

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования «Национальный исследовательский**  
**технологический университет «МИСИС»**

---

**Землянский Григорий Сергеевич**

**ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ**  
**ПИРИТОСОДЕРЖАЩИХ РУД ПОЛЯМИ**  
**СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ**  
**ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ РУДОПОДГОТОВКИ**

Специальность: 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

**Автореферат диссертации**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой ФизГео

**Винников Владимир Александрович**

Москва – 2025

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Известно, что рудополготовка является ключевым элементом всего процесса добычи и переработки полезных ископаемых. Именно этот этап горного производства определяет эффективность всей производственной цепочки. Совершенствование процессов рудоподготовки сопряжено с необходимостью создания новых высокотехнологичных производств и модернизации существующих мощностей горноперерабатывающих предприятий посредством применения прогрессивных технологий переработки руд.

Традиционно применяемый на этапе дробления-измельчения механический способ разрушения руды в отсутствие эффективной предварительной обработки не приводит к росту раскрытия сростков, значительному переизмельчению рудных включений (что не всегда выгодно на последующих этапах переработки), высоким энергетическим потерям и высокой себестоимости конечного продукта. Вопросы, касающиеся данной проблемы, встают особенно остро на фоне постепенной выработки запасов крупных месторождений и снижения доли руд с высоким содержанием полезных компонентов.

Одним из способов достижения высокого уровня селективной дезинтеграции при рудоподготовке является применение в рабочем процессе электромагнитного излучения, обеспечивающего разупрочнение дробимого материала. Установлено, что предварительная обработка руды электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона (далее - СВЧ) может в значительной степени повлиять на снижение энергоёмкости её измельчения и, в конечном итоге, повышение выхода конечного продукта.

В настоящее время СВЧ технологии не нашли широкого применения в горной индустрии. Помимо относительно высокой затратности самой процедуры облучения, важной причиной является недостаточная изученность некоторых аспектов воздействия электромагнитной энергии СВЧ диапазона на горные породы. В частности, на сегодняшний день в литературе нет данных о степени влияния исходных характеристик руд на результаты СВЧ воздействия. В центре внимания большинства опубликованных исследований - оценка результативности различных режимов облучения в отношении типичной (с точки зрения характеристик) руды конкретного месторождения, не предполагающая поиск причин такого поведения. Кроме того, не существует общепринятой методики оценки результативности СВЧ-воздействия на металлосодержащие руды.

В связи со всем вышесказанным, изучение поведения

металлосодержащих руд в процессе их обработки полями сверхвысокой частоты на сегодняшний день является актуальной научной задачей.

**Целью работы** является обоснование оптимальных режимов обработки пиритосодержащих руд полями сверхвысокочастотного диапазона для повышения эффективности процессов рудоподготовки.

**Идея работы** состоит в использовании полученных закономерностей поведения пиритосодержащих руд в СВЧ-полях для определения оптимального времени обработки, позволяющего снизить энергоемкость их последующего разрушения.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ и систематизацию существующих технологических решений в области разрушения металлосодержащих руд, использующих СВЧ-воздействие, и оценить перспективность их применения в будущем.

2. Исследовать закономерности изменения температуры образцов пиритосодержащей руды, отличающихся по крупности зерен и содержанию полезного компонента, в зависимости от времени СВЧ-обработки.

3. Провести качественную и количественную оценку изменений внутренней структуры минералов, слагающих подверженные СВЧ-воздействию образцы руды, и выявить временные закономерности их изменения.

4. Разработать способ определения оптимального времени СВЧ-обработки образцов конкретных руд.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально подтвержден эффект проявления кратковременной стабилизации температуры зерен пирита при нагревании в СВЧ-полях и выявлены закономерности его наступления в зависимости от крупности зерен и их содержания.

2. Установлено резкое повышение плотности дислокаций в зернах пирита на этапе стабилизации их температуры, причем значения этой плотности увеличиваются с ростом диаметра зерен пирита и их процентного содержания, а при дальнейшем нагреве, сопровождающемся ростом температуры образца, снижаются.

3. Установлено снижение динамического модуля упругости образцов пиритовой руды на этапе стабилизации температуры зерен пирита при их СВЧ-нагреве, что может служить основой для определения оптимального с точки зрения последующей дезинтеграции времени СВЧ-воздействия на пиритовую руду по времени окончания этапа стабилизации.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются** использованием при проведении

экспериментальных исследований аппаратного обеспечения с высокими метрологическими характеристиками и апробированного программного обеспечения; непротиворечивостью полученных в ходе экспериментов данных законам физики, теории прочности, а также данным, опубликованными в научной литературе; минимизацией количества факторов, способных повлиять на результаты экспериментов, достигнутой за счёт их проведения на одном и том же оборудовании, при температурах, исключающих возможность фазовых переходов, а также за счёт подбора образцов с минимальным набором слагающих минералов и нулевым влагосодержанием.

**Новизна работы заключается в:**

- обнаружении особенности роста температуры пиритосодержащих руд при нагреве в СВЧ полях, проявляющейся в появлении на начальных этапах нагрева временного интервала, в течение которого с увеличением продолжительности СВЧ облучения не происходит роста температуры зерен пирита;
- обнаружении факта структурных изменений кристаллической решётки пирита, сопровождающихся выходом избытка энергии через образованные дислокации на участке стабилизации температуры зерен пирита при СВЧ-воздействии.

**Методы исследований** включали анализ и обобщение данных литературных источников; экспериментальные лабораторные исследования поведения образцов пиритосодержащих руд в СВЧ-полях, а также влияющих на этот процесс факторов.

**Научное значение работы** состоит в обосновании нового подхода к определению оптимального времени СВЧ-воздействия на пиритосодержащие руды, основанном на анализе временной динамики изменения плотности дислокаций.

**Практическая значимость результатов исследования** заключается в определении оптимальных значений времен СВЧ-воздействия на пиритосодержащие руды в зависимости от содержания и крупности рудных зерен.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях: международном научном симпозиуме «Неделя горняка», Всероссийской научной конференции с международным участием «Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых в условиях больших глубин», научных семинарах кафедры «Физических процессов горного производства и геоконтроля» Горного института НИТУ МИСИС (Москва, 2023-2025 гг.).

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационного исследования могут быть применены на горноперерабатывающих предприятиях, рассматривающих электромагнитное излучение сверхвысокочастотного диапазона в качестве участка технологической цепочки рудоподготовки для улучшения качественных и количественных показателей получаемого металла, снижения энергозатратности процедуры обогащения, повышения КПД используемого на этапе дробления-измельчения технологического оборудования. Результаты диссертационной работы в части определения оптимального времени СВЧ-воздействия на пиритосодержащую руду по проявлению кратковременной стабилизации температуры минеральных зерен приняты к использованию при проведении лабораторных исследований в «Центре проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в том числе 2 – в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 110 страницах текста, включает 33 рисунка, 9 таблиц, список источников из 138 наименований и приложение.

**Благодарности.** Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю д. ф.-м. н., заведующему кафедрой ФизГео Винникову Владимиру Александровичу за активное участие в обсуждениях работы, методологическую поддержку и квалифицированное наставничество, д.т.н., профессору Черепецкой Елене Борисовне за ценные советы по части ультразвуковых исследований, д.т.н., профессору Вознесенскому Александру Сергеевичу и д.т.н., профессору Николенко Петру Владимировичу за конструктивную критику на этапе агрегации работы, а также ведущему инженеру учебной лаборатории кафедры ФизГео НИТУ «МИСИС» Дидович Людмиле Яковлевне за помощь при проведении рентгеновских исследований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе представлен** анализ существующих технологических решений в области разрушения металлосодержащих руд, использующих СВЧ-воздействие. Развитию направления разрушения горных пород с применением СВЧ-воздействия в значительной степени способствовали работы в области электрофизических методов и физики горных пород В.Ж. Аренса, Э.И. Арша, Г.И. Бабата, Л.М. Блинова, А.В. Варзина, В.М. Веремьева, Г.К. Виторта, А.А. Воробьева, О.М. Гридина, С.А. Гончарова, А.П. Дмитриева, В.Б. Добря-

цова, А.В. Долголаптева, Ю.Н. Захарова, Ю.И. Зецера, В.Д. Ицхакина, И.И. Каляцкого, Р.Ш. Килькеева, В.Ф. Клятченко, В.С. Кравченко, Н.Е. Коваленко, С.С. Красновского, В.И. Лойка, Г.В. Лукьянова, И.В. Ляшенко, А.Н. Москалева, М.Г. Менжулина, Ю.М. Мисника, Л.Б. Некрасова, А.В. Нетушила, Г.Я. Новика, А.П. Образцова, Н.В. Перова, Ю.И. Протасова, В.В. Ржевского, Л.Э. Рекинглаза, Н.И. Рябеца, В.М. Семенова, А.С. Сироты, Р.М. Султаналиевой, К.Т. Тажибаева, М.П. Тонконогова, В.В. Устинова, В.А. Хоминского, Г.Х. Хчяна, А.Т. Чепикова, О.Н. Шонина, Е.Ф. Элштейна, О.В. Явтушенко, В.С. Ямщикова и др.

Показана перспективность применения энергии СВЧ-диапазона с точки зрения способности влиять на физико-механические свойства пород и руд. Проведен анализ и систематизация существующих технологических решений в области разрушения металлосодержащих руд, использующих СВЧ-воздействие. Дан обзор существующих методов оценки эффективности СВЧ-воздействия на горные породы, при этом отмечено, что репрезентативность этих методов невысока в силу неодинаковости подвергаемых исследованиям проб.

Отмечено, что СВЧ-технология пока не нашла широкого применения в горном деле главным образом ввиду высокой затратности СВЧ-воздействия.

Все вышесказанное ещё раз подтвердило актуальность выбранной темы, цели и задач исследования, решение которых призвано способствовать удешевлению процесса рудоподготовки и повышению качественных и количественных характеристик получаемого на выходе продукта, а также дало возможность сформулировать цели исследования.

**Во второй главе** представлена информация об экспериментальных исследованиях изменения температуры зерен пирита в СВЧ-полях.

Для экспериментов были изготовлены образцы в виде распиленных по диаметру спилов кернов кварцево-пиритовой породы диаметром 62 мм и толщиной 5-6 мм. Минеральный состав исследуемых образцов на 99% состоял из пирита и кварца в различных пропорциях, поэтому влияние различных аксессуарных минералов на результаты исследований было минимальным. С целью получения максимально четкого очертания минеральных зерен несколько десятков образцов руды было отшлифовано и затем при одинаковых условиях отснято на 48-мегапиксельную широкоугольную камеру Quad Bayer (фокусное расстояние  $f/1.79$ ; размер пикселя 1,6 мкм) с двух сторон. Снимки (рис. 1а) были использованы для проведения микроанализа в программном продукте анализа и обработки изображений с открытым кодом ImageJ.

Анализ гранулометрического состава зерен образцов включал в себя

работу с:

- масштабом, позволяющим перейти от пикселей к натуральным размерам;
- фильтрами для удаления посторонних шумов;
- пороговыми значениями оттенков, насыщенности и яркости через функцию `colorthreshold` для выделения зерен пирита и оценки занимаемой ими суммарной площади;
- геометрическими характеристиками выделяемых зерен для определения эквивалентного диаметра включений пирита, нахождения среднего для образца эквивалентного диаметра и ранжирования образцов относительно этого показателя.

Процентное содержание пирита определялось по двум сторонам образца как среднее значение отношения суммарной площади частиц пирита к площади стороны. Определение крупности пиритовых включений осуществлялось через расчёт эквивалентного диаметра каждого вкрапления и оценки доли таких вкраплений в общем объёме пирита.

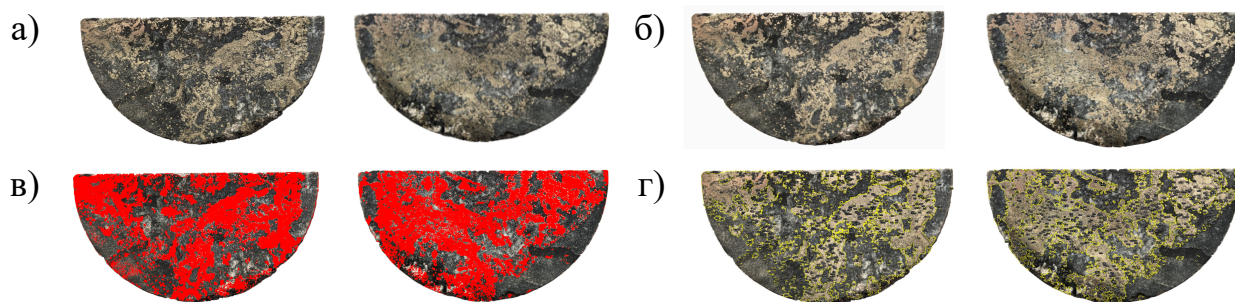


Рисунок 1 – Микроструктурный анализ двух сторон образца №2 в ImageJ:

а – исходный снимок отшлифованного образца; б – отфильтрованное изображение образца; в – изображение образца при определении общей площади (содержания) пирита; г – изображение образца при подсчёте площадей отдельных зёрен для определения их эквивалентных диаметров

Затем для каждой стороны образца проводилось ранжирование зёрен относительно их эквивалентного диаметра, определялась доля зёрен с тем или иным диаметром в общем количестве вкраплений пирита. Все это делалось для определения средневзвешенного значения эквивалентного диаметра зёрен пирита в образце (рис. 2).

На основе результатов микроанализа для экспериментов было отобрано восемь представительных образцов, отличающихся между собой содержанием и средневзвешенным значением эквивалентного диаметра зерен пирита (табл. 1). Два наиболее тонких образца были использованы для ультразвуковых исследований, остальные – для рентгеновских.

Таблица 1 – Результаты микроструктурного анализа образцов

Образцы предназначены для:	рентгеновской дифрактометрии						ультразвуковой дефектоскопии	
Порядковый номер образца	2	4	6	12	18	24	3	5
Средневзвешенное значение эквивалентного диаметра зерен пирита, мм	5,8	1,9	11,4	2,2	3,9	2,1	2,8	3,9
Содержание пирита, %	35,4	17,4	54,1	21,8	19,9	24,1	22,3	31,6

Нагрев образцов производился в СВЧ печи «Электроника» при мощности излучения 1300 Вт и частоте 2450 МГц. Образец помещался в фиксированную точку керамической подложки, установленной на дне печи, печь включалась на заданный промежуток времени (первый – 15 с), и в момент выключения СВЧ-излучения производилось измерение температуры высокотемпературным пирометром DT-8868H (коэффициент излучения 0,8, режим фиксации максимальной температуры), при этом луч пирометра направлялся на одно и то же зерно (конгломерат зерен) пирита. После естественного остывания образца до комнатной температуры процесс измерений повторялся с увеличением времени СВЧ-воздействия на 15 с относительно предыдущего временного интервала до значения 135 с. При каждом испытании в печь помещалась кювета с 500 мл воды изначально комнатной температуры.

В результате были построены временные зависимости температуры пиритных зерен в различных образцах, представленные на рис. 2.

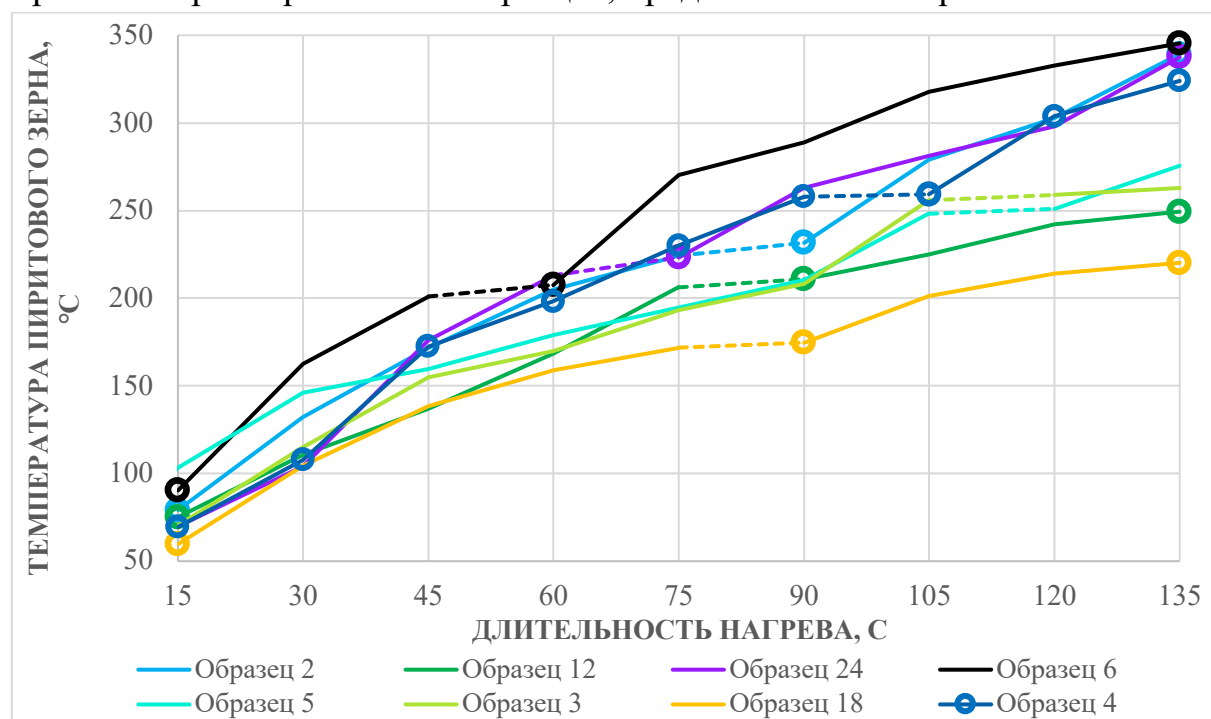


Рисунок 2 – Временные зависимости температуры зерен пирита в различных образцах (пунктирной линией показаны участки стабилизации температуры, кружками – точки, в которых производилась рентгеновская дифрактометрия остывшего образца)



Анализ построенных зависимостей позволил установить, что во всех испытаниях обнаружены участки кратковременной стабилизации температуры зерен пирита (показанные на рис. 2 пунктиром). Вместе с тем, подобных участков в зернах кварца при тех же временах нагрева не наблюдалось (см. температурную зависимость рис. 3).

Перед первым нагревом, на этапе резкого замедления роста температуры и по окончании всего цикла работ выполнялась съемка рентгенограмм (отмечены кружками на рис. 2). Величина прироста температуры зерна пирита, определяемая по отношению к значению, полученному на предыдущей итерации нагрева, составлявшая менее 5 %, являлась маркером наступления режима стабилизации температуры и необходимости съёмки рентгенограммы. Съёмка спектра осуществлялась на компьютеризированном аппарате ADP2 – 01 с использованием Fe K $\alpha$  излучения в следующем режиме: длина волны – 1,93597 Å; число точек для сглаживания – 7; степень полинома фона – 4; порог чувствительности – 3,0 sigma; ширина основания пиков – 3,0 ПШПВ; ПШПВ, град. – 0,120; асимметрия – 1,00; фактор формы – 0,60.

При съёмках каждый образец помещался в аппарат одной и той же стороной, съёмка производилась с вращением образца. Один из отобранных образцов (образец №4) подвергался съёмке спектра после каждого нагрева, что при последующей обработке результатов дало возможность отследить изменения структуры образца на каждой итерации СВЧ облучения.

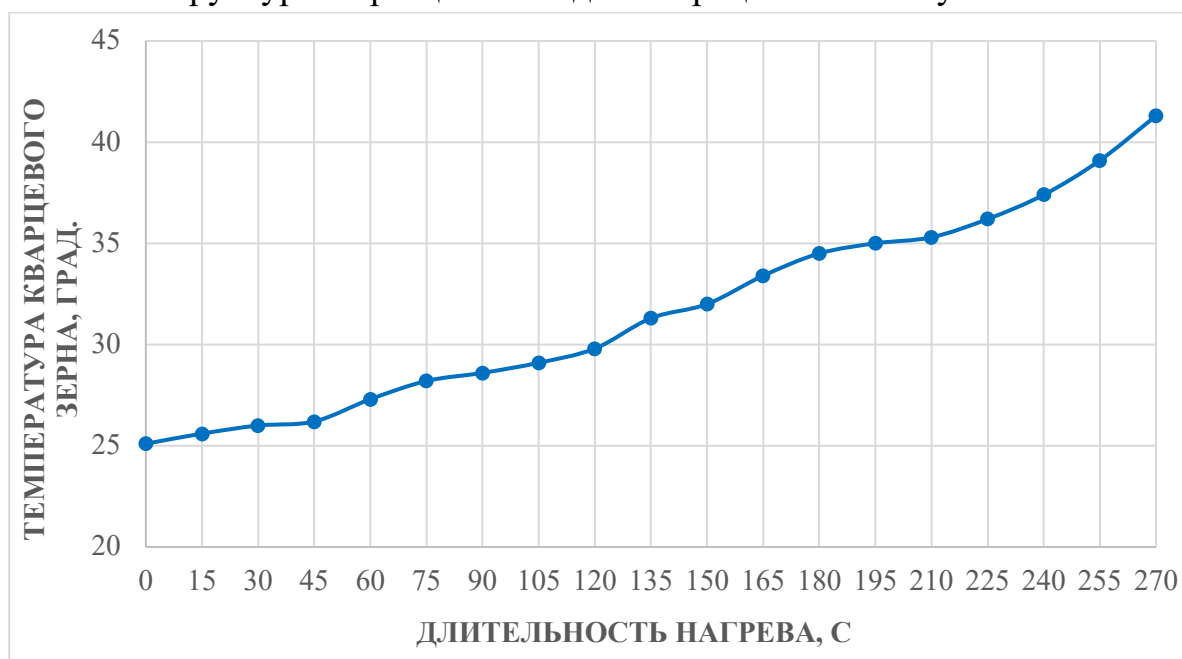


Рисунок 3 – Временная зависимость температуры зерен кварца

По результатам экспериментов были построены корреляционные взаимосвязи между временем стабилизации температуры и содержанием и эквивалентным диаметром зерен пирита, с достаточной степенью

достоверности показывающие линейный характер (рис. 4).

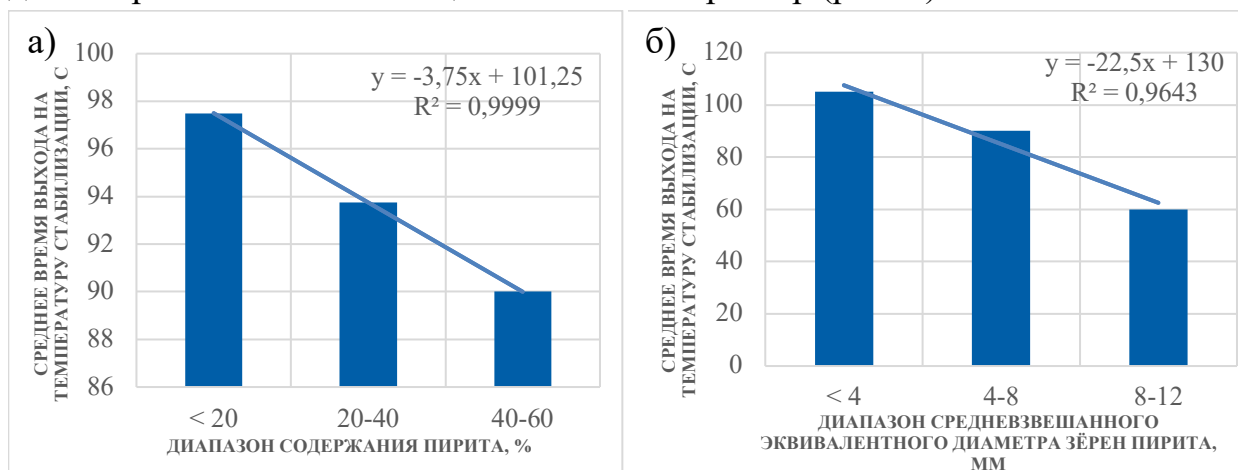


Рисунок 4 – Корреляционные взаимосвязи времени достижения стабилизации температуры зерен пирита с его содержанием (а) и крупностью зёрен (б)

Исходя из гистограмм, представленных на рисунке 4, в образцах с бóльшим содержанием и бóльшим значением крупности зёрен пирита температура стабилизируется быстрее.

Представленные во второй главе исследования позволили сформулировать первое научное положение: «Экспериментально подтвержден эффект проявления кратковременной стабилизации температуры зерен пирита при нагревании в СВЧ-полях и выявлены закономерности его наступления в зависимости от крупности зерен и их содержания».

**В третьей главе** представлены результаты рентгеновской дифрактометрии, выполненные для шести исследуемых образцов после достижения температур, показанных кружками на рис. 2.

Исходными данными для расчетов являлись определенные по рентгенограммам по каждому пику каждого замера величины: углы  $Q$  отражения рентгеновских лучей от атомных плоскостей ( $hkl$ ) (углы Вульфа-Брегга), межплоскостные расстояния  $d$ , интенсивности  $I$  и полуширины пиков  $B$ .

Для дальнейших расчетов были выбраны пары плоскостей атомной решетки, характеризующиеся высокой интенсивностью. Знание этих величин позволило рассчитать величину плотности дислокаций  $\rho$ , которая физически представляет собой суммарную длину линейных дефектов кристаллической решётки типа обрыва или сдвига атомных плоскостей, отнесенную к объему кристалла:

$$\rho = \frac{\sum L}{V}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность дислокаций,  $\text{\AA}^{-2}$ ;  
 $L$  – длина дислокации,  $\text{\AA}$ ;

$V$  – объём кристалла,  $\text{\AA}^3$ .

Расчёт плотности дислокации проводился по формулам 2 – 5 в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) Определялось физическое уширение пика:

$$\beta = \sqrt{B^2 - b_{\text{эт}}^2} \cdot 1,0908 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

где  $\beta$  – физическое уширение пика, рад;

$B$  – полуширина пика изучаемого минерала;

$b_{\text{эт}}$  – эталонная полуширина пика изучаемого минерала.

- 2) Рассчитывалась величина модуля упругости (для случая кубической сингонии, характерной для пирита):

$$E^{-1} = S_{11} - (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{44}) \cdot \frac{(k^2 \cdot l^2 + l^2 \cdot h^2 + h^2 \cdot k^2)}{(h^2 + k^2 + l^2)^2} \quad (3)$$

где  $E$  – Модуль упругости, ГПа;

$S_{11}, S_{12}, S_{44}$  – коэффициенты упругости пирита,  $\text{ГПа}^{-1}$  (табличные данные);

$h, k, l$  – индексы плоскости.

- 3) Вычислялся размер блока

$$D = \frac{\lambda \cdot \left( \frac{\sin Q_2}{\sin Q_1} - \frac{E_2}{E_1} \right)}{\beta_1 \cdot \cos Q_1 \cdot \frac{\sin Q_2}{\sin Q_1} - \beta_2 \cdot \cos Q_2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \quad (4)$$

где  $D$  – размер блока матрицы,  $\text{\AA}$ ;

$\lambda$  – длина волны,  $\text{\AA}$ ;

$\beta_1, \beta_2$  – физическое уширение пика (для 1 и 2 плоскости с известными индексами  $hkl$ );

$Q_1, Q_2$  – угол Вульфа-Брегга отражения рентгеновских лучей от атомных плоскостей (для 1 и 2 плоскости с известными индексами  $hkl$ ), рад;

$E_1, E_2$  – модуль упругости (для 1 и 2 плоскости с известными индексами  $hkl$ ), Па.

- 4) Рассчитывалась плотность дислокации

$$\rho = \frac{3 \cdot n}{D^2} \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность дислокации,  $\text{\AA}^{-2}$ ;

$n$  – число дислокаций на границе блока мозаики (при хаотическом распределении дислокаций  $n = 1$ );  
 $D$  – размер блока матрицы,  $A$ .

Результаты расчетов сведены в таблицу 2 и представлены на рисунках 5-6.

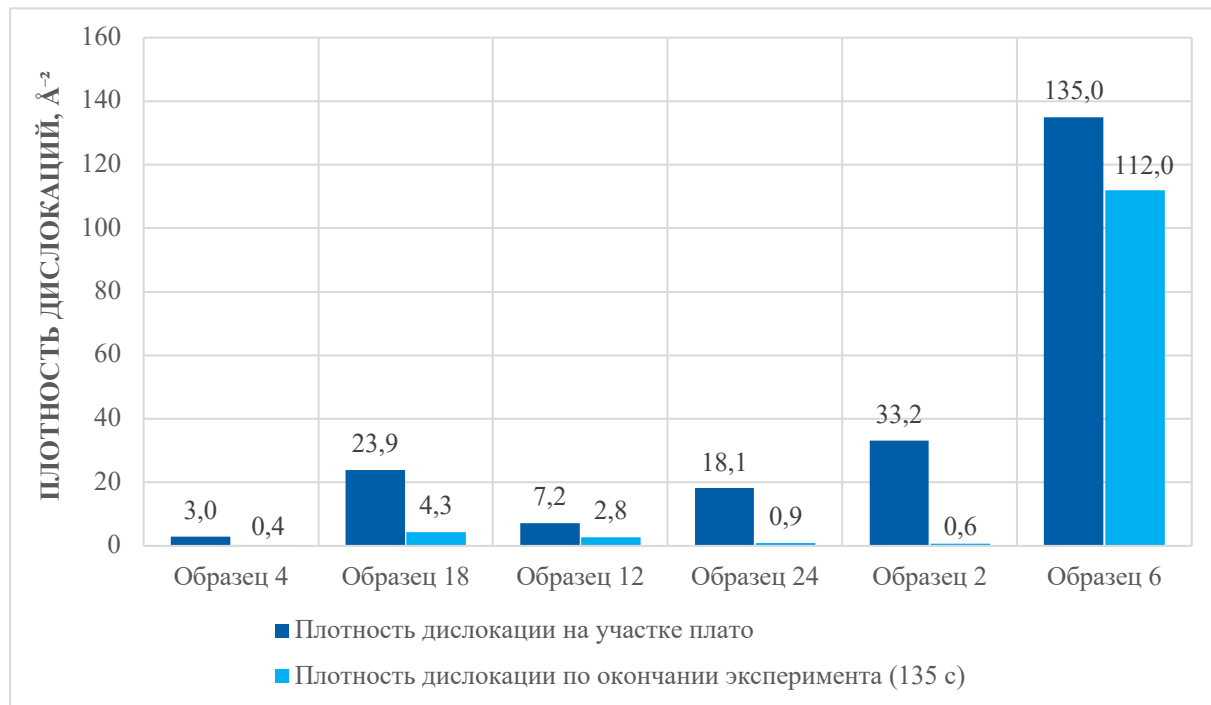


Рисунок 5 - Величина плотности дислокаций образцов в период стабилизации температуры и на момент окончания эксперимента

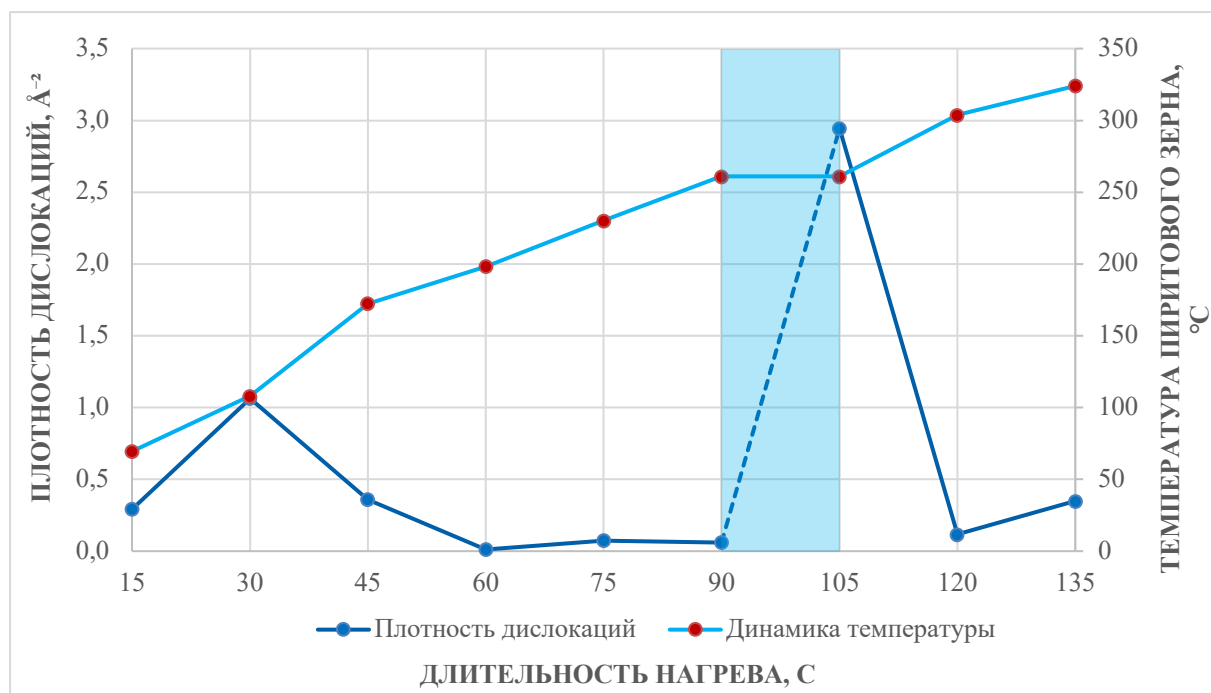


Рисунок 6 – Динамика изменения плотности дислокаций образца 4 при нагреве в СВЧ-печи

Таблица 2 – Исходные данные и результаты расчетов значений плотностей дислокаций в зернах пирита

№ образца	Параметры	Временная отметка		
		0 с	Окончание этапа стабилизации температуры зерен пирита	135 с
6	$h_1k_1l_1/h_2k_2l_2$	-202/112		
	$Q_1/Q_2, \text{град}$	60,75/51,92	60,71/51,88	60,69/51,88
	$B_1/B_2$	0,36/0,45	0,33/0,35	0,69/0,36
	$\beta_1/\beta_2, 10^{-5}$	-	1,51/3,14	1,64/3,05
	$E_1/E_2$	21,50/21,50		
	$D, \text{\AA}$	-	14903	16312
	$\rho, \text{\AA}^{-2}$	-	135,07	112,74
12	$h_1k_1l_1/h_2k_2l_2$	021/113		
	$Q_1/Q_2, \text{град}$	47,09/72,70	47,07/72,68	47,01/72,63
	$B_1/B_2$	0,44/0,34	0,43/0,34	0,46/0,37
	$\beta_1/\beta_2, 10^{-5}$	-	1,16/0,45	1,12/1,47
	$E_1/E_2$	26,18/26,33		
	$D, \text{\AA}$	-	64547	103478
	$\rho, \text{\AA}^{-2}$	-	7,2	2,8
24	$h_1k_1l_1/h_2k_2l_2$	0,21/113		
	$Q_1/Q_2, \text{град}$	47,13/72,70	47,07/72,65	47,11/72,67
	$B_1/B_2$	0,44/0,35	0,41/0,35	0,44/0
	$\beta_1/\beta_2, 10^{-5}$	-	1,78/0,53	0,45/0,29
	$E_1/E_2$	26,18/26,33		
	$D, \text{\AA}$	-	40669	185956
	$\rho, \text{\AA}^{-2}$	-	18,14	0,88
18	$h_1k_1l_1/h_2k_2l_2$	021/113		
	$Q_1/Q_2, \text{град}$	47,05/72,64	47,07/72,68	47,03/72,63
	$B_1/B_2$	0,39/0,37	0,35/0,37	0,41/0,36
	$\beta_1/\beta_2, 10^{-5}$	-	1,96/0,38	1,11/1,00
	$E_1/E_2$	26,18/26,33		
	$D, \text{\AA}$	-	35432	83530
	$\rho, \text{\AA}^{-2}$	-	23,90	4,30

Продолжение табл. 2

2	$h_1k_1l_1/h_2k_2l_2$	021/113		
	$Q_1/Q_2, \text{ град}$	47,12/72,73	47,07/72,68	47,10/72,68
	$B_1/B_2$	0,35/0,38	0,19/0,24	0,34/0,33
	$\beta_1/\beta_2, 10^{-5}$	-	3,22/31,40	0,95/1,91
	$E_1/E_2$	33,24/0,64		
	$D, \text{ \AA}$	-	30040	216497
	$\rho, \text{ \AA}^{-2}$	-	33,24	0,64
4	$h_1k_1l_1/h_2k_2l_2$	200/113		
	$Q_1/Q_2, \text{ град}$	41,85/72,68	41,90/72,71	41,89/72,71
	$B_1/B_2$	0,32/0,35	0,29/0,31	0,32/0,34
	$\beta_1/\beta_2, 10^{-5}$	-	1,57/1,72	0,62/0,95
	$E_1/E_2$	34,50/26,33		
	$D, \text{ \AA}$	-	100978	292950
	$\rho, \text{ \AA}^{-2}$	-	2,94	0,35

Как видно из рисунка 6, в образце № 4 изменение величины плотности дислокаций в зернах пирита имеет сложный характер, но очевиден ее резкий рост в районе 90-й – 105-й секунд прогрева (в этот промежуток времени температура зерен пирита достигает 259°C, что соответствует участку ее стабилизации). Следует отметить, что до участка температурной стабилизации», а также сразу после него, наблюдается весьма низкое значение плотности дислокации. По всей видимости, именно резким возрастанием величины плотности дислокаций и объясняется температурная стабилизация. Такие же закономерности наблюдались и в остальных образцах.

На рисунках 7-8 представлены зависимости величины плотности дислокаций в зернах пирита, вычисленные после нагрева до периода стабилизации температуры зерна, от процентного содержания пирита и диаметра зерен.

Из этих рисунков видно, что экстремальное значение плотности дислокаций в зернах пирита, рассчитанное на участке стабилизации их температуры, линейно растет с увеличением среднего эквивалентного диаметра зерен пирита и их процентного содержания.

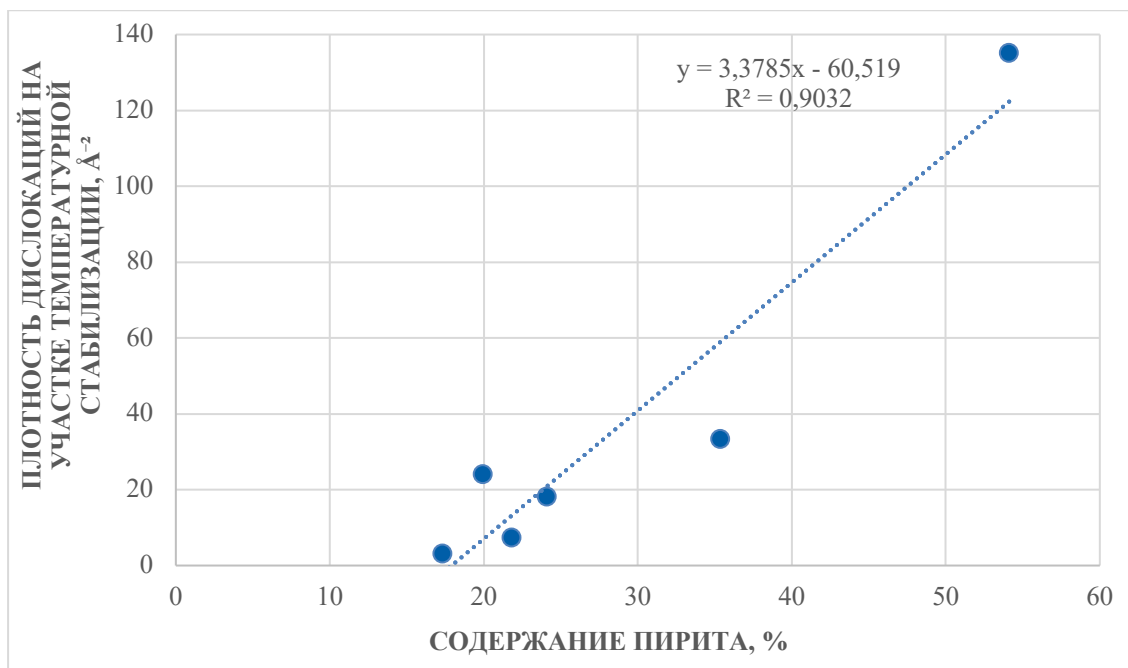


Рисунок 7 – Зависимость плотности дислокаций в период «температурной стабилизации» от процентного содержания пирита

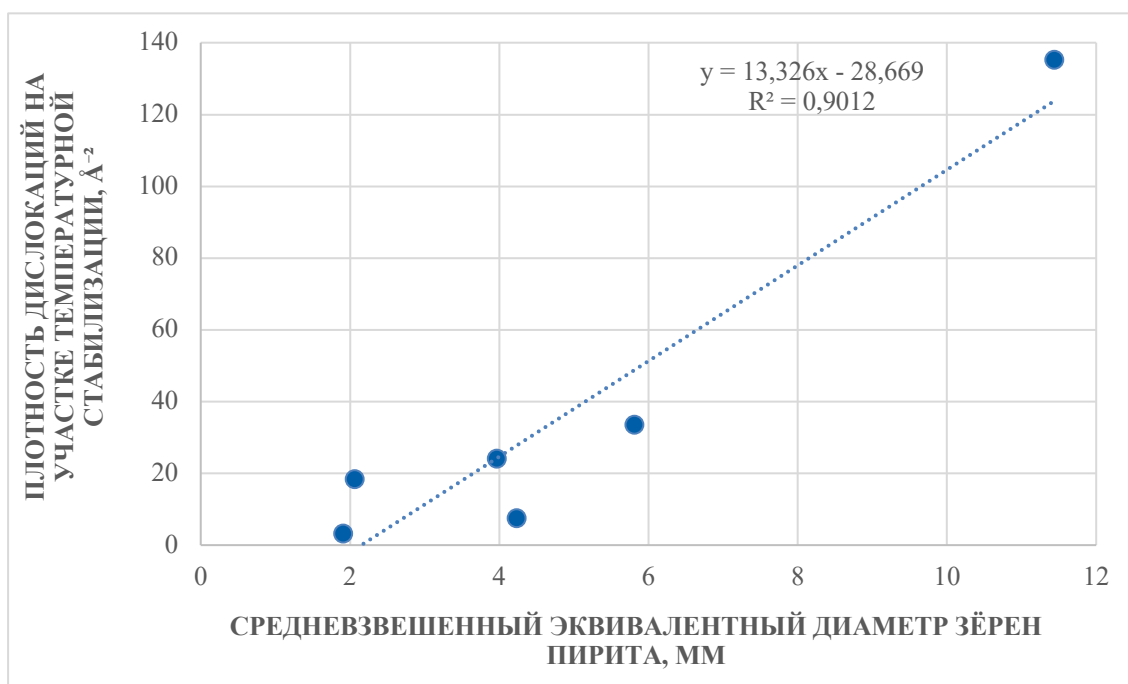


Рисунок 8 – Зависимость плотности дислокации в период «температурной стабилизации» от диаметра зёрен пирита

Проведенные исследования предполагали съемку дифрактограмм всех образцов после достижения температурной стабилизации зерен пирита и по окончании эксперимента (после 135 с воздействия СВЧ), что позволило рассчитать величины плотности дислокаций в этих точках. По вычисленным величинам была определена средняя скорость снижения величины плотности

дислокаций (разность вычисленных значений, отнесенная к величине временного промежутка), зависимость которой от содержания пирита в образце и средневзвешенного эквивалентного диаметра зерен пирита представлена на рисунке 9.

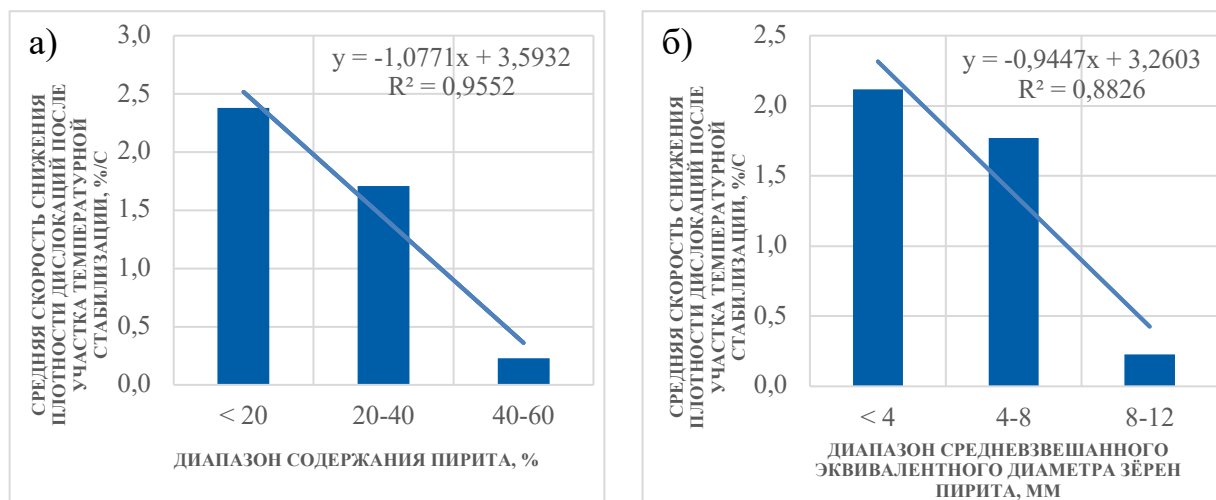


Рисунок 9 – Зависимость скорости снижения плотности дислокации после температурной стабилизации от содержания (а) и диаметра зёрен пирита

Анализ вышеприведённых зависимостей даёт основание утверждать, что в образцах с более крупными включениями пирита и большим его содержанием снижение плотности дислокации менее ощутимо, чем в остальных образцах. Эффект проявляется сильнее с ростом эквивалентного диаметра и процентного содержания зёрен пирита.

Проведенные исследования позволили сформулировать второе научное положение: «установлено резкое повышение плотности дислокаций в зернах пирита на этапе стабилизации их температуры, причем значения этой плотности увеличиваются с ростом диаметра зерен пирита и их процентного содержания, а при дальнейшем нагреве, сопровождающемся ростом температуры образца, снижаются».

**В четвертой главе** представлены результаты исследования изменения динамического модуля упругости пирита от времени СВЧ-воздействия.

Динамический модуль упругости рассчитывался на основании замеров скоростей продольных и поперечных волн, определяемых с помощью лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М, работавшего в эхо-режиме. Методика расчета предполагает использование следующего алгоритма:

- 1) Определение скорости распространения продольной волны:



$$v_p = \frac{2h}{T_{p2} - T_{p1}} \quad (6)$$

где  $v_p$  – скорость распространения продольной волны, м/с;

$h$  – толщина образца, м;

$T_{p1}$  – время прихода первой продольной волны, с;

$T_{p2}$  – время прихода второй продольной волны, с.

2) Расчёт скорости распространения поперечной волны:

$$v_s = \frac{h}{(T_s - T_{p1}) + \frac{h}{v_p}} \quad (7)$$

где  $v_s$  – скорость распространения поперечной волны, м/с;

$h$  – толщина образца, м;

$T_s$  – время прихода сдвиговой волны, с;

$T_{p1}$  – время прихода первой продольной волны, с.

3) Расчёт динамического модуля упругости:

$$E = \rho v_s^2 \left( 3 - \frac{1}{\frac{v_L^2}{v_s^2} - 1} \right) \quad (8)$$

где  $\rho = 5000 \text{ кг/м}^3$  – плотность пирита.

Исследования проводились на образцах № 3 и № 5, их результаты представлены в таблице 3 и на рисунках 10 и 11.

Таблица 3 – Исходные данные и результаты расчета значений динамического модуля упругости

	Временная отметка									
	0 с	15 с	30 с	45 с	60 с	75 с	90 с	105 с	120 с	135 с
	Значения параметров образца 3									
$T_{p1}, \text{мс}$	6,20	6,19	6,20	6,27	6,32	6,38	6,15	6,39	6,49	6,43
$T_{p2}, \text{мкс}$	8,10	8,09	8,10	8,27	8,43	8,40	7,97	8,35	8,51	8,43
$T_s, \text{мкс}$	6,92	6,95	6,96	7,13	7,14	7,17	6,98	7,12	7,38	7,37
$v_p, \text{м/с}$	6709	6742	6709	6393	6057	6322	7037	6517	6347	6366
$v_s, \text{м/с}$	3813	3748	3725	3435	3400	3556	3687	3742	3370	3287
$E, \text{ГПа}$	183,42	179,31	177,20	153,01	146,80	160,40	178,21	175,62	148,05	142,46

Продолжение табл.3

	Значения параметров образца 5									
$T_{p1}, \text{мс}$	5,99	6,01	6,00	6,04	6,08	6,10	6,37	6,20	6,13	6,18
$T_{p2}, \text{мкс}$	7,68	7,71	7,70	7,79	7,85	7,88	8,12	7,68	7,98	8,02
$T_s, \text{мкс}$	6,59	6,65	6,62	6,67	6,71	6,74	7,02	6,96	6,78	6,88
$v_p, \text{м/с}$	6841	6791	6835	6643	6578	6530	6631	7817	6270	6313
$v_s, \text{м/с}$	4005	3874	3939	3867	3852	3813	3802	3840	3683	3598
$E, \text{ГПа}$	198,78	188,84	194,12	185,95	183,81	180,45	181,40	197,75	167,71	163,01

Из приведенных на рис. 10 и 11 графиков хорошо видно, что значения динамического модуля упругости образцов пиритосодержащей руды постепенно достигают максимума перед стабилизацией температуры зерен пирита, и резко снижаются до минимальных значений в период окончания температурной стабилизации. Такое поведение указывает на формирование нарушений внутри зёрен пирита и близлежащих участков, поскольку микродеформации приводят к уменьшению скоростей ультразвуковых волн.

Таким образом, характер изменения динамического модуля упругости образцов пиритосодержащей руды показывает его существенное снижение на этапе стабилизации температуры зерен пирита при их СВЧ-нагреве, что косвенно подтверждает факт резкого роста плотности дислокаций на этом же этапе, отмеченный в третьей главе. Все это позволяет определять оптимальное время СВЧ-воздействия на пиритовую руду по времени стабилизации температуры зерен пирита при их СВЧ-нагреве.

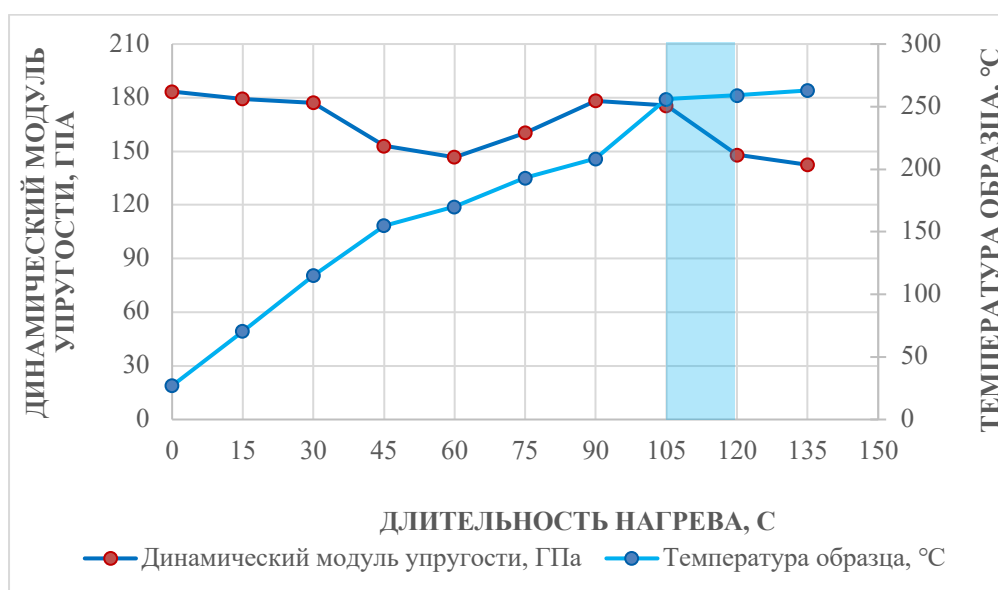


Рисунок 10 – Изменение значений динамического модуля упругости образца № 3 и температуры зерен пирита в зависимости от времени нагрева

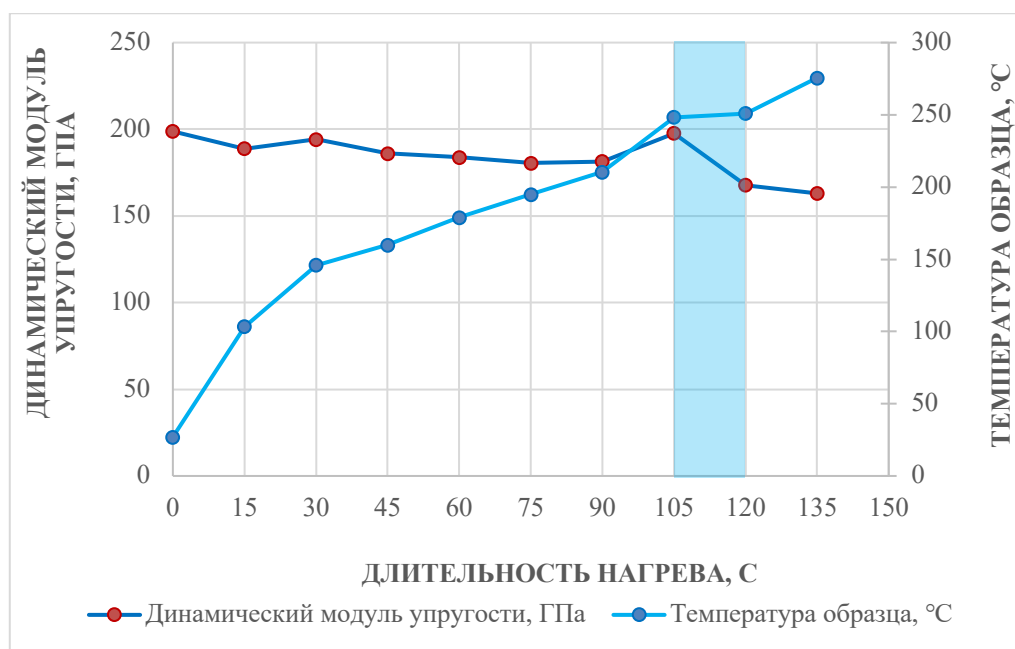


Рисунок 11 – Изменение значений динамического модуля упругости образца № 5 и температуры зерен пирита в зависимости от времени нагрева

Проведенные исследования позволили сформулировать третье научное положение: «установлено снижение динамического модуля упругости образцов пиритовой руды на этапе стабилизации температуры зерен пирита при их СВЧ-нагреве, что может служить основой для определения оптимального с точки зрения последующей дезинтеграции времени СВЧ-воздействия на пиритовую руду по времени окончания этапа стабилизации».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи обоснования оптимальных режимов обработки пиритосодержащих руд полями сверхвысокочастотного диапазона, что имеет существенное значение для повышения эффективности процессов рудоподготовки.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведен анализ существующих технологических решений в области разрушения металлосодержащих руд, использующих СВЧ-воздействие. Рассмотрены сильные стороны СВЧ-технологии воздействия на горные породы, а также факторы, сдерживающие её широкое внедрение.

2. Исследованы временные закономерности изменения температуры образцов пиритосодержащей руды при их СВЧ-нагреве, подтвержден эффект

проявления кратковременной стабилизации температуры зерен пирита при нагревании в СВЧ-полях и выявлены закономерности его наступления в зависимости от крупности зерен и их содержания.

3. Исследовано изменение внутренней структуры зерен пирита в зависимости от времени СВЧ-воздействия; установлен факт резкого повышения значений плотности дислокаций при стабилизации температуры зерен пирита; показано, что значения этой плотности увеличиваются с ростом диаметра зерен пирита и их процентного содержания.

4. Установлено, что динамический модуль упругости образцов пиритосодержащей руды постепенно достигает максимума перед стабилизацией температуры зерен пирита, и резко снижается до минимальных значений в период окончания температурной стабилизации, подтверждая существенные изменения в кристаллической решётке пирита.

5. Проведенные исследования позволили установить, что определять оптимальное время СВЧ-воздействия на пиритовую руду возможно по времени стабилизации температуры зерен пирита при их СВЧ-нагреве.

6. Результаты диссертационной работы в части определения оптимального времени СВЧ-воздействия на пиритосодержащую руду по проявлению кратковременной стабилизации температуры минеральных зерен приняты к использованию при проведении лабораторных исследований в «Центре проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН.

**Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:*

1. Винников В.А., Землянский Г.С. Исследование эффективности воздействия СВЧ-полей на пиритосодержащие руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 4. С. 22–32. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_4\_0\_22.

2. Землянский Г.С. Исследование изменения динамического модуля упругости пирита при СВЧ-воздействии по результатам лазерно-ультразвуковых испытаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 5 (специальный выпуск 8).

3. Винников В.А., Землянский Г.С. Исследование изменения величины плотности дислокаций в зернах пирита при его нагреве сверхвысокочастотным излучением // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 12-2. С. 42–51. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_12\_0\_42.

*В прочих изданиях*

4. Землянский Г.С. Исследование формирования нарушений сплошности металлсодержащих руд при электромагнитном облучении полями сверхвысокочастотного диапазона / Г. С. Землянский // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2024. Т. 1. С. 162-165. EDN AGIUTF.

5. Землянский Г.С. Определение оптимальной длительности микроволнового воздействия при обогащении металлсодержащих руд // Техника и технология современных производств: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 06–07 мая 2025 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. С. 147-151. EDN YASXXH.