

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД АСТАРИНСКОГО РАЙОНА АЗЕРБАЙДЖАНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

М. А. Талыбов

Азербайджанский Технический Университет, г. Баку, Азербайджан

Поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

Аннотация: в представленной работе были изучены теплофизические свойства геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана. Исследование химического состава воды проводилось атомно-эмиссионным спектрометром с индуктивно-связанной плазмой IRIS Intrepid II Optical Emission Spectrometer и хроматографом DX-100. Были выбраны высокоточная экспериментальная установка, реализующая метод плотномера с вибрационной трубкой DMA HPM и DSA 5000M для исследования плотности при высоких атмосферных давлениях, установка Стабингера SVM 3000 для исследования вязкости, адиабатический калориметр для исследования теплоемкости, а также установки, реализующие абсолютные и дифференциальные статические методы для определения давления насыщенных паров. Температурная зависимость полученных экспериментальных результатов была описана с помощью различных эмпирических уравнений состояния водной среды. В результате исследований химического состава геотермальной воды были выявлены различные элементы: магний, калий, сера и т.д., которых можно использовать для лечебных целей: заболевания костно-мышечной системы, при болезнях кожи, нормализация артериального давления. Воды с такими содержаниями успешно применяются при гормональных сдвигах, изменении функции симпатико-адреналовой системы, состоянию иммунологической реактивности. Они также нормализуют процессы возбуждения и торможения в центральной нервной системе. Сульфидная бальнеотерапия в виде ванн также эффективно применяется на курортах Азербайджана.

Ключевые слова: геотермальные воды, экспериментальные исследования, плотность, уравнение состояния, теплофизические свойства.

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE GEOTHERMAL WATER OF THE ASTARA REGION AZERBAIJAN WITH HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

Summary: in the present work, the thermophysical properties of properties of geothermal water "Yanardag" of the Astara district of Azerbaijan were studied. The IRIS Intrepid II Optical Emission Spectrometer and DX-100 anion chromatography were used during the chemical analysis of sample. The high and atmospheric pressure density measurements were carried out using the Anton Paar DMA HPM and DSA 5000M vibration tube densimeters. The Stabinger SVM 3000 viscometer for the viscosity investigations, the adiabatic calorimeter for the heat capacity measurements were used during the experiments. The two different static method installations were used during the vapour pressure investigations. Temperature dependence of obtained experimental results was fitted using the empirical equations of water area. As a result of chemical analysis investigations of geothermal water, it was obtained various elements: magnesium, potassium, sulfur etc., which can be used for the therapeutic purposes: the illness of osteomuscular system, with the illnesses of the skin, the normalization of arterial pressure. Waters with such contents successfully applying during the hormonal shifts, changing in the function of sympatho-adrenal system, to the state of immunological reactivity. They also normalize the processes of excitation and stopping in the central nervous system. Sulfide balneotherapy in the form of baths also effectively applying in the health resorts of Azerbaijan.

Keywords: geothermal waters, experimental investigations, density, equation of state, thermophysical properties.

Введение

В последние десятилетия у людей возник интерес к альтернативной энергетике. В рамках Государ-

ственной Программы по использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии в Азербайджанской Республике, утвержденной распоряже-

нием Президента Азербайджанской Республики от 21 октября 2004 года под номером 462 [1], в республике проводятся широкомасштабные работы по строительству ветряных, малых и больших гидротермальных и солнечных электростанций по использованию энергии биомассы, геотермальных вод и т.д.

В последние годы в связи с подорожанием традиционных источников энергии и их возможной нехваткой в будущем активно развиваются технологии, использующие термальные воды. До настоящего времени, исследования теплофизических свойств геотермальных и минеральных вод Азербайджана проводились в очень ограниченном размере. В основном были изучены геологические и химические свойства этих вод [2–4]. Для использования геотермальных вод в различных энергетических установках необходимо знание их теплофизических свойств, которые почти не изучены. В течение последних нескольких лет в этом направлении ведутся работы на кафедре «Тепло- и хладотехника» Азербайджанского технического университета. В данной статье приводятся экспериментальные данные геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района, в южной части Азербайджана (рис. 1).

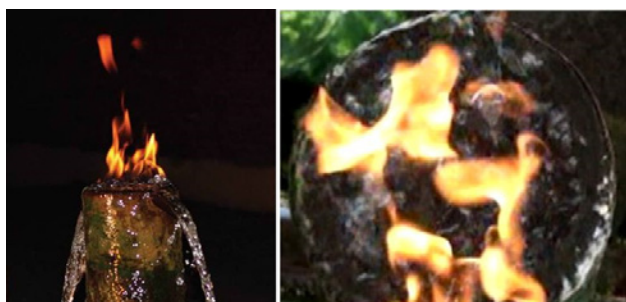


Рис. 1. Геотермальный источник «Янарбулаг», Астара.

Геотермальный источник «Янарбулаг» один из множества редких геологических объектов. Этот комплекс находится южнее села Арчиван, возле магистральной дороги Баку–Астара. Источник является одним из мест, многочисленного посещения, а также проявления наибольшего интереса. В 1972 году геологи обнаружили подземные потоки в этом районе и пробурили скважину. В результате была обнаружена вода. Она поднимается примерно из 62-метровой глубины, содержит большое количество серы и растворенного природного газа, в основном метана, который при выходе из месторождения горит. К этому источнику большой интерес как у местного населения, так и со стороны путешественников. 40 лет назад здесь был построен родник. Эту воды нельзя употреблять для питья или для приготовления еды. Измеренный образец был коллекционирован прямо из источника. Для измерения теплофизических свойств (кроме химического анализа) он был подготовлен после фильтрации, удаления растворенных газов и воздуха с помощью вакуумного насоса.

Экспериментальная часть

Теплофизические свойства геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района изучены с использованием современных экспериментальных установок. Сначала был исследован химический состав воды в лабораториях кафедры Технической Термодинамики Ростокского университета в Германии с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой IRIS Intrepid II Optical Emission Spectrometer производства Великобритании и хроматографа DX-100. Принципы работы спектрометра IRIS и хроматографа DX-100 приведены в предыдущих работах авторов [5–6]. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1
Химический состав геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

Анализ катионов					
Элементы	Мг литр	Эле- менты	Мг литр	Эле-менты	Мг литр
Al 1670	<0,1	Hg 1849	<0,1	S 1820	12,5
As 1890	<0,1	K 7664	2,3	Sb 2175	<0,1
B 2089	0,3	Li 6707	<0,1	Se 1960	<0,1
Ba 2304	<0,1	Mg 2790	15,2	Si 2124	21,7
Ca 3181	51,6	Mn 2939	0,1	Sn 1899	1,0
Cd 2288	<0,1	Mo 2020	<0,1	Ti 3349	<0,1
Co 2286	<0,1	Na 8183	61,3	Tl 1908	<0,1
Cr 2055	<0,1	Ni 2316	<0,1	V 2924	<0,1
Cu 3247	<0,1	P 2136	<0,1	Zn 2062	<0,1
Fe 2599	<0,1	Pb 2203	<0,1	Cәmi:	5120,61
Анализ анионов					
Хлориды	62,8	Нитраты	< 1	Сульфаты	0,0

Для измерения плотности образца при высоких давлениях и температурах была использована высокоточная экспериментальная установка, реализующая метод плотномера с вибрационной трубкой [7]. Данный метод в современной экспериментальной теплофизике отличается высокой точностью измерений, простотой, незначительными временными и экономическими затратами, а также возможностью автоматизации процесса измерений. Принцип действия экспериментальной установки приведен в работах [8–10]. Основной элемент экспериментальной установки – плотномер с вибрационной трубкой DMA HPM фирмы Anton-Paar.

Температура в измерительной ячейке поддерживается с точностью 0,01 К и измеряется платиновым термометром сопротивления (ITS-90) Pt100 с погрешностью ± 15 мК. Давление создается с помощью насоса НР и измеряется с помощью сенсоров давления Wika P-10 класса точности 0,1 % и НР-1 класса точности 0,5 % от максимально измеренного значения. Погрешность измерения плотности при данных условиях составила $\Delta\rho/\rho = \pm(0,01-0,03)$ %. Измерения (ρ, ρ, T)-зависимостей проводились при температурах в интервале $T=(274,15 \text{ до } 413,15)$ К и давлениях до $p=100$ МПа. Полученные результаты плотности образца приведены в таблице 2.

Таблица 2

Экспериментальные значения теплофизических свойств
геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана*

№ п/п	ρ	ρ	T	κ_T	α_p	$c_p - c_v$	γ	p_{int}	c_p	c_v	u	κ_s
1	0,101	1000,26	274,15	488,1	-101,2	5,8	-0,2074	-57,0	3969,57	3963,82	1432,21	20314,83
2	1,023	1000,70	274,15	486,8	-99,3	5,6	-0,2040	-57,0	3964,60	3959,05	1433,75	2010,888
3	5,024	1002,64	274,16	481,3	-90,9	4,7	-0,1889	-56,8	3943,21	3938,51	1440,34	414,039
4	10,026	1005,05	274,15	474,8	-80,8	3,8	-0,1702	-56,7	3917,00	3913,25	1448,33	210,282
5	19,956	1009,76	274,18	462,5	-59,6	2,1	-0,1290	-55,3	3866,07	3863,98	1463,66	108,400
6	29,954	1014,41	274,15	451,3	-39,2	0,9	-0,0869	-53,8	3816,91	3815,99	1478,09	73,986
7	39,926	1018,96	274,15	441,0	-17,9	0,2	-0,0407	-51,1	3769,60	3769,41	1491,78	56,792
8	49,924	1023,44	274,13	431,6	3,4	0,0	0,0080	-47,7	3724,11	3724,10	1504,67	46,409
9	60,002	1027,86	274,15	422,8	26,1	0,4	0,0618	-43,0	3680,20	3679,76	1517,10	39,424
10	70,020	1032,16	274,15	414,8	48,9	1,5	0,1180	-37,7	3638,62	3637,09	1528,70	34,446
12	79,925	1036,33	274,14	407,6	71,9	3,4	0,1763	-31,6	3599,71	3596,36	1539,45	30,728
13	89,965	1040,47	274,15	400,8	96,1	6,1	0,2399	-24,2	3562,44	3556,37	1549,87	27,782
14	99,965	1044,50	274,15	394,6	121,0	9,7	0,3065	-15,9	3527,65	3517,92	1559,62	25,419
15	0,101	1000,53	278,15	480,3	-26,3	0,4	-0,0547	-15,3	3944,31	3943,91	1442,56	20614,71
16	1,074	1001,00	278,16	479,0	-24,3	0,3	-0,0508	-15,2	3939,41	3939,07	1444,29	1944,208
17	5,228	1002,97	278,16	473,3	-16,8	0,2	-0,0354	-15,1	3919,07	3918,91	1451,46	404,176
18	10,231	1005,29	278,17	466,7	-7,4	0,0	-0,0160	-14,7	3894,91	3894,88	1459,94	209,444
19	20,232	1009,97	278,16	454,4	10,8	0,1	0,0237	-13,6	3848,13	3848,06	1476,19	108,782
20	29,986	1014,37	278,17	443,3	29,1	0,5	0,0656	-11,7	3804,20	3803,68	1491,33	75,240
21	40,365	1019,03	278,17	432,5	48,6	1,5	0,1124	-9,1	3759,44	3757,95	1506,65	57,307
22	50,022	1023,29	278,17	423,2	67,1	2,9	0,1585	-5,9	3719,62	3716,73	1520,23	47,276
23	60,187	1027,68	278,17	414,2	86,9	4,9	0,2098	-1,8	3679,64	3674,70	1533,86	40,170
24	69,986	1031,84	278,17	406,2	106,4	7,5	0,2619	2,9	3643,12	3635,61	1546,37	35,253
25	80,025	1036,01	278,17	398,6	126,8	10,8	0,3181	8,5	3607,68	3596,84	1558,61	31,447
26	90,021	1040,09	278,17	391,6	147,7	14,9	0,3771	14,9	3574,50	3559,61	1570,25	28,487
27	99,954	1044,05	278,17	385,2	169,0	19,8	0,4387	22,1	3543,71	3523,96	1581,30	26,119
28	0,101	1000,40	283,16	471,9	58,0	2,0	0,1228	34,7	3918,72	3916,70	1455,72	20990,86
29	1,007	1000,97	283,18	470,6	59,7	2,1	0,1268	34,9	3914,56	3912,42	1457,45	2111,254
30	5,337	1002,95	283,18	464,7	66,3	2,7	0,1427	35,1	3895,41	3892,73	1465,35	403,501
31	10,661	1005,35	283,18	457,7	74,5	3,4	0,1628	35,5	3872,30	3868,88	1474,86	205,130
32	20,209	1009,72	283,16	445,9	89,0	5,0	0,1996	36,3	3832,18	3827,19	1491,31	111,119
33	30,039	1014,05	283,16	434,7	104,4	7,0	0,2401	38,0	3792,50	3785,50	1507,60	76,730
34	40,113	1018,43	283,16	424,0	120,3	9,5	0,2837	40,2	3753,64	3744,15	1523,60	58,941
35	50,003	1022,71	283,15	414,4	136,0	12,4	0,3282	42,9	3717,28	3704,92	1538,64	48,422
36	60,006	1026,95	283,14	405,4	152,2	15,8	0,3754	46,3	3682,30	3666,55	1553,24	41,288
37	69,986	1031,07	283,14	397,0	168,7	19,7	0,4249	50,3	3649,35	3629,67	1567,23	36,185
38	80,062	1035,16	283,14	389,2	185,7	24,2	0,4772	55,0	3617,95	3593,71	1580,82	32,310
39	89,975	1039,07	283,15	382,0	202,9	29,4	0,5312	60,4	3589,03	3559,65	1593,74	29,334
40	99,829	1042,93	283,15	375,4	220,4	35,1	0,5870	66,4	3562,21	3527,09	1606,05	26,949
41	0,101	999,17	293,18	459,3	199,8	25,5	0,4349	127,4	3883,06	3857,57	1481,09	21700,39
42	1,244	999,68	293,16	457,7	200,6	25,8	0,4384	127,3	3878,89	3853,10	1483,32	1768,087
43	5,202	1001,45	293,16	452,2	204,6	27,1	0,4524	127,4	3864,34	3837,24	1491,18	428,083
44	10,293	1003,67	293,17	445,5	209,8	28,9	0,4710	127,8	3846,09	3817,23	1501,08	219,732
45	19,894	1007,93	293,16	433,5	219,3	32,3	0,5060	128,4	3812,78	3780,51	1519,22	116,944
46	29,989	1012,24	293,17	421,8	229,7	36,2	0,5445	129,6	3779,34	3743,13	1537,66	79,816
47	40,244	1016,59	293,17	410,9	240,2	40,5	0,5846	131,1	3747,06	3706,57	1555,69	61,141
48	50,004	1020,60	293,18	401,1	250,4	44,9	0,6242	133,0	3717,90	3673,00	1572,28	50,462
49	60,301	1024,80	293,18	391,6	261,2	49,9	0,6670	135,3	3688,79	3638,94	1589,18	42,924
50	69,987	1028,68	293,18	383,3	271,5	54,8	0,7084	137,7	3663,02	3608,20	1604,50	37,842
51	79,995	1032,61	293,18	375,3	282,4	60,3	0,7525	140,6	3637,95	3577,62	1619,85	33,872
52	90,031	1036,47	293,18	367,8	293,5	66,2	0,7980	143,9	3614,45	3548,21	1634,75	30,767
53	99,773	1040,15	293,18	360,9	304,4	72,4	0,8435	147,5	3593,23	3520,86	1648,76	28,341
54	0,101	998,17	298,15	454,9	259,3	44,1	0,5699	169,8	3871,47	3827,33	1492,61	22013,88
55	1,025	998,57	298,15	453,6	260,0	44,5	0,5731	169,8	3868,26	3823,77	1494,54	2175,730
56	5,035	1000,33	298,14	448,1	262,9	46,0	0,5866	169,9	3854,83	3808,87	1502,66	448,560
57	10,002	1002,49	298,15	441,5	266,7	47,9	0,6041	170,1	3838,44	3790,51	1512,65	229,321
58	19,957	1006,77	298,15	429,0	274,3	51,9	0,6393	170,7	3806,75	3754,82	1532,08	118,414
59	29,935	1011,00	298,16	417,4	282,1	56,2	0,6757	171,5	3776,50	3720,30	1550,90	81,238

Продолжение табл. 2

№ п/п	p	ρ	T	κ_T	α_p	$c_p - c_v$	γ	p_{int}	c_p	c_v	u	κ_s
60	39,954	1015,17	298,15	406,6	289,8	60,6	0,7125	172,5	3747,64	3687,01	1569,10	62,561
61	50,004	1019,29	298,15	396,6	297,7	65,4	0,7506	173,8	3720,18	3654,83	1586,78	51,327
62	59,928	1023,30	298,15	387,3	305,6	70,3	0,7890	175,3	3694,53	3624,27	1603,67	43,914
63	69,924	1027,26	298,17	378,7	313,9	75,5	0,8290	177,3	3670,26	3594,73	1620,16	38,562
64	80,004	1031,19	298,15	370,5	322,1	81,0	0,8693	179,2	3647,19	3566,23	1636,18	34,503
65	89,924	1035,00	298,15	363,0	330,4	86,7	0,9104	181,5	3625,99	3539,32	1651,50	31,388
66	99,954	1038,78	298,15	355,8	339,0	92,7	0,9528	184,1	3606,06	3513,32	1666,53	28,859
67	0,101	992,96	313,15	448,7	406,7	116,3	0,9065	283,8	3855,65	3739,39	1521,31	22753,61
68	1,035	993,37	313,15	447,3	406,8	116,6	0,9094	283,7	3853,10	3736,48	1523,34	2227,262
69	5,004	995,13	313,14	441,8	407,2	118,1	0,9217	283,6	3842,39	3724,29	1531,88	466,675
70	10,091	997,35	313,15	435,0	407,9	120,1	0,9378	283,6	3828,95	3708,85	1542,67	235,215
71	19,925	1001,56	313,15	422,5	409,2	123,9	0,9687	283,4	3803,86	3679,93	1563,00	122,802
72	29,940	1005,75	313,16	410,7	410,7	127,9	1,0001	283,3	3779,63	3651,73	1582,95	84,173
73	39,926	1009,83	313,15	399,8	412,2	131,8	1,0311	283,0	3756,63	3624,82	1602,17	64,925
74	50,004	1013,85	313,15	389,6	413,9	135,9	1,0626	282,7	3734,63	3598,77	1620,94	53,273
75	59,924	1017,74	313,13	380,2	415,6	139,8	1,0932	282,4	3714,10	3574,31	1638,79	45,613
76	70,005	1021,59	313,15	371,2	417,6	144,0	1,1250	282,3	3694,47	3550,44	1656,43	40,040
77	79,925	1025,31	313,15	363,0	419,6	148,2	1,1560	282,1	3676,25	3528,09	1673,20	35,915
78	89,954	1029,01	313,15	355,2	421,7	152,4	1,1873	281,9	3659,04	3506,65	1689,58	32,656
79	99,925	1032,62	313,15	347,9	424,0	156,7	1,2185	281,6	3643,01	3486,36	1705,38	30,055
80	0,101	983,40	333,17	453,1	551,8	227,6	1,2177	405,6	3873,25	3645,62	1544,10	23214,75
81	1,459	984,00	333,18	451,1	551,1	228,0	1,2216	405,6	3870,30	3642,33	1547,13	1614,341
82	5,290	985,70	333,18	445,7	549,2	228,7	1,2323	405,3	3862,00	3633,26	1555,56	450,882
83	10,257	987,86	333,19	438,8	546,7	229,8	1,2460	404,9	3851,49	3621,73	1566,31	236,284
84	19,911	992,01	333,17	426,2	541,9	231,5	1,2716	403,8	3831,67	3600,21	1586,62	125,419
85	29,988	996,23	333,17	414,0	537,3	233,2	1,2978	402,4	3811,97	3578,76	1607,04	85,794
86	40,113	1000,35	333,17	402,7	532,8	234,8	1,3233	400,8	3793,13	3558,29	1626,80	65,998
87	50,021	1004,31	333,16	392,3	528,6	236,3	1,3473	398,9	3775,56	3539,30	1645,42	54,358
88	60,136	1008,25	333,15	382,5	524,4	237,6	1,3711	396,6	3758,53	3520,94	1663,74	46,409
89	70,004	1012,02	333,15	373,5	520,6	238,8	1,3936	394,3	3742,79	3503,97	1680,98	40,849
90	80,125	1015,81	333,14	364,9	516,7	239,9	1,4158	391,5	3727,48	3487,58	1698,01	36,553
91	90,019	1019,43	333,14	357,0	513,0	240,9	1,4369	388,7	3713,37	3472,48	1714,07	33,273
92	99,977	1023,02	333,14	349,6	509,4	241,8	1,4573	385,5	3699,99	3458,23	1729,66	30,613
93	0,101	971,53	353,15	468,5	660,6	338,6	1,4102	497,9	3929,46	3590,81	1550,63	23128,65
94	1,230	972,04	353,15	466,7	659,5	338,6	1,4131	497,8	3927,30	3588,72	1553,13	1906,321
95	5,002	973,75	353,16	461,0	655,8	338,4	1,4226	497,4	3920,16	3581,76	1561,45	474,631
96	9,954	975,97	353,15	453,8	651,1	338,0	1,4346	496,7	3910,95	3572,97	1572,08	242,316
97	19,926	980,34	353,15	440,2	641,8	337,1	1,4580	495,0	3893,11	3556,03	1592,80	124,816
98	29,957	984,62	353,16	427,5	632,9	336,0	1,4802	492,8	3876,02	3540,01	1612,77	85,486
99	40,002	988,81	353,15	415,8	624,1	334,6	1,5010	490,1	3859,60	3525,00	1631,91	65,827
100	49,926	992,85	353,15	405,1	615,8	333,0	1,5203	487,0	3844,16	3511,14	1650,02	54,139
101	59,924	996,84	353,14	395,0	607,6	331,2	1,5384	483,3	3829,30	3498,14	1667,49	46,252
102	70,003	1000,76	353,15	385,5	599,6	329,1	1,5554	479,3	3815,10	3485,97	1684,34	40,556
103	79,957	1004,55	353,15	376,8	591,8	326,9	1,5709	474,8	3801,74	3474,88	1700,25	36,318
104	89,965	1008,31	353,13	368,5	584,1	324,3	1,5850	469,8	3788,90	3464,64	1715,56	32,985
105	99,954	1011,97	353,15	360,9	576,7	321,6	1,5980	464,4	3776,90	3455,31	1730,13	30,305
106	0,101	957,89	373,14	492,3	750,5	445,6	1,5244	568,7	4018,87	3573,22	1544,36	22620,16
107	0,511	958,23	373,09	491,5	749,7	445,2	1,5252	568,5	4017,83	3572,61	1545,28	4477,342
108	5,777	960,42	373,15	483,1	742,7	443,6	1,5373	567,9	4008,35	3564,80	1556,60	402,875
109	10,716	962,76	373,14	475,5	736,1	441,6	1,5480	566,9	3999,35	3557,78	1566,97	220,618
110	20,252	967,01	373,16	461,7	723,7	437,8	1,5676	564,7	3982,78	3545,01	1586,25	120,161
111	29,992	971,38	373,15	448,6	711,5	433,5	1,5860	561,8	3966,45	3532,98	1605,06	83,444
112	40,184	975,86	373,14	436,0	699,2	428,7	1,6035	558,2	3950,22	3521,51	1623,69	64,022
113	50,032	979,97	373,15	424,8	687,7	423,9	1,6189	554,1	3935,38	3511,45	1640,78	52,731
114	60,009	984,04	373,16	414,3	676,4	418,8	1,6328	549,3	3921,04	3502,24	1657,21	45,036
115	69,972	988,08	373,15	404,5	665,3	413,3	1,6449	543,8	3907,30	3494,00	1672,77	39,514
116	80,043	991,99	373,15	395,3	654,4	407,5	1,6556	537,7	3894,13	3486,64	1687,66	35,302
117	90,021	995,77	373,15	386,8	643,7	401,4	1,6644	531,0	3881,71	3480,29	1701,60	32,034
118	99,836	999,43	373,14	379,0	633,4	395,1	1,6714	523,8	3870,04	3474,91	1714,54	29,437
119	0,199	942,90	393,15	524,3	838,2	558,8	1,5988	628,4	4140,41	3581,59	1529,21	11079,74

Продолжение табл. 2

№ п/п	p	ρ	T	κ_T	α_p	$c_p - c_v$	γ	p_{int}	c_p	c_v	u	κ_s
120	1,025	943,30	393,15	522,8	836,7	558,2	1,6005	628,2	4138,55	3580,40	1530,99	2157,030
121	5,002	945,22	393,15	515,7	829,5	554,9	1,6084	627,4	4129,75	3574,81	1539,43	447,826
122	9,957	947,59	393,15	507,3	820,7	550,9	1,6179	626,1	4119,07	3568,16	1549,68	228,553
123	19,968	952,30	393,14	491,3	803,6	542,6	1,6356	623,1	4098,33	3555,75	1569,49	117,486
124	30,004	956,95	393,15	476,7	787,3	534,2	1,6515	619,3	4078,80	3544,65	1588,17	80,450
125	39,968	961,47	393,15	463,4	771,7	525,5	1,6653	614,8	4060,39	3534,88	1605,63	62,019
126	50,003	965,93	393,13	451,1	756,6	516,5	1,6773	609,4	4042,70	3526,23	1622,17	50,832
127	59,968	970,28	393,15	439,8	742,1	507,4	1,6874	603,4	4026,24	3518,83	1637,55	43,385
128	69,945	974,54	393,15	429,4	728,0	498,0	1,6955	596,6	4010,52	3512,54	1651,96	38,018
129	80,025	978,76	393,16	419,6	714,1	488,2	1,7017	589,0	3995,50	3507,30	1665,54	33,922
130	89,965	982,83	393,15	410,7	700,6	478,2	1,7058	580,7	3981,34	3503,17	1678,02	30,755
131	99,954	986,84	393,15	402,5	687,4	467,8	1,7079	571,5	3967,88	3500,07	1689,63	28,180
132	0,362	926,30	413,15	566,9	947,0	705,5	1,6704	689,8	4306,39	3600,87	1509,08	5827,386
133	0,695	926,58	413,14	566,2	946,1	704,9	1,6709	689,6	4305,19	3600,27	1509,81	3038,798
134	5,386	928,86	413,17	556,7	934,8	698,1	1,6790	688,3	4290,28	3592,20	1519,69	398,306
135	10,120	931,33	413,16	547,5	923,4	690,9	1,6865	686,7	4275,31	3584,45	1529,38	215,261
136	20,078	936,44	413,14	529,5	900,6	675,8	1,7008	682,6	4245,33	3569,50	1548,77	111,868
137	30,029	941,29	413,15	513,2	879,2	661,1	1,7131	677,7	4217,45	3556,31	1566,81	76,947
138	40,070	945,97	413,18	498,3	858,8	646,5	1,7234	672,0	4191,13	3544,66	1583,71	59,214
139	49,988	950,64	413,15	484,8	839,3	631,5	1,7314	665,3	4166,22	3534,70	1599,28	48,641
140	60,245	955,33	413,12	471,9	819,9	616,0	1,7374	657,5	4141,96	3525,96	1614,16	41,318
141	69,976	959,66	413,13	460,8	802,4	601,4	1,7411	649,3	4120,45	3519,06	1627,13	36,310
142	80,009	964,03	413,14	450,3	784,8	586,1	1,7428	640,0	4099,45	3513,31	1639,40	32,385
143	90,011	968,31	413,15	440,7	767,8	570,7	1,7422	629,8	4079,67	3508,93	1650,53	29,308
144	99,958	972,50	413,15	431,9	751,3	555,1	1,7394	618,7	4061,01	3505,87	1660,54	26,829

*Примечания: p – давления р/МПа, ρ – плотности $\rho/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, T – температуры Т/К, κ_T – вычисленные значения изотермического коэффициента сжимаемости $\kappa_T \cdot 10^6/\text{МПа}^{-1}$, α_p – изобарного коэффициента теплового расширения $\alpha_p \cdot 10^6/\text{К}^{-1}$, $c_p - c_v$ – разностей изобарной и изохорной теплоемкостей ($c_p - c_v$)/Дж·кг⁻¹·К⁻¹, γ – термического коэффициента давления $\gamma/\text{МПа}\cdot\text{К}^{-1}$, p_{int} – р внутреннего давления $p_{int}/\text{МПа}$, c_p – изобарной теплоемкости $c_p/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, c_v – изохорной теплоемкости $c_v/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, u – скорости звука $u/\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, κ_s – изэнтропного расширения.

Плотность и скорость звука при атмосферном давлении были измерены с помощью высокоточной установки DSA 5000M компании Anton Paar, Австрия [11]. DSA 5000M отлично зарекомендовала себя своими измерительными способностями и необычайно высоким уровнем надежности. Перед измерениями установка тщательно промывается с помощью воды и ацетона и продувается воздухом для осушения. Потом на дисплее DSA 5000M контролируется плотность и скорость звука воздуха при температуре окружающей среды, так как измерительная трубка имеет контакты с окружающей средой.

После этого выбирается необходимый режим измерения. Метод измерения плотности приведен в [11].

Для определения скорости звука измеряется распространение звука с вычислением периода вибрации акустической ячейки. Волны звука с определенными частотами передаются от одного ультразвукового передатчика, а на другой стороне принимаются с помощью другого датчика. При наличии дистанции между обоими передатчиками, а также частоты звуковых волн, можно вычислить скорости звука с помощью нижеследующего уравнения:

$$v = \frac{\text{реальная длина} \cdot (1 + 1.6E - 5 \cdot \Delta_{\text{тем}})}{\text{Ps} - \text{TAU} \cdot f_3} - \text{TAU} \cdot f_3 \quad (1)$$

разделительный коэффициент

здесь: реальная длина – реальная длина звуковых волн (примерно 5000 $\mu\text{м}$), $\Delta_{\text{тем}}$ – погрешность температуры при $T=293,15$ К, Ps – период принимающих звуковых волн, разделительный коэффициент – 512, TAU – постоянная установки, f_3 – коэффициент коррекции температуры. Коэффициенты TAU и f_3 секреты установки DSA 5000M фирмы Anton-Paar. С помощью установки DSA 5000M можно измерить скорость звука в веществе при температурах 278,15 – 343,15 К, в интервале скорости звука 1000–2000 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ и с погрешностью 0,1 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. Как отмечено ранее, во время подготовки пробы для измерения (кроме химического анализа) все растворимые газы были удалены из нее с помощью вакуума.

Растворенные газы отделяются при высоких температурах и играют негативную роль при измерении теплофизических свойств. Потом с помощью шприца измеренная проба вводится в установку. При атмосферном давлении полученные значения плотности сравнивались со значениями плотности, измеренными на установке DSA 5000M. Полученные разными методами данные хорошо согласуются между собой в пределах $\Delta\rho/\rho = \pm 0,02\%$.

Точность измерения для плотности была $\pm 0,000005$ г/см³ при скорости звука $\pm 0,5$ м/с. Полученные результаты геотермальной воды «Янарбулаг» при атмосферном давлении и температурах $T = (278,15 - 343,15)$ К представлены в таблице 3.

Таблица 3

Экспериментальные значения температуры T/K , плотности $\rho/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, вычисленные значения разности от плотности чистой воды IAPWS-95 $(\rho-\rho_w)/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, дифференциала удельного объема от температуры $(dv/dT)/\text{м}^3\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, изобарного коэффициента теплового расширения $\alpha_p\cdot 10^6/\text{K}^{-1}$, скорости звука $u/\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, адиабатического сжимаемости $\kappa_s\cdot 10^6/\text{МПа}^{-1}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

T	ρ	$\rho-\rho_w$	dv/dT	α_p	u	κ_s
278,130	1000,75	0,74	3,2669E-08	32,7	1428,72	489,53
283,140	1000,44	0,78	9,2111E-08	92,2	1448,63	476,31
293,150	998,96	0,80	2,0285E-07	202,6	1482,75	455,32
298,150	997,81	0,79	2,5416E-07	253,6	1497,10	447,15
313,150	992,98	0,71	3,9208E-07	389,3	1530,15	430,12
333,180	983,81	0,62	5,3879E-07	530,1	1553,41	421,23
343,170	978,34	0,63	5,9596E-07	583,0	1557,28	421,48
343,141	978,36	0,63	5,9581E-07	582,9	1557,28	421,47

Изобарная теплоемкость $c_p(p_0, T)/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ геотермальной воды при атмосферном давлении и температурах $T=(274,15-373,15)$ К, при давлениях насыщения и температурах $T=(383,15-413,15)$ К были измерены адиабатическим калориметром [12]. Полученные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

Экспериментальные значения изобарной теплоемкости $c_p(p_0, T)/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана при атмосферном давлении и температурах $T=(274,15-373,15)$ К, при давления насыщения и температурах $T=(383,15-413,15)$ К

T/K	$c_p(p_0, T)$
274,15	3969,00
278,15	3945,06
283,15	3919,69
293,15	3882,70
298,15	3870,39
303,15	3861,78
313,15	3854,58
323,15	3859,14
333,15	3873,91
343,15	3897,73
353,15	3929,87
363,15	3969,98
373,15	4018,12
383,15	4074,75
393,15	4140,75
403,15	4217,39
413,15	4306,34

Эксперименты по определению давления насыщенных паров геотермальной воды были проведены в лаборатории кафедры Технической термодинамики Ростокского университета в Германии на двух различных установках [13]:

- при $T=(274,15-323,15)$ К – реализующей абсолютный и дифференциальный статический метод,
- при $T=(323,15-413,15)$ К – реализующей абсолютный статический метод.

Полученные данные приведены в таблице 5.

Таблица 5

Экспериментальные значения температуры T/K и давления насыщенных паров $P/\text{Па}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

T/K	$P/\text{Па}$	T/K	$P/\text{Па}$
274,15	878	343,15	36846
278,15	1158	353,15	55163
283,13	1613	363,15	80530
293,82	3142	373,15	114897
303,47	5473	383,15	160538
313,24	9220	393,15	220063
323,02	14983	403,15	296419
333,15	23935	413,15	392892

Эксперименты по определению динамической вязкости геотермальной воды «Янарбулаг» были проведены с погрешностью 0,35 % на установке SVM 3000 Stabinger производства Австрии [14] в лаборатории кафедры Технической Термодинамики Ростокского университета в Германии. Полученные данные приведены в таблице 6.

Таблица 6

Экспериментальные значения температуры T/K , динамической $\mu\cdot 10^6/\text{Па}\cdot\text{с}$ и кинематической $\nu\cdot 10^6/\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ вязкости геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

T	μ	ν	T	μ	ν
274,150	1739,91	1,73931	313,150	665,03	0,66970
278,150	1539,60	1,53879	333,170	508,34	0,51687
283,160	1326,40	1,32588	353,150	349,14	0,35934
293,180	1006,67	1,00759	373,140	72,96	0,07616
298,150	891,37	0,89319			

Обсуждение результатов. Экспериментальные исследования проводились в определенном интервале параметров состояния. Чтобы определить свойства воды в любом значении этих состояний, нужно описать экспериментальные значения с помощью уравнений состояния. Полученные результаты (p, ρ, T) зависимости геотермальной воды при высоких давлениях и различных температурах были описаны следующим уравнением состояния из [10]:

$$p/\text{МПа} = A(\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3})^2 + B(\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3})^8 + C(\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3})^{12}, \quad (2)$$

здесь коэффициенты $A(T)$, $B(T)$ и $C(T)$ в уравнении (2) являются функциями температуры.

$$A(T) = \sum_{i=1}^4 a_i T^i, \quad B(T) = \sum_{i=0}^3 b_i T^i, \quad C(T) = \sum_{i=0}^3 c_i T^i. \quad (3)$$

Полученные коэффициенты a_i , b_i и c_i в уравнении

(3) представлены в таблице 7. Уравнения (2) и (3) хорошо описывают экспериментальные данные плотности измеренной пробы $\pm 0,0049\%$.

Зависимость разности экспериментальной плотности $\rho_{\text{exp}}/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ от вычисленной с помощью уравнения состояния $\rho_{\text{cal}}/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ геотермальной воды от давления $p/\text{МПа}$ показана на рис. 2.

Таблица 7

Значения коэффициентов a_i , b_i и c_i в уравнении (3)

a_i	b_i	c_i
4870570796	$b_0 = 8718,29877264$	$c_0 = -4970,12823183$
36196804722	$b_1 = -68,279971871441$	$c_1 = 38,294799516$
$a_3 = -0,111649988923 \cdot 10^{-3}$	$b_2 = 0,185875493$	$c_2 = -0,097097812255$
$a_1 = -7, a_2 = 0,04 a_4 = 0,10502324324 \cdot 10^{-6}$	$b_3 = -0,159118 \cdot 10^{-3}$	$c_3 = 0,756837239527 \cdot 10^{-4}$

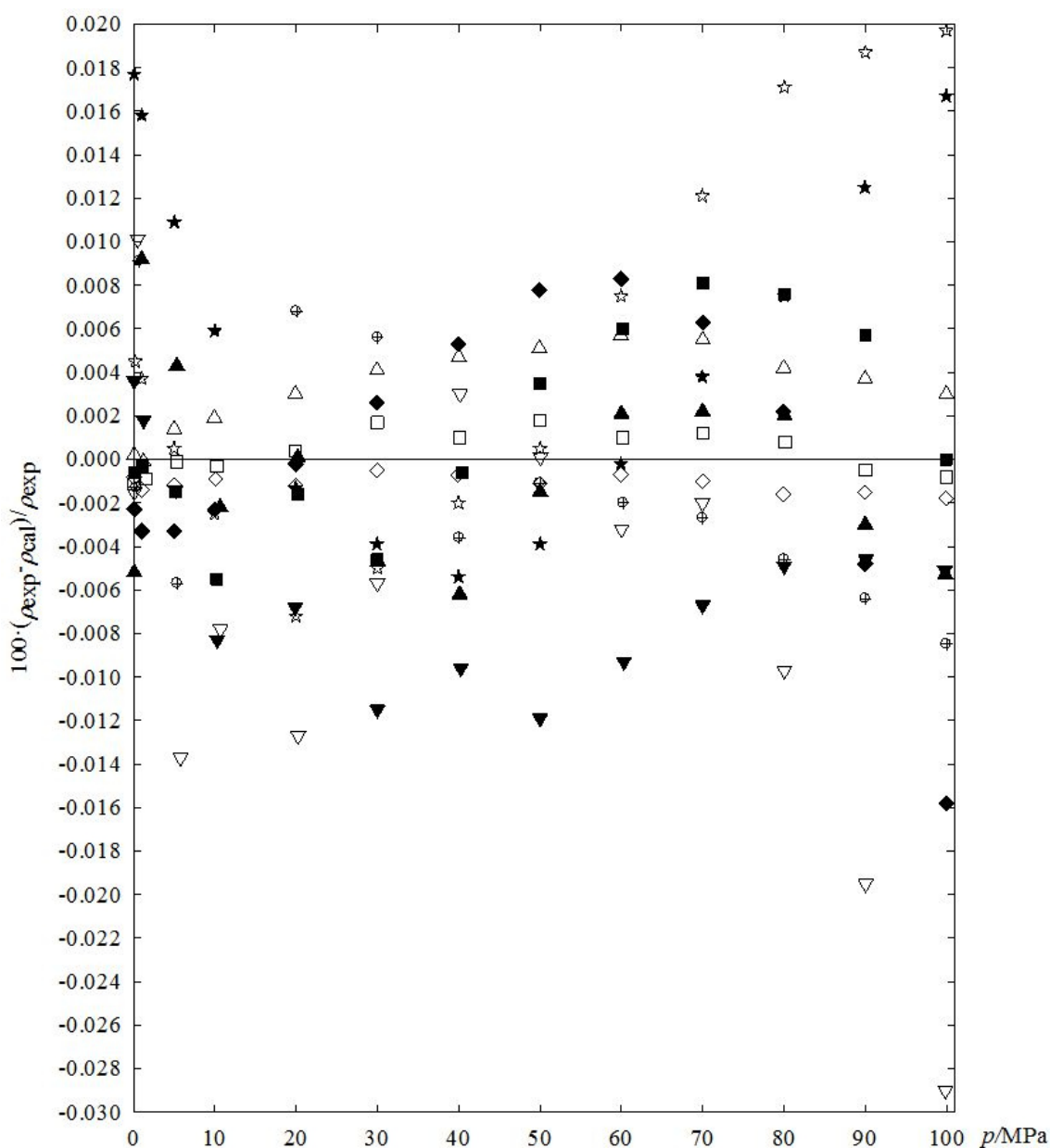


Рис. 2. Зависимость разности экспериментальной плотности $\rho_{\text{exp}}/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ от вычисленной с помощью уравнения состояния $\rho_{\text{cal}}/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана от давления $p/\text{МПа}$: $\blacklozenge$ 274,15 К; $\blacksquare$ 278,17 К; $\blacktriangle$ 283,16 К; $\blacktriangledown$ 293,17 К; $\star$ 298,15 К; $\diamond$ 313,15 К; $\square$ 333,16 К; $\triangle$ 353,15 К; $\triangledown$ 373,14 К; $\star$ 393,15 К; $\oplus$ 413,15 К.

Полученные данные плотности $\rho/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ геотермальной воды при атмосферном давлении и температурах $T=(278,15-363,15)$ К описаны в зависимости от температуры $T/\text{К}$ с помощью полиномиального уравнения в нижеследующей форме:

$$\rho = \sum_{i=0}^3 d_i T^i, \quad (4)$$

где: d_i – коэффициенты уравнения (4), приведенные в таблице 8.

Изобарический коэффициент термического расширения $\alpha_p \cdot 10^6/\text{К}^{-1}$ для геотермальной воды был вычислен с использованием нижеследующего термодинамического уравнения равновесия и также приведены в таблице 3:

$$\alpha_p = \frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dT} \right)_p, \quad (5)$$

где: $v = \frac{1}{\rho}$, ($\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$) специфический объем измеренного вещества.

Полученные данные скорости звука $u/\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ геотермальной воды в зависимости от температуры $T/\text{К}$ при атмосферном давлении и температурах $T=(278,15-363,15)$ К также описаны с помощью полиномиального уравнения в нижеследующей форме:

$$u = \sum_{i=0}^3 e_i T^i, \quad (6)$$

где: e_i – коэффициенты уравнения (6), приведенные в таблице 9.

Полученные данные изобарной теплоемкости $c_p(p_0, T)/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ геотермальной воды при атмосферном давлении и температурах $T=(274,15-373,15)$ К, при давлениях насыщения и температурах $T=(383,15-413,15)$ К, также описаны с помощью полиномиального уравнения в нижеследующей форме:

$$c_p = \sum_{i=0}^4 f_i T^i, \quad (7)$$

где: e_i – коэффициенты уравнения (7), приведенные в таблице 10.

Полученные данные давления насыщенных паров $P/\text{Па}$ геотермальной воды «Янарбулаг» были описаны с помощью уравнения Антуана в нижеследующей форме:

$$\ln P = A - B/(T + C), \quad (8)$$

здесь: P – давление пара в Па, T – абсолютная температура в К, A , B и C – коэффициенты, которые приведены в таблице 11 вместе с погрешностью описания экспериментальных данных, которые были рассчитаны по формуле:

$$\delta p/p = (100/n) \cdot \sum_{i=1}^n [(P_{\text{экс.}} - P_{\text{рас.}})/P_{\text{экс.}}]. \quad (9)$$

где, $P_{\text{экс}}$ – экспериментальное давления насыщения, $P_{\text{рас}}$ – рассчитанная давления насыщения с помощью уравнения (8).

Таблица 8

Значения коэффициентов d_i в уравнении (4)

d_0	d_1	d_2	d_3
98,1534367681247	8,097227700713	- 0,0231055280948659	0,203520629002973·10 ⁻⁴

Таблица 9

Значения коэффициентов e_i в уравнении (6)

e_0	e_1	e_2	e_3
4689,17054850273000	46,6656089957964	-0,113300829459757	0,884641926659491·10 ⁻⁴

Таблица 10

Значения коэффициентов f_i уравнение для описания экспериментальных значений изобарной теплоемкости $c_{p0}/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

f_0	f_1	f_2
34788,1166671818	-329,419688887537	1,32280649944367
f_3	f_4	$\delta c_{p0}/c_{p0}, \%$
-0,2398860887398·10 ⁻²	0,1681633823·10 ⁻⁵	0,0007

Таблица 11

Значения коэффициентов A , B , C уравнения Антуана для описания экспериментальных значений давления насыщенных паров $P/\text{Па}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

A	B	C	$\delta P/P, \%$
23,0255	3753,61	-43,1265	0,1260

Таблица 12

Значения коэффициентов h_i уравнения для описания экспериментальных значений динамической вязкости $\mu \cdot 10^6 / \text{Pa} \cdot \text{s}$ геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана

h_0	h_1	h_2	$\delta\mu/\mu, \%$
238030,750689954	-372,81848438169	4,60990451741154	0,8393

Полученные данные динамической вязкости $\mu \cdot 10^6 / \text{Pa} \cdot \text{s}$ геотермальной воды «Янарбулаг» были описаны с помощью уравнения в нижеследующей форме:

$$\ln(\mu) = \sum_{i=0}^2 \frac{h_i}{(T - 43.15)^i}, \quad (10)$$

где: h_i - коэффициенты уравнения (10), приведенные в таблице 12.

Теплофизические свойства геотермальной воды «Янарбулаг» были исследованы впервые, поэтому сравнение их с литературными данными не представляется возможным. Полученные данные были сопоставлены с теплофизическими свойствами чистой воды и выявлено, что поведение исследованных вод имеет сходные с чистой водой закономерности.

Заключение

Теплофизические свойства геотермальной воды «Янарбулаг» Астаринского района Азербайджана были обширно изучены в широком интервале параметров состояния. Данные исследования были проведены впервые. В результате исследований химического состава геотермальной воды было выявлено большое количество следующих элементов: Ca, Mg, Na, Si и S. Характер теплофизических свойств исследованной воды не так сильно отличается от такового чистой воды, поэтому ее можно применять в лечебных целях. Такие воды снижают желудочную секрецию, оказывают слабительное и желчегонное действие, а также рекомендуются при заболеваниях сердечно-сосудистой, костно-мышечной, центральной нервной систем, кожных болезнях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная Программа по использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии в Азербайджанской Республике. – Баку. – 2004.
2. Гашкай, М. А. Минеральные источники Азербайджана / М. А. Гашкай. – Баку. – 1952. – 503 с.
3. Тагиев, И. И. Ресурсы минеральных и термальных вод Азербайджана / И. И. Тагиев, И. Ш. Ибрагимова, А. М. Баба-

ев. – Баку, Чашыоглы. – 2001. – 168 с.

4. Ибрагимова, И. Ш. Гидрогеологические условия формирования минеральных вод Азербайджана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / И. Ш. Ибрагимова. – Санкт-Петербург. – 2004. – 317 с.
5. Талыбов, М. А. Химический состав (Катионы) геотермальных, минеральных и питьевых вод Ярдымлинского района Азербайджана / М. А. Талыбов // Мониторинг. – Наука и технологии, 2012. – № 1 (10). – С. 48–53.
6. Талыбов, М. А. Анион анализ / М. А. Талыбов // Научные труды Азербайджанского Технического Университета, 2016. – в печати.
7. Kratky, O. Dichtemessungen an Flüssigkeiten und Gasen auf 10^{-6} g/cm^3 bei 0.6 cm^3 Präparatvolumen / O. Kratky, H. Leopold, H. H. Stabinger // Z. Angew. Phys., 1969. – № 27. – P. 273–277.
8. Shahverdiyev, A. N. Vibration tube densimeter method for the measurements of (p,ρ,T) properties / A. N. Shahverdiyev, J. T. Safarov, M. A. Talibov, F. Sh. Aliyev // Journal of Fundamental Sciences of Azerbaijan Technical University, 2006. – Vol. 5, Nr. 19. – С. 21–22.
9. Abdulagatov, I. M. (p,ρ,T) Properties of 1-Propanol / I. M. Abdulagatov, F. Aliyev, J. Safarov, M. Talibov, A. Shahverdiyev, E. Hassel // Fluid Phase Equilibria, 2008. – Vol. 268. – P. 21–33.
10. Safarov, J. Thermodynamic properties of standard seawater: extensions to high temperatures and pressures / J. Safarov, F. J. Millero, R. Feistel, A. Heintz, E. Hassel // Ocean Science, 2009. – No 5. – P. 235–246.
11. Талыбов, М. А. Плотность геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана / М. А. Талыбов // Известия Национальной Академии Наук Азербайджана / Физика и астрономия, 2014. – Т. 34. – № 3. – С. 130–136.
12. Талыбов, М. А. Изобарная теплоемкость алифатических спиртов и их бинарных смесей при высоких давлениях: автореф. дис. ... канд. тех. наук / М. А. Талыбов. – Баку. – 1994. – 161 с.
13. Талыбов, М. А. Давление насыщенных паров геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана / М. А. Талыбов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 114–118.
14. Талыбов, М. А. Измерения вязкости геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана / М. А. Талыбов // Научно-технический журнал, Мониторинг / Наука и Технологии, 2014. – № 1 (18). – С. 82–89.

Азербайджанский Технический Университет

Талыбов Мисирхан А., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики

E-mail: misirkhan.talibov@gmail.com;

misirkhan.talibov@yahoo.com

Тел.: + 994 12 539 1445; Факс: + 994 12 538 3280

Azerbaijan Technical University

Talibov M. A., PhD in Technical,
Heat Energy Chair

E-Mail: misirkhan.talibov@gmail.com;

misirkhan.talibov@yahoo.com

Tel.: + 994 12 539 1445; Fax: + 994 12 538 3280