

FTAMP 61.13.17

Т. Бижигитов¹ – негізгі автор, | ©
Э. Мадалиева²¹Физ.-мат. ғылым. канд., профессор, ²PhD, қауымдас. профессор

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-5276-8033> ²<https://orcid.org/0000-0003-4053-8801>^{1,2}М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті,

Тараз қ., Қазақстан

¹bizhigitov_temirhan@bk.ru<https://doi.org/10.55956/BEXW8184>

МҰЗДЫҢ ФАЗАЛЫҚ ДИАГРАММАСЫН ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ТАЛДАУЛАРДЫ ҚОЛДАНЫП ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Мақалада мұздың жоғары (0-2500) МПа қысым мен төменгі (90-250) К температурадағы Р-Т координатасындағы фазалық диаграммасына физико-химиялық талдаулар жасалды. 2500 МПа қысымда және 90 К температурадан 250 К температураға дейін мұздың фазалық диаграммасын зерттеу мақсатында жоғары қысымды поршень – цилиндр типті камераның құрылымы есептелініп жасалды. Камераның беріктілігін арттыру мақсатында концентрлі үш қабаттың термоөңдеуден өткен цилиндрлер бір-біріне қыздырылып күшпен кигізілді. Зерттелетін мұздағы қысымды анықтау ішінде орналасқан (S_n) қалайы мен (G_a) галлийдің электрлік кедергісін өлшеу арқылы жүзеге асырылды. Үлгіде орналасқан мыс-константан терможүйенің көмегімен оның температурасын бақылап отырдық. Фазалық түрленулердегі көлемнің өзгерісін өлшеу үшін арнайы сызықты орын ауыстыруды электр импульстеріне айналдыратын түрлендіргішті қолдандық. Фазалық түрлену кезіндегі меншікті көлемнің өзгерісін ескеріп, фазалық диаграммаға физико-химиялық талдаулар жасау энтропияның (ΔS), энтальпияның (ΔJ), ішкі энергияның (ΔW) өзгерістермен екі фазаның тепе-теңдік көлбеулік бұрышының тангенсін анықтауға мүмкіндік туғызады.

Тірек сөздер: физико-химиялық сипаттамалық функциялар, поликристалл, бірінші текті фазалық түрлену.

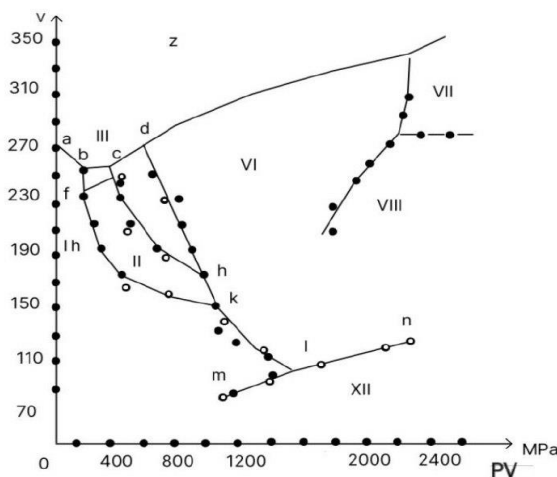


Бижигитов, Т. Мұздың фазалық диаграммасын физико-химиялық талдауларды қолданып зерттеу [Мәтін] / Т. Бижигитов, Э. Мадалиева //Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2024. – №4(86). – Б.328-335. <https://doi.org/10.55956/BEXW8184>

Кіріспе. Ғалымдар соңғы жылдары физико-химиялық талдау әдісін заттардың электрлік, магниттік, оптикалық қасиеттері мен фазалық түрлену, диффузия, булану жылдамдықтарын зерттеу мақсатында кеңінен қолданып келеді. Тәжірибелік өлшеулер мен теориялық есептеулерден алынған нәтижелердің практикалық маңызы зор. Ғылыми-зерттеу жұмыстарында физико-химиялық талдауды пайдалану экспериментальді және теориялық химия мен физиканы дамытуға үлкен үлесін қосуда. Қазіргі таңда ғылымның өзекті мәселелерінің бірі болып табылатын сыртқы химиялық және физикалық параметрлердің әсерімен тапсырыс бойынша жаңа материалдар алуда немесе табиғат пен өндіріс орындарында өтетін үдерістерді басқаруда

физико-химиялық талдаудың алатын орны ерекше. Біз физико-химиялық әдісті мұздық P-T координатасындағы фазалық диаграммасын зерттеуге қолдандық. Өйткені мұз планетамыздың атмосферасында, бетінде, қойнауында газ, сұйық, қатты күйінде ең көп кездесетін минерал. Жер бетінің 70% су алып жатыр. Оның 98% тұзды, ал 2% тұщы су. 2%-дың 0,025%-ы бұлақтың 0,3% жер бетіне шығаруға энергияны қажет ететін жер асты тұщы суы, 1,6% қатты күйде кездеседі. Мысалы, Антарктидада мұздың қалыңдығы 5000 метрге жетеді. Ғалымдар мұнда тұщы судың қоры өте көп екендігін дәлелдеп отыр. Оның қабаттарында мұздың температура мен қысымға тәуелді бірнеше модификациялары болуы мүмкін. Демек мұз күйлерінің физико-химиялық қасиеттерін зерттеу болашақта туындайтын тұщы су тапшылығын шешуге үлкен ықпалын тигізеді.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Фазалық түрленулер кезіндегі температура мен қысымның берілген мәндеріне және көлемнің өзгерісін пайдаланып мұздың төменгі температура мен жоғарғы қысымдағы P-T координатасындағы фазалық диаграммасын тұрғыздық.



○ және ● нүктелер – қысымды тұрақты температурада арттырғанда және қысым тұрақты болғанда температураны ұлғайтып кеміткендегі $\frac{\Delta V}{V_0}$ өзгергендегі экспериментальді нүктелер [1,2].

Сурет 1. Мұздың P-T координатасындағы фазалық диаграммасы

Бірінші текті фазалық түрлендірулерді Клаузис-Клапейронның дифференциалдық теңдеуі сипаттайды. Бұл теңдеу екі фазаның тепе-теңдік күйінде химиялық потенциалдар мен Гиббстің еркін энергияларының теңдігінен шығады [5]:

$$\mu'(P, T) = \mu''(P, T), Z'(P, T) = Z''(P, T) \quad (1)$$

Немесе:

$$d\mu'(P, T) = d\mu''(P, T) \quad (2)$$

Бұдан:

$$\left(\frac{\partial \mu'}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial \mu'}{\partial P}\right)_T dP = \left(\frac{\partial \mu''}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial \mu''}{\partial P}\right)_T dP \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\left(\frac{\partial \mu''}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial \mu'}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial \mu'}{\partial P}\right)_T - \left(\frac{\partial \mu''}{\partial P}\right)_T} \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{S'' - S'}{v'' - v'} = \frac{\Delta S}{\Delta v} \quad (5)$$

Химиялық потенциалдың дифференциалы төмендегі формуламен анықталады:

$$d\mu = -SdT + vdp \quad (6)$$

мұндағы, S және v – бір мольдің энтропиясы мен көлемі.

Немесе Клаузус-Клапейрон теңдеуін төмендегідей [6,7,8] түрлендіреміз:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\lambda}{T(v'' - v')} \quad (7)$$

мұндағы: $\lambda = T(S'' - S')$ – бір моль немесе бір грамм затқа берілетін жылу мөлшері, $v'' - v'$ – меншікті көлемінің өзгерісі.

Келтірілген теңдеу дене бір фазадан екіншіне өткенде меншікті булану, балку жылуларын есептегенде өте қолайлы. Мысалы, сұйық буға түрленгенде берілген жылу мөлшері $\lambda > 0$ мен $v'' > v'$ көлем әрқашан артады. Демек $\frac{dP}{dT} > 0$ қайнау температурасы қысым артқанда көтеріледі. Балку нүктесі қысым артқанда балку көлемінің өзгерісіне байланысты артады немесе кемиді. Мұздың P-T координатасындағы фазалық диаграммасына физико-химиялық талдаулар жасау арқылы фазалық түрленулерде меншікті көлемдерінің өзгерістерін ескеріп, энтропияның (ΔS), энтальпияның ΔJ ішкі энергияның (ΔW) өзгерістерін есептеп анықтадық. Энтропияның $\Delta S_{12} = \frac{\Delta J_{12}}{T_m}$, энтальпияның (ΔJ_{12}) фазалық түрленулердегі тепе-теңдік температуралардағы өзгерістерінің шамаларын екі фазаның тепе-теңдік сызығының көлбеулігінің тангенсі арқылы есептедік. Меншікті көлемнің өзгерісі тәжірибе жүзінде өлшенді. Ол үшін Клаузиус-Клайпейронның төменде келтірілген теңдеуін [5] қолдандық:

$$\frac{dP}{dT_m} = \frac{\frac{\partial(Z_1 - Z_2)}{\partial T}}{\frac{\partial(Z_1 - Z_2)}{\partial P}} = \frac{v' - v''}{S' - S''} = \frac{\Delta V}{\Delta S} = T_k \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (8)$$

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. 1-кестеде мұздың әртүрлі модификациялары үшін тәжірибе жүзінде өлшенген және теориялық есептеулерден алынған температура, қысым, меншікті көлемнің Δv , энтропияның (ΔS), энтальпияның ΔJ , ішкі энергияның ΔW өзгерістерінің мәндері мен фазалық түрленудегі температураның қысымдық $\frac{dP}{dT}$ коэффициенттерінің шамалары келтірілген.

Кестеден $1h \rightarrow II$, $1h \rightarrow VI$, $1h \rightarrow II$ фазаларының тепе-теңдік көлбеу сызығының бұрышының тангенсі теріс $\frac{dP}{dT_m} < 0$ мәндерді иеленеді. $\frac{dP}{dT_m}$ шамасының өзгерісінің қысымға тәуелділігі жуықтап алғанда гиперболалық теңдеумен, ал $T_m(p)$ тепе-теңдік сызығы натурал логарифмдік [9] функциямен сипатталады:

$$\left(\frac{dP}{dT_m}\right)_{I,II} \approx -\gamma_1(p_m - 200), \ln P_{m,I,II} \approx -46\gamma_1 T_{m,I,II} \quad (9)$$

$$\left(\frac{dP}{dT_m}\right)_{I,V} \approx -\gamma_3(p_m - 1000), \ln P_{m,I,V} \approx -230\gamma_3 T_{m,I,V} \quad (10)$$

$$\left(\frac{dP}{dT_m}\right)_{II,VI} \approx -\gamma_3(p_m - 300), \ln P_{m,II,VI} \approx -69\gamma_{21} T_{m,I,V} \quad (11)$$

мұндағы, T_m және p_m – екі фазаларының тепе-теңдік сызығына сәйкес келетін температура мен қысым.

Келтірілген эмпериялық жуықтау түзу сызыққа сәйкес келеді. Демек, $1h$ -XII, V -VI мұз модификацияларының тепе-теңдік сызығы түзу сызыққа жақындайды.

Ал, $1h \rightarrow XII$, $III \rightarrow II$, $V \rightarrow VII$, $VI \rightarrow VIII$, $V \rightarrow XII$, $VIII \rightarrow XII$, $VI \rightarrow VII$ мұз модификацияларының тепе-теңдік сызығының көлбеулік бұрышының тангенсінің $\frac{dP}{dT_m} > 0$ таңбалары оң мәндерді қабылдайды.

1-кестеде келтірілген физико-химиялық параметрлер бойынша талдаулар жасасақ $1h \rightarrow II$, $1h \rightarrow III$, $1h \rightarrow VI$, $1h \rightarrow XII$ бір-біріне түрленгендегі меншікті көлемдерінің өзгерісі үлкен, ал $II \rightarrow V$, $VI \rightarrow VIII$ түрленулерінде шамалы екендігін көреміз. (200-250) К температура және (1700-2100) МПа қысым аймағында мұздың VI , $VIII$ модификациялары бір-біріне түрленгенде меншікті көлемнің өзгерісі өлшеу қателігіне жуық өте кіші шамаға тең. Фазалық түрленулер кезінде изотермалық өлшеулер арқылы анықталған мұз модификацияларының меншікті көлемдерінің өзгерісі изобаралық өлшеулермен сәйкес келеді. Фазалық диаграммада келтірілген барлық мұз модификациялары үшін фазалық өтулерде қысым артып, температура төмендегенде меншікті көлемдерінің өзгерісі кемиді. Көлемнің салыстырмалы өзгерістері жуықтап алғанда қысымға пропорционал. Фазалық диаграммадағы барлық мұз модификацияларының бірінші текті фазалық түрленгендегі, тәжірибе жүзінде өлшенген көлемдерінің өзгерістерін ΔV пайдаланып, меншікті $p\Delta V$ жұмыстың, энтальпияның $\Delta W + p\Delta V$, ішкі энергияның ΔW өзгерістерін анықтадық. Есептеулердің нәтижесінде тепе-теңдік күйді сипаттайтын сызықтың көлбеулік бұрышының тангенсі $\frac{dP}{dT_m} < 0$ кіші болғанда энтальпия мен ішкі энергияның өзгерістері төменгі қысымдағы фазадан жоғарғы қысымдағы фазаға түрленгенде энтропия мен ішкі энергияның оң мәндерді иеленеді. Бірінші текті фазалық түрлену кезінде тепе-теңдік сызығының көлбеулік бұрышының тангенсі $\frac{dP}{dT_m} > 0$ оң болғанда энтальпияның өзгерісі жоғары қысымдағы фазаға өткенде, ($1h \rightarrow XII$) ішкі энергияның өзгерісінің таңбасы теріс, ал $VI \rightarrow VII$, $VIII \rightarrow XII$ өткенде керісінше оң болады.

Энтропияның мәндерінің өзгерісі қарастырып отырған барлық жағдайларда $\frac{dP}{dT_m} > 0$ болғанда $\Delta S < 0$ теріс мәндерді қабылдайды. $\frac{dP}{dT_m} < 0$

теңсіздігі қанағаттанса, энтропияның өзгерісі $\Delta S > 0$ оң мәндерді иеленеді. Барлық фазалық түрленулерде $\frac{dP}{dT_m} < 0$ болғанда ішкі энергияның оң өзгерісі энтальпияның оң өзгерісінен едәуір үлкен болатынын көреміз.

Кесте 1

Физико-химиялық параметрлер бойынша талдаулар

Түрленулер	P_m , МПа	T_m , К	$-\Delta V \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{моль}$	$-\frac{dP}{dT_m}$, МПа/К	$\frac{\Delta S}{\text{моль}}$, 10^{-2} Дж	$\Delta J \times 10^2$ Дж/моль	$-\rho \Delta V \times 10^2$ Дж/моль	$\Delta W \times 10^2$ Дж/моль
1h → II	200	230	39,02	1,25	490	11,25	7,85	19,10
	250	210	38,05	2,50	970	20,36	97,25	30,08
	310	190	39,00	5,00	1995	37,07	12,36	49,40
420	170	42,04	11,10	4749	80,74	17,74	98,45	
1h → III	205	250	38,09	1,00	321	80,25	7,70	15,75
1h → VI	1050	153	56,30	20	1120	168	56,35	22,45
	1150	133	63,35	12,5	7121	92,56	69,65	16,21
	1395	113	66,70	20	7504	82,50	86,71	16,92
1h → XII	1415	100	21,00	-20	-4200	-42,05	31,53	-10,50
	1200	90	26,60	-20	-5320	-47,88	31,92	-15,95
1h → II	300	183	38,53	5,5	2129	40,64	11,54	52,19
	500	165	36,45	12,5	4550	76,44	18,20	94,64
	750	155	38,61	25	5514	87,15	29,95	116,07
1h → VI	1100	140	52,60	7,6	4046	57,45	57,86	115,33
	1200	128	58,93	20	11780	134,29	82,46	216,75
	1400	115	59,00	12,5	7375	94,33	70,80	165,13
II → V	230	420	35,00	5	175	4,02	1,47	54,95
	210	500	27,00	10	270	5,67	1,35	70,20
	190	670	28,30	12,5	350	6,65	1,87	85,26
III → V	345	250	11,3	2,5	283	7,07	39,55	11,03
V → VI	624	250	9,00	5	450	11,25	5,58	16,83
	800	230	7,25	5	263	6,04	5,60	11,64
	810	213	5,60	3,7	210	4,41	4,53	8,94
	900	193	7,00	5	350	6,65	6,30	12,95
VI → VII	2200	300	8,44	-1,25	5,0	0,15	18,48	18,33
	2250	315	9,10	-1,25	5,0	0,16	20,47	20,31
P = const								
1h → II	300	180	38,55	5,5	2129	40,64	11,55	52,19
	500	168	36,40	12,5	4550	76,44	18,20	94,64
	750	155	38,64	25	5514	87,12	28,95	116,07
1h → VI	1100	140	52,60	7,7	4046	57,45	57,86	11,53
	1200	125	58,92	20	11780	134,29	82,46	216,75
	1400	115	59,00	12,5	7325	94,33	70,80	165,13
II → V	500	210	3,90	11,11	433	9,10	19,55	11,05
	750	190	4,10	12,5	513	9,74	30,75	12,82
V → VI	750	230	6,30	3,7	233	5,40	4,72	1013
VII → XII	2150	125	12,00	-16,6	-2000	-24,00	25,80	1,80
	2300	135	12,70	-16,6	-2117	-27,30	29,21	1,91
VI → XII	1700	110	2,10	-16,0	-350	-3,78	35,70	-0,21
	1450	105	2,10	-25	-525	-5,25	29,42	-2,31
	1250	90	2,10	-25	-525	-4,72	25,30	-2,20

Кесте 2

Мұздың фазалық диаграммада үштік нүктелерінің координаталары

Тепе-теңдік күйдегі фазалар	Үштік нүктелер	P, МПа	T, К
1h-II-III	f	243	200
II-III-V	g	252	350
II-V-VI	h	173	970
1h-II-VI	k	153	1070
1h-VI-XII	ℓ	105	1550

Кестеде мұз үшін бестік нүктелер f, g, h, k, ℓ көрсетілген. Оның ішіндегі екі үштік (f, g) нүктелер қатты фазалар шекараларында кездеседі, ал

қалған (h , k , ℓ) үштік нүктелер сұйықпен шекарада түйіседі. Кестеде келтірілген үштік нүктелердің P-T координаталары алғаш рет [2] анықталып отыр.

Қорытынды. Мақала авторлары алғаш рет жоғары (0-2500) МПа қысым мен төменгі (0-250) К температурада тұрғызылған фазалық диаграммасына физика-химиялық талдаулар жасап, бірінші текті фазалық түрлену кезіндегі сипаттамалық функциялардың өзгерістерін анықтады.

Фазалардың шекараларын анықтайтын сызықтардың еңкіштік бұрышының тангенсінің $\frac{dP}{dT}$ таңбасын анықтау арқылы алғаш рет сипаттамалық функциялардың таңбаларына талдаулар жасалды.

Әдебиеттер тізімі

1. Hobbs, P.V. Ice Physics. – Oxford clazendon pzees, 1974. – 837 p.
2. Bizhigitov N., Sembiyeva A. Studu the Diagram of the Thermodynamic state of ice at High-Pressure and how-temperature in the P-T Coordinate //Jour of Adv Research in Dynamical control systems. – 2019. – Vol. 11. – No. 6.
3. Кушербаева М. Устройство для получения давления до 3000 МПа [Текст] / М. Кушербаева, Т. Бижигитов //Научный журнал. Механика и технологии. – 2017. – № 1(55). – С. 162-167.
4. Бижигитов Т. Измерение давления, температуры и объемных изменений в камере высокого давления при низких температурах [Текст] / Т. Бижигитов, М.Р. Кушербаева //Научный журнал. Механика и технологии. – 2017. – № 1(55). – С. 167-171.
5. Бижигитов, Т. Статистикалық физика. Физикалық кинетика негіздері [Мәтін]: оқулық / Т. Бижигитов. – Алматы: «Альманахъ», 2022. – 256 б.
6. Бижигитов, Т. Молекулалық физика [Мәтін]: оқулық / Т. Бижигитов, Е.К. Актаев. – Алматы: Экономика, 2017. – 481 б.
7. Бижигитов, Т. Жалпы физика курсы. 1 Том Механика, Молекулалық физика [Мәтін]: оқулық / Т. Бижигитов. – Алматы: «Лантар books», 2024. – 492 б.
8. Bizhigitov T, Yelibayeva A. The dependence of the compression modulus of ice-six and the coefficient of volume expansion on pressure and temperature //Вестник КазНПУ имени Абая, Серия «Физико-математические науки». – 2020. – No. 2(70).
9. Bizhigitov T., Sembiyeva A., Zhumadilov Yu. The reseazch of elastic properties of polymorphic II, III ice tupes at high pressure (0-2500 MPa) and low temperature (250-90K) //Science and Wored International Scientific journal. – 2020. – Vol. 1. – No. 1(77).

Материал редакцияға 11.11.24 түсті.

Т. Бижигитов¹, Э. Мадалиева¹

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ ЛЬДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ

Аннотация. В статье сделан физико-химический анализ фазовой диаграммы льда в координатах P-T при высоком (0-2500) МПа давлении и низкой (90-250) К температуре. С целью изучения фазовой диаграммы льда при давлении 2500 МПа и температуре от 90 К до температуры 250 К была рассчитана конструкция камеры поршнево-цилиндрического типа высокого давления. В целях повышения прочности камеры цилиндры, прошедшие термообработку трех концентрических слоев, подвергались нагреванию и принудительному наложению друг на друга.

Определение давления в исследуемом льду осуществлялось путем измерения электрического сопротивления олова и галлия (G_a), расположенных внутри (S_n). С помощью медно-константовой термосистемы, расположенной в образце, мы контролировали его температуру. Для измерения изменения объема в фазовых преобразованиях мы использовали специальный преобразователь, который преобразует линейное смещение в электрические импульсы. Проведение физико-химических анализов фазовой диаграммы с учетом изменения удельного объема при фазовом преобразовании позволяет определить тангенс угла равновесного наклона двух фаз с изменениями энтропии (ΔS), энтальпии (ΔJ), внутренней энергии (ΔW).

Ключевые слова: физико-химические характеристические функции, поликристалл, фазовое превращение первого рода.

T. Bizhigitov¹, E. Madaliyeva¹

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

INVESTIGATION OF THE ICE PHASE DIAGRAM USING PHYSICO-CHEMICAL ANALYSES

Abstract. The article provides a physico-chemical analysis of the ice phase diagram in P-T coordinates at high (0-2500) MPa pressure and low (90-250) K temperature. In order to study the phase diagram of ice at a pressure of 2500 MPa and a temperature from 90 K to a temperature of 250 K, the design of a high-pressure piston-cylindrical chamber was calculated. In order to increase the strength of the chamber, the cylinders that had undergone heat treatment of three concentric layers were heated and forced to overlap each other. The pressure in the ice under study was determined by measuring the electrical resistance of tin and gallium (G_a) located inside (S_n).

Using a copper-constantane thermosystem located in the sample, we controlled its temperature. To measure the volume change in phase transformations, we used a special converter, which converts linear displacement into electrical pulses. Carrying out physico-chemical analyses of the phase diagram, taking into account the change in specific volume during phase transformation, allows us to determine the tangent of the angle of equilibrium inclination of the two phases with changes in entropy (ΔS), enthalpy (ΔJ), internal energy (ΔW).

Keywords: physico-chemical characteristic functions, polycrystal, phase transformation of the first kind.

References

1. Hobbs, P.V. Ice Physics. – Oxford clazendon pzees, 1974. – 837 p.
2. Bizhigitov N., Sembliyeva A. Studu the Diagram of the Thermodynamic state of ice at High-Pressure and how-temperature in the P-T Coordinate // Jour of Adv Research in Dynamical control systems. – 2019. – Vol. 11. – No. 6.
3. Kuserbayeva M., Bizhigitov T. Ustroystvo dlya polucheniya davleniya do 3000 MPa [Device for obtaining pressure up to 3000 MPa] //Scientific journal. Mechanics and Technology. – 2017. – No 1(55). – P. 162-167. [in Russian].
4. Bizhigitov T., Kuserbayeva M.R. Izmereniye davleniya, temperatury i ob"yemnykh izmeneniy v kamere vysokogo davleniya pri nizkikh temperaturakh [Measurement of pressure, temperature and volumetric changes in a high-pressure chamber at low temperatures] // Scientific journal. Mechanics and Technology. – 2017. – No 1(55). – P. 167-171. [in Russian].

5. Bizhigitov, T. Statistikalыk, fizika. Fizikalыk, kinetika negizderi [Statistical physics. Physical kinetics of changes]: textbook. – Almaty: «Al'manakh», 2022. – 256 p. [in Kazakh].
6. Bizhigitov, T., Aktaev, E.K. Molekulalıq fizika [Molecular physics]: textbook. – Almaty: Economy, 2017. – 481 p. [in Kazakh].
7. Bizhigitov, T. Jalpi fizika kursı. 1 Tom Mehanika, Molekulalıq fizika [General physics course. Volume 1 Mechanics, Molecular physics]: textbook. – Almaty: «Lantar books», 2024. – 492 p. [in Kazakh].
8. Bizhigitov T, Yelibaeva A. The dependence of the compression modulus of ice-six and the coefficient of volume expansion on pressure and temperature //Vestnik KazNPU imeni Abaya, Seriya “Fiziko-matematicheskkiye nauki” [Bulletin of Abai Kazakh National Pedagogical University, Series “Physical and Mathematical Sciences”]. – 2020. – No 2(70).
9. Bizhigitov T., Sembieyeva A., Zhumadilov Yu. The reseazch of elastic properties of polymorphic II, III ice tupes at high pressure (0-2500 MPa) and low temperature (250-90K) //Science and Wored International Scientific journal. – 2020. – Vol. 1. – No. 1(77).