

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ
ИЗВЕСТНЯКОВОЙ ПОРОДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НУРАБАДСКОГО РАЙОНА
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**

Ф.Д. Собирзода, С.А. Таоев

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В работе представлены результаты определения плотности и рентгенофазового анализа известняковой породы двух образцов месторождения Нурабадского района Республики Таджикистан. Представлены экспериментальные значения средних плотностей образцов методом гидростатического взвешивания. Показано, что исследуемые образцы представляют руду, состоящую из кальцита и доломита с примесью кварца. Результаты рентгенофазного анализа образцов показывают, что данное месторождение можно использовать для получения кальцитов и доломитов для производства строительных материалов и продуктов химической промышленности.

Ключевые слова: известняковая порода, кальцит, доломит, плотность, рентгенофазовый анализ.

**ХОСИЯТҲОИ ТЕРМОДИНАМИКӢ ВА ТАҲЛИЛИ РЕНТГЕНОФАЗАВИИ ОҲАҚСАНГИ КОНИ
НОҲИЯИ НУРОБОДИ ЧУМҲУРИИ ТОҶИКИСТАН**

Ф.Д. Собирзода, С.А. Таоев

Дар кори мазкур натиҷаҳои муайян намудани зичӣ ва таҳлили рентгенофазавии ду намунаи оҳаксанги кони ноҳияи Нурободи чумхурии Тоҷикистон оварда шудаанд. Қиматҳои таҷрибавии зичии миёнаи намунаҳо бо усули баркашии гидростатикий пешниҳод карда шудаанд. Нишон додааст, ки намунаҳои тадқиқшаванд маъданҳое мебошанд, ки аз қалтсит ва доломит бо омехтаи кварц иборат мебошанд. Натиҷаҳои таҳлили рентгенофазии намунаҳо нишон медиҳанд, ки ин кон метавонад барои истеҳсоли қалтситҳо ва доломитҳо барои истеҳсоли масолеҳи соҳтмонӣ ва маҳсулоти саноати кимиё истифода шавад.

Калидвоҷсаҳо: оҳаксанг, қалтсит, доломит, зичӣ, таҳлили рентгенофазавӣ.

**THERMODYNAMIC PROPERTIES AND X-RAY PHASE ANALYSIS OF LIMESTONE ROCK
DEPOSITS OF THE NURABAD DISTRICT OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN**

F.D. Sobirzoda, S.A. Tagoev

The paper presents the results of density determination and X-ray phase analysis of limestone rock from two samples of the deposit in the Nurabad regions of the Republic of Tajikistan. Experimental values of the average sample densities by hydrostatic weighing are presented. It is shown that the studied samples are ores consisting of calcite and dolomite with an admixture of quartz. The results of the X-ray phase analysis of the samples show that this deposit can be used to produce calcites and dolomites for the production of building materials and chemical industry products.

Keywords: limestone rock, calcite, dolomite, density, X-ray phase analysis.

Введение

Сфера применения известняка является многогранной и важной. Потребителями этой продукции являются такие секторы экономики, как строительство, металлургия, бумажная промышленность, химическая промышленность, энергетика, сельское хозяйство, а также защита окружающей среды. Известь используется для защиты окружающей среды - очистка дымовых газов и сточных вод, в том числе в энергетике, в тепловых электростанциях.

Известь получают из известняковых пород с высоким содержанием кальцита (карбоната кальция) путём обжигания при температуре около 900°C в известковых печах. Свойства извести варьируются в зависимости от месторождений. Поэтому знания свойств руд для производства извести, включая термодинамический (плотность) и элементный состав очень важно для производителя. Исследование плотности и фазового состава известняковых руд позволяет их эффективную обработку по производству конечных материалов.

Объект исследования

Нурабадский район Республики Таджикистан является районом республиканского подчинения (координаты 38° с. ш. и 70° в. д.), административный центр – пгт Дарбанд расположен в 155 км восточнее города Душанбе. В Нурабадском районе расположено несколько месторождений полезных ископаемых, в том числе известняковые месторождения, которые в настоящее время не используются. Объектом исследования являются образцы известняковых пород месторождений вблизи (3 км) села Таг (10 км от центра) с/с Сафедчашма Нурабадского района. Нами выбраны два образца, первый - бело-серого цвета и второй - преимущественно белого цвета (рис. 1).



Рисунок 1 – Объекты исследования: а) объект №1 – порода бело-серого цвета; б) объект №2 – порода белого цвета

Постановка задачи

Для выявления возможностей применения различных пород, разработки технологии обогащения руды, выявления минералов и отдельных элементов, которые можно извлечь из данной руды, а также какие из этих элементов представляют опасность с экологической точки зрения, необходимо определить элементный состав пород. Поэтому мы поставили перед собой первую задачу – определение элементных составов и плотности образцов известняковых пород месторождения Нурабадского района.

Метод исследования

Средняя плотность (вместе с пустотами и порами) твёрдых пород — это отношение массы породы m , кг к её объёму V , м^3 :

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3. \quad (1)$$

Средняя плотность большинства горных пород находится в пределах от 1500 до 3500 кг/м^3 . Существуют различные методы определения плотности твёрдых пород. Так как наши образцы имеют неправильную форму, мы выбрали метод гидростатического взвешивания [1, 2, 3, 4]. Гидростатическое взвешивание основано на законе Архимеда, объем V и плотность ρ образцов неправильной геометрической формы определяется путем взвешивания образцов в воздухе с плотностью ρ_a и жидкости с известной плотностью $\rho_{ж}$ меньшей плотности образца ρ . При этом вес образца в воздухе P_1 больше веса образца в жидкости P_2 , так как выталкивающая сила Архимеда в жидкости намного больше, чем в воздухе. Разность $P_1 - P_2$ есть потеря веса тела в жидкости:

$$P_1 - P_2 = mg - \rho_a g V - mg + \rho_{ж} g V = \rho_{ж} g V - \rho_a g V = (\rho_{ж} - \rho_a) g V, \quad (2)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Если пренебречь плотностью воздуха, так как $\rho_{ж} \gg \rho_a$, тогда формулу (1) можно написать в виде:

$$P_1 - P_2 = \rho_{ж} g V. \quad (3)$$

Из этой формулы можно рассчитать объем образца:

$$V = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{ж} g}. \quad (4)$$

Используя связь веса тела с его массой, $P = mg$, формулу (3) можно написать в следующем виде:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{ж} g}. \quad (5)$$

Связь плотности с весом определяется по формуле:

$$\rho = \frac{P_1}{Vg}. \quad (6)$$

Вставляя (4) в (6), получим формулу для расчета плотности тела:

$$\rho = \rho_{ж} \frac{P_1}{P_1 - P_2}. \quad (7)$$

Вставляя (5) в (7), получим формулу для расчета плотности образцов в более удобной форме:

$$\rho = \rho_{ж} \frac{m_1}{m_1 - m_2}, \quad (8)$$

где m_1 и m_2 – показания весов в воздухе и в жидкости.

Для определения плотности образцы предварительно высушивают, взвешивают, насыщают водой или смазывают слоем водонепроницаемого вещества. Далее взвешивают образцы с помощью аналитических весов на воздухе m_1 и в жидкости m_2 с известной плотностью $\rho_{ж}$. По разности результатов этих взвешиваний можно определить объем образца V , который занимает такой же объем воды по формуле (5). Определив массу (вес) сухих образцов до насыщения водой или смазывания в воздухе m_1 и в жидкости m_2 с известной плотностью $\rho_{ж}$, вычисляют среднюю плотность пород по формуле [8].

В качестве жидкой среды с известной плотностью нами использована дистиллированная вода при комнатной температуре (температура помещения во время проведения опыта). Для измерения массы образцов применены электронные весы с погрешностью 0,01 %.

Для определения элементного состава пород также применяются различные методы. Для нас оказался доступным рентгенофазовый анализ, который является эффективным и широко применяемым методом определения элементного состава пород.

Рентгенофазовый анализ основан на идентификации вещества в смеси по набору его межплоскостных расстояний d и интенсивностям I соответствующих линий на рентгенограмме. Каждое кристаллическое вещество характеризуется определенным распределением атомов по элементарной ячейке решетки, представляющей набор межплоскостных расстояний, следовательно, береговских углов отражения θ при дифракции на заданном излучении [5, 6, 7].

Межплоскостное расстояние — это кратчайшее расстояние между двумя соседними параллельными плоскостями одного семейства параллельных плоскостей. Индивидуальность и распределение атомов определяют интенсивность лучей после дифракции. По рентгенограмме можно определить, какому известному веществу соответствуют полученные пики. Рентгенограмма представляется в виде графика зависимости интенсивности лучей после дифракции I (в % или имп/с) от двойных береговских углов отражения 2θ . Удвоение угла дифракции (2θ) связано с тем, что детектору необходимо радиально перемещаться вдвое быстрее, чем кристаллу (образцу) относительно стационарно установленной рентгеновской трубы, чтобы зафиксировать отраженный пучок лучей [6].

Экспериментальная часть

В таблице 1 приведены результаты определения средних плотностей образцов №1 и №2, полученные методом гидростатического взвешивания. Температура жидкой среды – дистиллированной воды равна температуре воздуха в лаборатории и определена с помощью стеклянного термометра. Плотность дистиллированной воды взята из справочной литературы при данной температуре. Показания весов в воздухе и дистиллированной воде представлены в граммах, которые при расчете необходимо перевести в килограммы. Относительная погрешность определения плотности рассчитана на основе погрешностей взвешивания образцов в воздухе и воде. Плотность и другие теплофизические параметры можно определить по методике, изложенной в литературе [8].

Таблица 1 – Результаты определения средней плотности пород

Объект	Температура жидкой среды, $t_{ж}$, °C	Плотность жидкой среды $\rho_{ж}$, кг/м ³	Показания весов в воздухе m_1 , г	Показания весов в жидкости m_2 , г	Средняя плотность образца ρ , кг/м ³	Относительная погрешность δ , %
Образец №1	20	998	27,49	13,86	2012	0,184
Образец №2	20	998	43,78	24,16	2224	0,126

На рисунках 2 и 3 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов в виде рентгенограммы – зависимость интенсивности лучей после дифракции от двойного угла отражения.

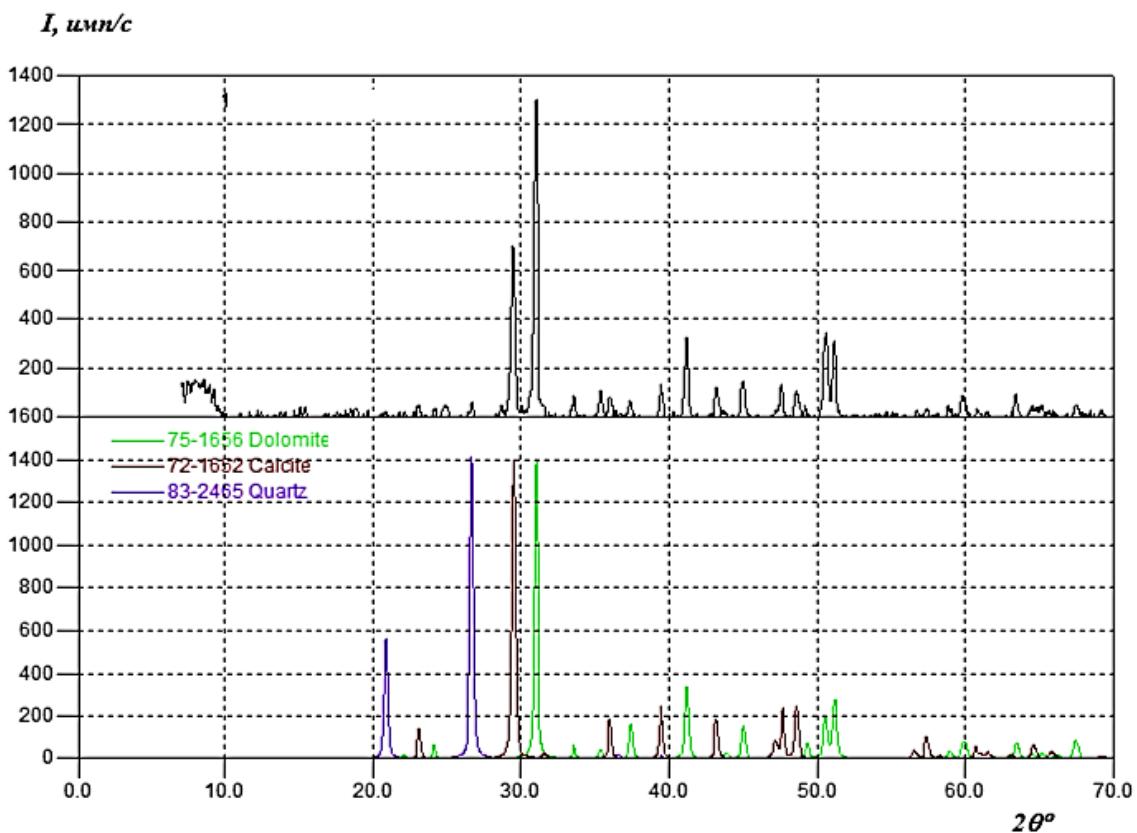


Рисунок 2 – Рентгенограмма образца №1

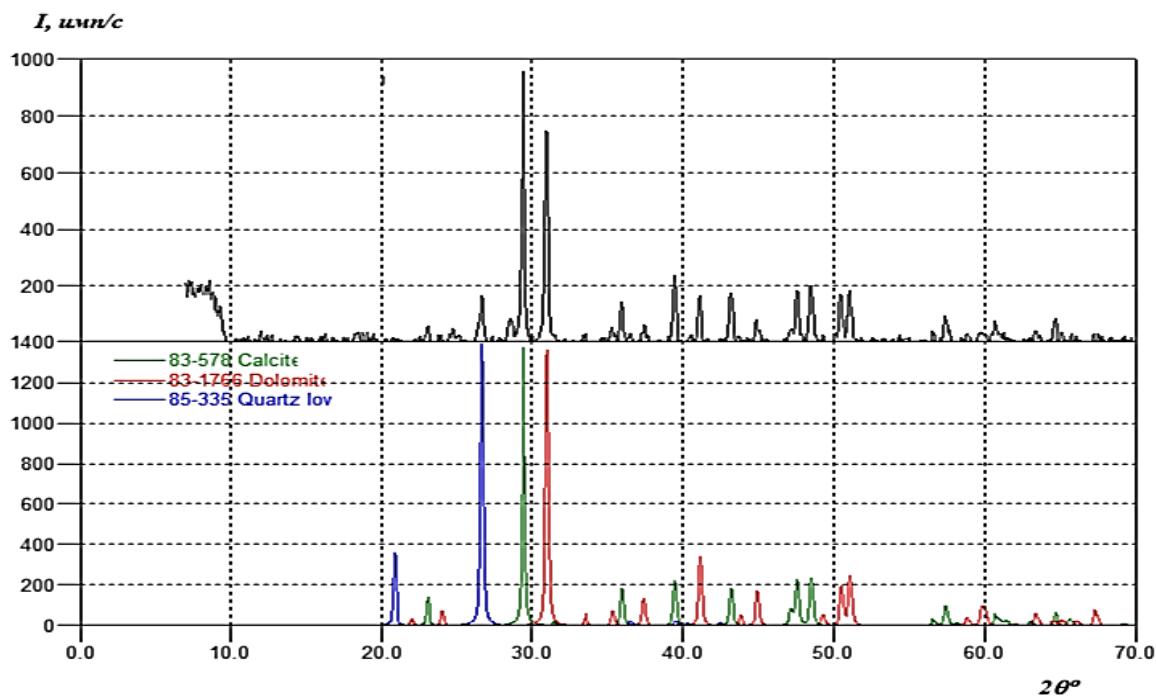


Рисунок 3 – Рентгенограмма образца №2

В таблицах 2 и 3 представлен список пиковых значений в рентгенограмме образцов №1 и №2. Приведены сведения о двойном угле отражения лучей, межплоскостном расстоянии d , Å, интенсивности линий, имп/с, ширине пиков, доверительной вероятности и совпадении элементов А (доломит), В (кальцит) и С (кварц).

Таблица 2 – Список пиковых значений для образца № 1

Двойной угол отражения 2θ°	Межплоскостное расстояние d, Å	Интенсивность линий, имп/с	Ширина пиков	Доверительная вероятность	Совпадение элемента
14.672	6.0327	18	0.150	91.0%	
18.827	4.7094	41	0.178	100%	
19.631	4.5185	23	0.161	98.4%	
20.870	4.2529	22	0.180	98.5%	C
23.054	3.8547	48	0.178	100%	B
24.139	3.6838	29	0.205	99.9%	A
24.832	3.5826	43	0.216	100%	
26.674	3.3392	36	0.193	100%	C
28.640	3.1142	25	0.239	99.7%	
29.433	3.0321	477	0.182	100%	B
30.960	2.8860	854	0.179	100%	A
31.947	2.7991	22	0.149	99.0%	
33.534	2.6701	77	0.203	100%	A
35.357	2.5365	94	0.193	100%	A
36.013	2.4918	63	0.202	100%	B
37.393	2.4030	59	0.194	100%	A
39.471	2.2811	127	0.203	100%	BC
41.183	2.1901	235	0.184	100%	A
43.233	2.0909	118	0.190	100%	B
43.784	2.0659	29	0.174	99.9%	A
44.978	2.0138	137	0.197	100%	A
45.969	1.9727	28	0.171	99.9%	
47.584	1.9094	103	0.194	100%	B
48.607	1.8716	94	0.202	100%	B
49.267	1.8480	36	0.182	100%	A
50.588	1.8028	264	0.187	100%	AC
51.161	1.7840	230	0.187	100%	A
53.617	1.7079	21	0.159	98.8%	
54.610	1.6792	20	0.164	99.6%	
55.215	1.6622	16	0.217	98.7%	C
56.787	1.6199	18	0.192	98.8%	
57.459	1.6025	32	0.186	100%	B
58.921	1.5662	32	0.190	100%	A
59.892	1.5431	80	0.229	100%	AC
60.857	1.5209	27	0.228	99.9%	
61.519	1.5061	14	0.169	93.5%	B
63.497	1.4639	72	0.197	100%	A
64.534	1.4428	26	0.200	99.1%	A
65.138	1.4309	23	0.174	98.4%	A
67.501	1.3865	37	0.196	100%	A

Таблица 3 – Список пиковых значений для образца № 2

Двойной угол отражения 2θ°	Межплоскостное расстояние d, Å	Интенсивность линий, имп/с	Ширина пиков	Доверительная вероятность	Совпадение элемента
9.405	9.3954	44	0.179	95.6%	
12.631	7.0024	27	0.150	95.0%	
15.933	5.5579	27	0.135	98.7%	
16.323	5.4258	33	0.141	99.9%	
18.344	4.8323	23	0.172	96.6%	
18.747	4.7293	22	0.136	94.9%	
19.143	4.6326	25	0.136	99.1%	
23.023	3.8598	48	0.164	100%	A
23.906	3.7191	18	0.171	96.4%	
24.635	3.6108	20	0.196	94.6%	
25.111	3.5433	23	0.143	97.7%	

Окончание таблицы №3

26.657	3.3413	106	0.180	100%	C
27.373	3.2555	19	0.164	95.5%	
27.916	3.1934	18	0.173	97.0%	
28.535	3.1255	52	0.260	100%	
29.414	3.0341	638	0.166	100%	A
30.937	2.8881	514	0.163	100%	B
32.163	2.7807	23	0.158	94.1%	
33.496	2.6731	25	0.207	99.5%	B
35.292	2.5411	32	0.191	99.9%	B
35.968	2.4948	122	0.170	100%	A
36.533	2.4575	28	0.171	99.8%	C
37.386	2.4034	31	0.191	99.9%	B
39.434	2.2832	187	0.169	100%	AC
40.531	2.2239	15	0.237	95.0%	
41.099	2.1945	148	0.169	100%	B
43.184	2.0932	160	0.180	100%	A
44.908	2.0168	54	0.197	100%	B
47.095	1.9281	34	0.142	99.8%	A
47.557	1.9104	157	0.171	100%	A
48.532	1.8743	161	0.186	100%	A
49.276	1.8477	21	0.169	99.2%	B
50.505	1.8056	145	0.170	100%	B
51.070	1.7869	137	0.180	100%	B
53.274	1.7181	13	0.152	91.6%	
53.927	1.6988	20	0.141	98.8%	
54.333	1.6871	14	0.147	91.7%	
56.589	1.6251	31	0.195	100%	A
57.421	1.6035	70	0.191	100%	A
58.945	1.5656	36	0.170	100%	B

В таблицах 4 и 5 представлены основные показания выявленных элементов А, В и С при рентгенофазовом анализе. Приведены сведения о химических формулах элементов, общих количествах пиков, количестве совпадающих пиков, количестве новых совпадений и концентрации элементов А, В и С в образцах.

Таблица 4 – Результаты рентгенофазового анализа образца №1

Показатель	Элемент	Элемент А Доломит	Элемент В Кальцит	Элемент С Кварц
Формула		CaMg (CO ₃) ₂	CaCO ₃	SiO ₂
Общее количество пиков		25	19	18
Совпадающие пики		19	11	5
Новые совпадения		19	11	5
Концентрация, %		62,8008	36,7227	0,476503

Таблица 5 – Результаты рентгенофазового анализа образца №2

Показатель	Элемент	Элемент А Кальцит	Элемент В Доломит	Элемент С Кварц
Формула		CaCO ₃	CaMg (CO ₃) ₂	SiO ₂
Общее количество пиков		19	25	18
Совпадающие пики		13	13	4
Новые совпадения		13	13	4
Концентрация, %		62,4839	37,1453	0,370815

Обсуждение

Результаты определения средних плотностей образцов пород показывают, что они относятся к породам близкой к средней плотности, в том числе известняковым и доломитовым породам (1800-2600 кг/м³).

Рентгенограмма образца №1 (рис. 2) и таблица 2 показывают, что образец состоит из трех основных элементов: первое место – элемент А – доломит, второе место - элемент В – кальцит, третье место - элемент С – кварц. Рентгенограмма образца №2 (рис. 3) отличается тем, что в образце на первом месте по концентрации стоит элемент А – кальцит, на втором месте - элемент В – доломит. Элемент С – кварц, как и в образце №1 занимает третье место.

Из таблицы 5 видно, что образец №2 также состоит из трех основных элементов – элемент А – кальцит CaCO_3 – с концентрацией 62,8008%, элемент В — доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – с концентрацией 36,7227%, а также элемент С – кварц SiO_2 – с концентрацией 0,476503%. Из таблицы 4 видно, что образец №1 состоит из трех основных элементов – элемент А – доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – с концентрацией 62,4839%, элемент В – кальцит CaCO_3 – с концентрацией 37,1453%, а также элемент С – кварц SiO_2 – с концентрацией 0,370815%. В обоих образцах концентрация кварца составляет менее одного процента, что показывает относительную чистоту известняковой породы.

Выводы

Промышленная переработка известняковых пород требует знания их характеристик и элементных составов. Определение средней плотности пород дает информацию о типе пород (лёгкие, средние, тяжелые и очень тяжелые). Количественный рентгенофазовый анализ позволяет определить элементный состав пород и их концентрации с высокой точностью.

Результаты определения плотностей и рентгенофазного анализа образцов показывают, что данное месторождение можно использовать для получения кальцитов и доломитов в производстве строительных материалов, продуктов химической промышленности и реагентов для очистки газовых выбросов и сточных вод.

Рецензент: Собиров Дж.Ф. — д.т.н., и.о. доцента кафедры общей физики Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава.

Литература

1. В.А. Ткачев. Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Физика горных пород» / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. – 26 с.
2. А.В. Дерюшев, П.М. Будников. Физика горных пород. Лабораторный практикум. Учебное пособие. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (КузГТУ), 2021. — 235 с.
3. В.С. Корнеев, С.Л. Шергин. Физика горных пород. Практикум. — Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2024. — 38 с.
4. С.В. Матренин. Определение плотности материалов: Методическое указание по выполнению лабораторных работ по курсу «Механические и физические свойства материалов». –Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 8 с.
5. Г.А. Кузнецова. Качественный рентгенофазовый анализ. Методические указания / Иркутский государственный университет. Иркутск: ИГУ, 2005. – 28 с.
6. Е.Н. Буланов. Рентгенография. Физические основы метода и практическое приложение: Электронное учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 49 с.
7. Р.Г. Батулин, А.Г. Киямов, О.В. Недопекин и др. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ. -Казань: К(П)ФУ. - 2021. - 185 с.
8. С.А. Тагоев. Установка для комплексного измерения некоторых теплофизических и электрофизических свойств жидких теплоносителей. Политехнический вестник. Серия: Интеллект, Инновации, Инвестиции. №2 (70), 2025. – С. 40-45.

МАЪЛУМОТ ОИД БА МУАЛЛИФОН -СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Собирзода Файзали Давлатназар	Собирзода Файзали Давлатназар	Sobirzoda Fayzali Davlatnazar
Унвончӯй	Соискатель	Applicant
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
TJ	RU	EN
Тагоев Сафовидин Асоевич	Тагоев Сафовидин Асоевич	Tagoev Safovidin Asoevich
н.и.т., доцент	к.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: safovidin.tagoev@yandex.ru		