение давления, температуры и объемных изменений в камере высокого давления при низких температурах, Механика и технологии. Научный журнал 1, 167-171 (2017).
15. Бижигитов Т., Кушербаева М.Р., Электроводы для камеры высокого давления на 3000 МПа, Механика и технологии. Научный журнал 1, 171-173 (2017).
16. Т.Бижигитов, М.Р.Кушербаева, Л.Т.Бижигитова, Мұз 1h түрінің сыртқы параметрлердің серпімділік қасиеттеріне әсерін зерттеу, Торайғыров университетінің Хабаршысы. Физика, математика және компьютерлік ғылымдар сериясы 1, 142-152 б. (2025).
17. Т.Бижигитов, Э.Мадалиева, Мұздың фазалық диаграммасын физика-химиялық талдауларды қолданып зерттеу, Механика және технологиялар. Ғылыми журнал 4(86), 317-324б. (2024).
18. Т.Бижигитов, Э.Мадалиева, Құрылыс материалдарының физика-механикалық қасиеттерінің температураға тәуелділігін зерттеу, Механика және технологиялар. Ғылыми журнал 4(86), 201-208б. (2024).

Т. Бижигитов^{*1}, Э. Мадалиева¹, Л. Бижигитова²

¹Таразский университет им. М. Х. Дулати, Тараз, Казахстан

²Казахский Национальный Университета водных ресурсов и ирригации,
Тараз, Казахстан

(E-mail: bizhigitov_temirhan@bk.ru, elmirabegali@mail.ru, lyazzat.bizhigitova@gmail.com)

Исследование влияния температуры и давления на упругие свойства III-й и V-й фаз льда

Аннотация. В статье впервые представлены результаты экспериментального исследования зависимостей скоростей продольных и поперечных упругих волн, а также объемов льда III и льда VI, кристаллизованных из дважды дистиллированной воды, в интервале давлений 2,50–9,00 кбар при температурах 250, 230, 210 и 190 К. Исследования проводились на фазовой диаграмме льда в координатах P–T, построенной авторами. На основе измеренных значений скоростей продольных и поперечных волн были рассчитаны зависимости средней скорости распространения ультразвуковых волн от давления в исследуемых образцах.

Для выполнения экспериментальных исследований была разработана и собрана автоматизированная установка, предназначенная для работы в диапазоне давлений 0–25 кбар и температур 90–250 К. В статье подробно рассмотрены и описаны методы измерения физических параметров.

На основе экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов построены графики зависимостей средней скорости распространения упругих волн и характеристической температуры Дебая от давления при постоянных температурах. Полученные закономерности получили теоретическое объяснение. Исследование зависимостей скоростей продольных, поперечных и средних ультразвуковых волн от давления в твердых телах позволяет определять их упругие характеристики, сжимаемость, характеристическую температуру Дебая, а также рассчитывать зависимости ряда термодинамических параметров от давления и температуры.

Полученные впервые результаты имеют важное значение для понимания механизмов физических процессов, протекающих в высокобарических фазах льда, и обладают значительной практической ценностью.

Ключевые слова: камера высокого давления, скорости поперечных и продольных волн, средняя скорость, фазовая диаграмма.

T. Bizhigitov^{*1}, E. Madaliyeva¹, L. Bizhigitova²

¹M.H. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan

²Kazakh National University of Water Resources and Irrigation, Taraz, Kazakhstan

(E-mail: bizhigitov_temirhan@bk.ru, elmirabegali@mail.ru, lyazzat.bizhigitova@gmail.com)

Study of the Influence of Temperature and Pressure on the Elastic Properties of Ice III and Ice V

Abstract. This paper presents, for the first time, the results of an experimental investigation of the pressure dependences of the velocities of longitudinal and transverse elastic waves, as well as the volumes of Ice III and Ice VI crystallized from double-distilled water, within the pressure range of 2.50–9.00 kbar at temperatures of 250, 230, 210, and 190 K. The studies were carried out using the ice phase diagram in the P–T coordinates constructed by the authors. Based on the measured velocities of longitudinal and transverse waves, the pressure dependences of the average ultrasonic wave velocity in the investigated samples were calculated.

To perform the experimental studies, an automated setup operating in the pressure range of 0–25 kbar and the temperature range of 90–250 K was designed and assembled. The methods used for measuring the physical parameters are described and discussed in detail.

Using both experimental data and theoretical calculations, the pressure dependences of the average velocity of elastic wave propagation and the Debye characteristic temperature at constant temperatures were determined and presented graphically. The obtained results are interpreted from a theoretical standpoint. The investigation of the pressure

dependences of longitudinal, transverse, and average ultrasonic wave velocities in solids makes it possible to determine their elastic properties, compressibility, and Debye characteristic temperature, as well as to calculate the pressure and temperature dependences of a number of thermodynamic parameters.

The results obtained for the first time are of significant importance for understanding the mechanisms of physical processes occurring in high-pressure phases of ice and possess considerable practical value.

Keywords: high-pressure chamber, longitudinal and transverse wave velocities, average velocity, phase diagram.

References

1. P.V. Hobbs, Ice physics. Oxford, Clarendon Press, (1974).
2. N. Bizhigitov, A. Sembiyeva, Study the Diagram of the Thermodynamic state of ice at High-Pressure and how temperature in the P-T Coordinate, Journal of Adv Research in Dynamical control systems vol.11, No.6 (2019).
3. D.Ejzenberg, V.Kaucman, Struktura i svojstva vody [Structure and Properties of Water,] Ed. by V.V. Bogorodsky. L:Gidrometeoizdat, Il., 280 p. (1975). [In Russian]
4. S.M. Kovalev, V.A. Borodkin, N.V.Kolabutin, A.A.N'yubom, Osnovnye fizicheskie i mekhanicheskie harakteristiki l'da po rezul'tatam raboty ekspedicii «Transarktika-2019» [Main physical and mechanical characteristics of ice based on the results of the Transarktika-2019 expedition], available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-293-320>. [In Russian]
5. A.V.Marchenko, E.B. Karulin, P.V. Chistyakov, Eksperimental'noe opredelenie uprugih harakteristik morskogo ledyanogo pokrova [Experimental Determination of the Elastic Characteristics of Sea Ice Cover], Vestnik gazovoy nauki [Gas Science Bulletin] (2020). [In Russian]
6. Johnston M.E. Strength, Temperature Relationships for First-year, second-year and Multi-year Sea, Ice Proceedings of the Twenty- ninth, International Ocean and Polar Engineering Conference. Honalulu, Hawau, USA, June 16-21, p.707-714 (2019).
7. Korulina M., Full-Scale Ficzurat Strength of Sca Ice and freshwater Ice in Spitsbergen Fjards and North-west Barents Sea, Applied Ocean Research 90, p. 101-106, (2019)
8. E.S.SHokombalova, YU.N.ZHuravlev, Struktura i svojstva fazovyh sostoyanii l'da [Structure and Properties of Phase States of Ice], ZHurnal strukturnyj himii DAH [Russian Journal of Structural Chemistry] 60, №1, p.64-70 (2019). [In Russian]
9. T.Bizhigitov, A.Yelibaeva, The dependence of the ice-six compression modules and the volumetric expansion coefficient on pressure and temperature, Bulletin of KAZNPU named after Abay, Kazakh National Pedagogical University "Physical and mathematical Sciences" Series 2(70), (2020).
10. T. Bizhigitov, E. Zhumadilov, Study the dependence of Young's shear modulus and ultrasonic waves propagation of the VI ICE modification to the pressure at a constant temperature, Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University. Physics, Astronomy Series 4(133) (2020).
11. T. Bizhigitov, Molekulalyk fizika [Molecule of Physics], Almaty, LantarBooks, 728 p. (2026). [In Kazakh]
12. T. Bizhigitov, Statistikalyyk fizika. Fizikalyyk kinetika negizderi [Statistical Physics. Fundamentals of Physical Kinetics], Textbook, Almaty, Almonakh, 250 p. (2022). [In Kazakh]
13. Kuserbaeva M.R., Bizhigitov T., Ustrojstvo dlya polucheniya davleniya do 3000MPa [Device for obtaining pressure up to 3000 MPa], Mekhanika i tekhnologii. Nauchnyj zhurnal [Mechanics and technology. Scientific journal] 1, p.162-167 (2017). [In Russian]
14. Bizhigitov T., Kuserbaeva M.R., Izmerenie davleniya, temperatury i ob'emnyh izmenenij v kamere vysokogo davleniya pri nizkizkih temperaturah [Measurement of Pressure, Temperature, and Volumetric Changes in a High-Pressure Chamber at Low Temperatures], Mekhanika i tekhnologii. Nauchnyj zhurnal [Mechanics and technology. Scientific journal]1, p.167-171(2017). [In Russian]
15. Bizhigitov T., Kuserbaeva M.R., Elektrosvody dlya kamery vysokogo davleniya na 3000MPa [Electrical inputs for a high-pressure chamber at 3000 MPa], Mekhanika i tekhnologii. Nauchnyj zhurnal [Mechanics and technology. Scientific journal]1, №1, p.171-173 (2017). [In Russian]
16. T.Bizhigitov, M.R.Kuserbaeva, L.T.Bizhigitova, Muz 1h turinin syrtyky parametrlerdin serpimdilik kasiyetterine aserin zertteu [Study of the Influence of External Parameters on the Elastic Properties of Ice Type 1h], Torajgyrov universitetiniñ Habarshysy. Fizika, matematika zhane komp'yuterlik gylymdar seriyasy [Bulletin of Toraigyrov University. Physics, Mathematics and Computer Sciences Series]1, p.142-152 (2025). [In Kazakh]

17. T.Bizhigitov, E.Madaliyeva, Мыздың fazalyk diagrammasyn fizika-himiyalyk taldaulardy koldanyp zertteu [Study of the Phase Diagram of Ice Using Physicochemical Analysis], Mekhanika i tekhnologii. Nauchnyj zhurnal [Mechanics and technology. Scientific journal] 4(86), p.317-324 (2024). [In Kazakh]
18. T.Bizhigitov, E.Madaliyeva, Kyrylys materialdarynyn fizika-mekhanikalyk kasietterinin temperaturaga taueldiligin zertteu [Study of the dependence of physical and mechanical properties of building materials on temperature], Mekhanika i tekhnologii. Nauchnyj zhurnal [Mechanics and technology. Scientific journal] 4(86), p.201-208 (2024). [In Kazakh]

Авторлар туралы мәлімет:

Бижигитов Т. – хат-хабар авторы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, М.Х.Дулати атындағы Тараз университетінің профессоры, 5-бұрылыс Бульвар 8, 080001, Тараз, Қазақстан, bizhigitov_temirhan@bk.ru, +77015578541

Мадалиева Э. Б. – PhD, М.Х.Дулати атындағы Тараз университетінің қауымдастырылған профессор, Айтеке би көшесі, 5/45, 080012, Тараз, Қазақстан, elmirabegali@mail.ru, +77019431523

Бижигитова Л. Т. – экономика ғылымдарының кандидаты, Қазақ Ұлттық су шаруашылығы және ирригация университетінің доценті, Сатпаев көшесі 2, 080003, Тараз, Қазақстан, lyazzat.bizhigitova@gmail.com, +77772027282

Бижигитов Т. – автор для корреспонденции, кандидат физико-математических наук, профессор Таразского университета им.М. Х. Дулати, 5-й Бульвар, 8, 080001, Тараз, Казахстан, bizhigitov_temirhan@bk.ru, +77015578541

Мадалиева Э. Б. – PhD, автор статьи, Таразский университет им. М. Х. Дулати, ул. Айтеке би, 5/45, 080012, Тараз, Казахстан, elmirabegali@mail.ru, +77019431523

Бижигитова Л.Т. - кандидат экономических наук, доцент, Казахский Национальный Университета водных ресурсов и ирригации, ул. Сатбаева, 2, 080003, Тараз, Казахстан, lyazzat.bizhigitova@gmail.com, +77772027282

Bizhigitov T. – the corresponding author, Candidate of Physic-Mathematical Sciences, Professor, M. H. Dulati Taraz University, 8 5th Boulevard, 080001, Taraz, Kazakhstan, bizhigitov_temirhan@bk.ru, +77015578541

Madaliyeva E. B. – PhD, M. H. Dulati Taraz University, 5/45 Aiteke bi str., 080012, Taraz, Kazakhstan, elmirabegali@mail.ru, +77019431523

Bizhigitova L. T. - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Kazakh National University of Water Resources and Irrigation, Satbayeva str., 2, 080003, Taraz, Kazakhstan, lyazzat.bizhigitova@gmail.com, +77772027282



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).