

## **КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ**

**Липатов Никита Владимирович**

инженер лаборатории механических исследований ООО «Корэстет сервис», Тюменский государственный университет, РФ, г. Тюмень

**Аннотация.** Переходные термические напряжения имеют большое значение во многих приложениях, связанных с большими перепадами температуры. Диапазон применения – от области микроэлектронных процессов до геотермальных процессов.

Обычно тепловые проблемы, с которыми сталкиваются в области наук о Земле, связаны с сочетанием твердого и жидкого состояния, тогда как в других областях тепловые процессы имеют дело с микроскопически однородными структурами (например, при производстве механических устройств).

Изучение термического напряжения в однородной изотропной среде началось несколько десятилетий назад, и большинство проблем, возникающих в этой области, либо поддаются аналитическому решению, либо решаются с помощью подхода возмущений. Однако, если тело обладает анизотропными свойствами, более сложно предсказать температурное поле и напряжение; численный метод представляется наиболее подходящим методом выбора.

Данное исследование направлено на комплексную разработку в пористой среде, где были проведены эксперименты по описанию возникновения и распространения трещин с условием термического напряжения. Проведена серия лабораторных анализов для наблюдения за последующим компьютерным изображением различных случаев термического распределением трещин / трещин для напряжения на карбонатных породах.

Отсюда следуют задачи данного исследования:

1. определить, как тепловой удар влияет на проницаемость керна без трещин и трещиноватого керна;
2. выяснить, имеет ли тепловой удар тенденцию к увеличению процента улучшения проницаемости керна.

**Ключевые слова:** комплексное исследование; термическое напряжение.

### **Введение**

Нефтяные ресурсы продолжают доминировать в энергетическом секторе, и нет никаких признаков спада.

Однако запасы нефти сокращаются из-за меньшего количества открытий новых месторождений и увеличения уровня добычи. Очень важно точно определить запасы нефти, чтобы правильно спрогнозировать энергетический бюджет в будущем.

Наиболее часто методы описания течения жидкости в нефтяных коллекторах используют

постоянные свойства породы. Однако эти методы неприменимы к коллекторам, в которых свойства породы изменяются из-за изменения порового давления.

Общими характеристиками трещиноватых коллекторов являются чувствительность проницаемости и пористости к действующему напряжению.

Напряжение на месте само по себе может иметь механическое или термическое происхождение. Термическое напряжение может быть значительным в схемах термического повышения нефтеотдачи, таких как закачка холодной жидкости в горячий пласт во время заводнения или удаления сточных вод или даже во время гидравлического разрыва пласта.

К сожалению, наиболее часто встречающийся обзор литературы показывает, что исследования в этой области были сосредоточены в основном на термическом извлечении тяжелой нефти.

Однако было проведено немного исследований возникновения и распространения трещин под действием термического или механического напряжения.

Следовательно, данная статья посвящена исследованию развития и распространения трещин в карбонатных формациях под действием термического и механического напряжения.

Для изучения влияния термического напряжения на образование трещин карбоната была разработана серия экспериментов.

Были проведены лабораторные эксперименты по определению зависимости напряжения от деформации и зависимости от времени с учетом образования трещин и их распространения.

Компьютерный анализатор изображений использовался для наблюдения за распределением трещин / трещин для различных случаев термического напряжения на карбонатных породах.

### **Карбонатные образцы**

Образцы керна известняка были использованы для подготовки образцов керна для измерений пористости и проницаемости. В данном исследовании использовались керны двух типов: керны с трещинами и керны без трещин. Для анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа были получены небольшие образцы каждого керна, использованного в исследовании, до и после теплового удара. Образцы карбонатных пород были разрезаны на шесть небольших дисков диаметром 25 мм и толщиной 5 мм [4].

### **Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-7001F**

СЭМ использовался в этом исследовании для характеристики размера пор и структуры пор карбонатных образцов до и после теплового удара. СЭМ генерирует электронный пучок от электронной пушки.

Этот луч фокусируется и освещается на образце. Когда луч сканируется по поверхности образца в обоих направлениях X и Y, обнаруживаются вторичные электроны, рассеянные назад.

Усиление этих электронных сигналов и модуляция их яркости на электронно-лучевой трубке наблюдения дают изображение образца, отображаемое на электронно-лучевой трубке.

### **Экспериментальная процедура**

Пористость керна измерялась методом взвешивания, в то время как метод проницаемости для жидкости использовался для определения проницаемости керна.

Применять этот метод было несложно, он заключался в следующем:

- нагреть образец до требуемой температуры, чтобы убедиться, что весь образец (внутри и

снаружи) имеет необходимую температуру (в печи образцы находились примерно 24 часа);

- вода с температурой 30 °С;

- высушить образцы, а затем выполнить измерения проницаемости для жидкости с помощью прибора для определения проницаемости для жидкости.

### **Измерения напряжения и деформации**

Экспериментальное исследование влияния теплового удара на напряжение и деформацию известняка проводилось с использованием керна без трещин. Исследование было в основном сосредоточено на испытаниях на сжатие и растяжение. Были испытаны породы до и после тепловых ударов [2].

Микрофотографии образцов горных пород были получены до и после теплового удара с помощью ПО, чтобы исследовать и попытаться наблюдать возникновение любых микротрещин в результате теплового удара.

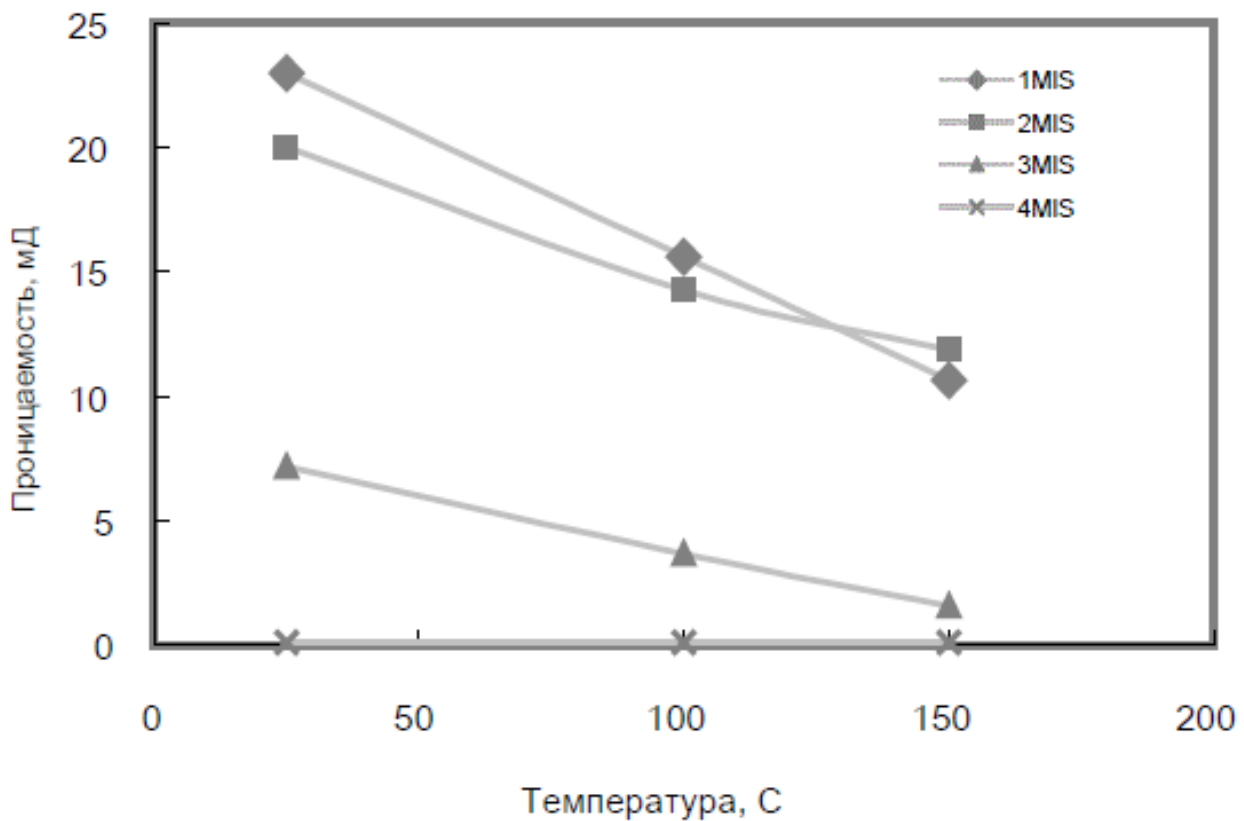
### **Результаты исследования**

Для проверки влияния теплового удара на проницаемость породы использовались два набора кернов. Первый набор состоит из четырех кернов без трещин 1MIS, 2MIS, 3MIS и 4MIS, имеющих следующую начальную проницаемость: 0,11; 7,17; 20 и 23,14 мД.

Для имитации температурного шока сердечники нагревали при 100 и 150 °С в течение 24 часов для достижения желаемой температуры.

Когда процесс нагрева достигал заданной температуры, образцы вынимали из печи и сразу же погружали в воду с температурой 5 °С. Измерения проницаемости кернов проводились на кернах, подвергшихся тепловому удару [1]. На рис. 1 показано влияние теплового удара на проницаемость керна без трещин. Из рис. 1 видно, что тепловой удар оказал негативное влияние на проницаемость керна без трещин. Наблюдалось снижение проницаемости керна 1MIS примерно на 50 % в результате теплового удара при 150 °С.

Тепловой удар вызывает усадку породы, что, по-видимому, приводит к повреждению каналов, соединяющих поры и отвечающих за проницаемость керна. При очень низкой проницаемости (0,11 мД) этого явления не происходило, как показано на рис. 1. Следовательно, повреждение керна без трещин из-за теплового удара зависит от проницаемости, а тепловой удар не влияет на очень плотную породу.



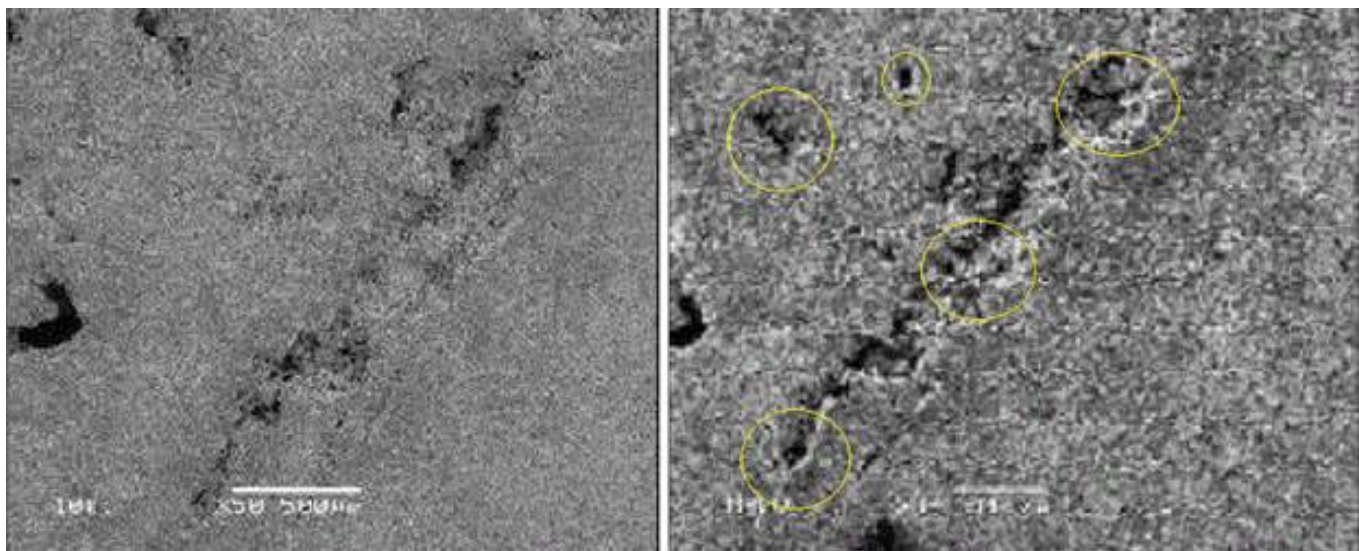
**Рисунок 1. Влияние теплового удара на проницаемость керн без трещин**

Второй набор состоит из образцов керн с трещинами. Процедуры теплового удара были повторены на образцах керн с трещинами при температурах 150 и 200 °С.

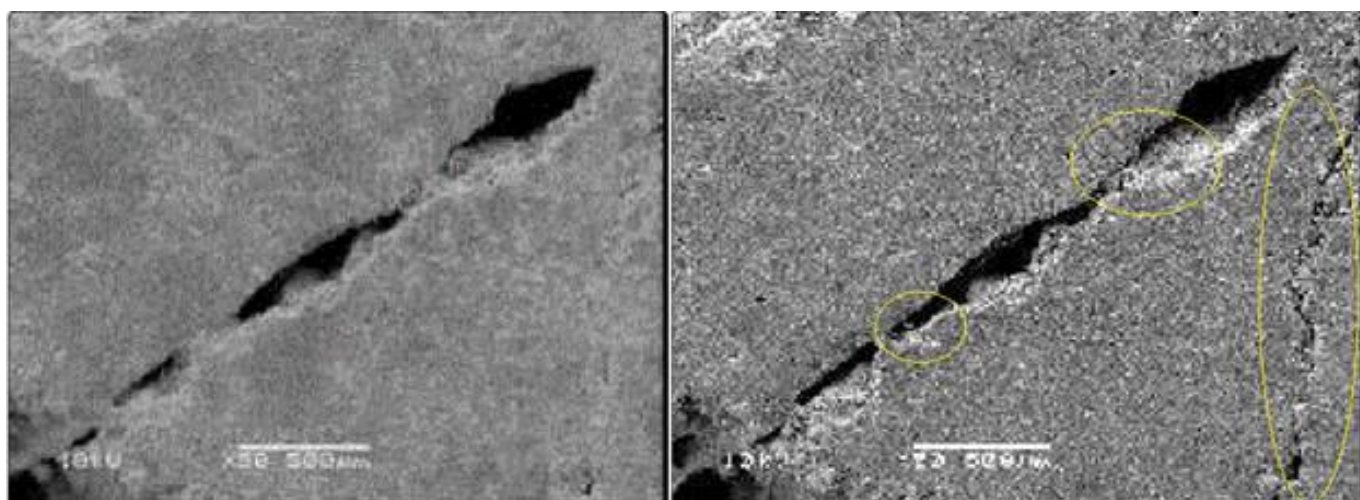
В этом случае тепловой удар оказывает положительное влияние на проницаемость керн с трещинами. Процент улучшения проницаемости керн с трещинами является функцией температуры [3].

Повышение температуры теплового удара имеет тенденцию к увеличению проницаемости керн с трещиноватым термоударом. Термоудар имеет тенденцию продлевать существование трещин, улучшая проницаемость трещиноватой породы.

Это явление подтверждено сделанными микрофотографиями исследуемых горных пород до и после термоударов. Рисунок 2 показывает трещиноватые породы до и после тепловых ударов при температуре 150 °С, а рис. 3 представляет тепловой удар при температуре 200 °С. Площади трещин для обеих систем до и после ударов измерялись с помощью компьютерного анализатора изображений [6]. Было получено значительное увеличение площади трещины после термической обработки, что подтверждает предыдущие выводы.



**Рисунок 2. Микрофотография трещины керна до теплового удара и после теплового удара ( $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )**



**Рисунок 3. Микрофотография образца керна до теплового удара и после теплового удара ( $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )**

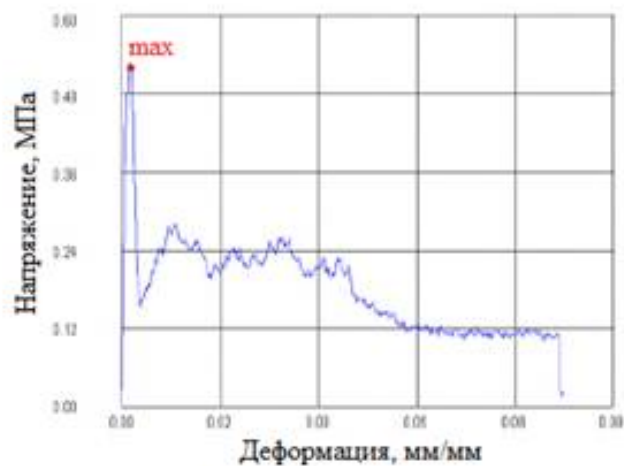
### **Напряжение и деформация термоударных пород**

Известняковые породы без трещин были использованы для исследования влияния тепловых ударов на напряжение и деформацию. На этом этапе проекта использовались карбонатные породы, имеющие разную пористость и проницаемость.

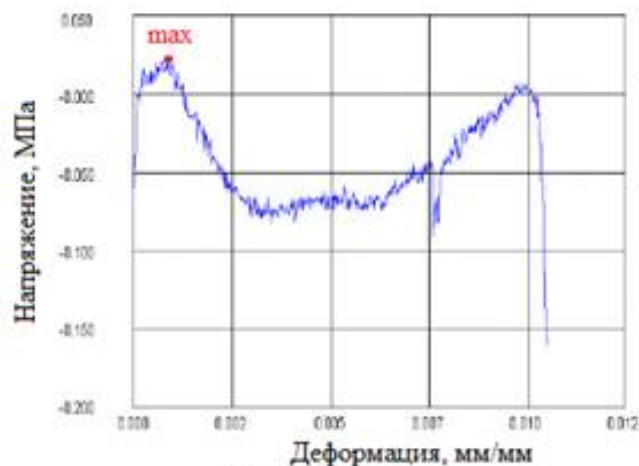
Первоначально испытания на сжатие отобранных кернов проводились до нагрева, после нагрева и после термоударов. Образцы нагревали до той же температуры  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Испытания на растяжение (напряжение по сравнению с деформацией) были выполнены на аналогичных образцах в различных условиях термической нагрузки -  $200$ ,  $250$  и  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты этих испытаний сравниваются с базовым случаем без теплового удара, показанным на рис. 4.

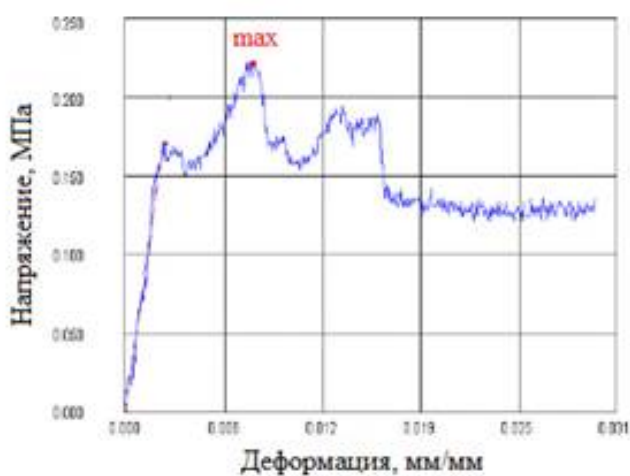
Снова тепловой удар уменьшил давление разрушения всех испытанных образцов, когда мы сравниваем их с базовым случаем.



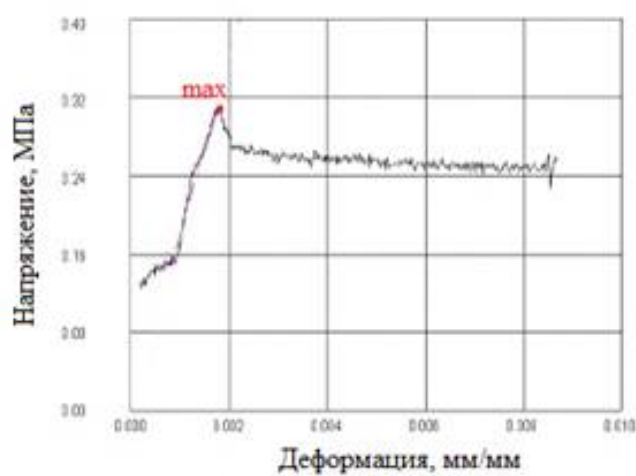
T = 25 ° C



T = 200 ° C



T = 250 ° C



T = 300 ° C

**Рисунок 4. Зависимость напряжения от деформации до и после тепловых ударов для разных температур**

### Выводы

Из этого исследования можно сделать следующие выводы.

1. Тепловой удар отрицательно влияет на проницаемость зерна без трещин.
2. Повреждение зерна без трещин из-за теплового удара является функцией проницаемости, кроме того, тепловой удар не повлиял на свойства плотности образцов.
3. Термоудар положительно влияет на проницаемость трещиноватого зерна.
4. Повышение температуры теплового удара имеет тенденцию к увеличению процента улучшения проницаемости зерна с трещиноватым термоударом.

### Список литературы:

1. Био М.А. Общие решения уравнений упругости и уплотнения пористого материала // App Phy. – 1956.

2. Болей Б.А., Вайнер Дж.Х. Теория термических напряжений. – Нью-Йорк : John Wiley & Sons, 1960.
3. Гассеми А., Тарасов С. Анализ распространения трещин под действием теплового напряжения в геотермальных резервуарах // Материалы Всемирного геотермального конгресса (Мельбурн, Австралия, 19–25 апреля 2015 г.).
4. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний.
5. Чан Ю.Т., Банерджи С. Анализ нестационарной трехмерной естественной конвекции в пористых средах // Теплопередача. – 1981.
6. Dusseault M.B., Simmons J.V. Изменения напряжения и ориентации трещин, вызванные закачкой // Канадский Геотек. – 1982.