

УДК 622.24

*Трепалин М.А.,  
студент второго курса магистратуры  
Уфимского государственного нефтяного технического университета*

*г. Уфа, Российская Федерация*

*Трушкин О.Б.,  
доцент, кандидат наук кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин»  
Горно-нефтяного факультета*

*Уфимского государственного нефтяного технического университета  
г. Уфа, Российская Федерация*

## **ОСНОВЫ ТЕОРИИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТА**

***Аннотация:** В данной статье рассматриваются вопросы основы теории и методов расчета теплопередачи в процессе твердения цемента. Предметом исследования является цементный камень, объектом – характеристики теплопередачи в процессе твердения цементного камня.*

***Ключевые слова:** Излучение, анализ, коэффициент, тепловые характеристики, цементный камень, твердый материал, теплопроводность, тепловое расширение, напряжения, конвекция.*

***Annotation:** This article discusses the basics of the theory and methods of calculating heat transfer in the cement hardening process. The subject of the study is cement stone, the object is the characteristics of heat transfer during the hardening of cement stone.*

***Keywords:** Radiation, analysis, coefficient, thermal characteristics, cement stone, solid material, thermal conductivity, thermal expansion, stresses, convection.*

Изучение естественных и искусственных тепловых полей в скважинах и окружающих их горных породах является объектом пристального изучения вследствие фундаментальной корреляции между состоянием ствола скважины и тепловыми характеристиками горных пород, цементного камня и т.д.

Естественные поля могут быть связаны с региональным (глубинным) тепловым полем Земли, а могут быть обусловлены и местными процессами, например, окислением сульфидных руд, радиоактивным распадом, растворением солей, притоком подземных вод или выделением газа в скважину.

Искусственные поля могут возникнуть под действием тепла бурового раствора, схватывающегося цементного камня или специальных скважинных нагревателей.

Передача тепла определяет обмен тепловой энергией и распределение температур, включая изменения, вызванные температурными градиентами.

Поток тепловой энергии делится на три процесса: излучение, теплопроводность и конвекция. Эти процессы могут происходить одновременно, независимо от их различных свойств. Проводимость включает в себя передачу тепла посредством возбуждения атомов. Конвекция включает в себя передачу тепла за счет движения молекул, вызванного перепадами температур. Однако излучение включает в себя передачу тепла с помощью электромагнитной энергии. Распространение тепла перемещающимися струями газа или жидкости называется конвекцией. При конвекции тепло переносит само вещество. Конвекция наблюдается только в жидкостях и газах. Распространение тепла от тёплого тела при помощи инфракрасных лучей называют тепловым излучением.

Излучение тепла и конвекция происходят через поры в пористой среде, но ограничены по интенсивности из-за ограниченного потенциала теплового потока. В твердых материалах наиболее доминирующим процессом

теплопередачи является теплопроводность, которая складывается из движения электронов и вибрации решетки [8].

В материалах на основе цемента теплопередача обычно происходит электронным способом, в то время как компонент теплового воздействия решетки, как правило, незначителен [7]. Происходит передача тепла через изоляционные материалы главным образом из-за колебаний решетки [9].

Соотношение между фононами или электронными механизмами определяется несколькими характеристиками, например, пористостью и распределением фаз, электронной и кристаллической структурой, температурой, размером частиц, уровнями примесей, а также химическим и фазовым составом [10, 11].

Математический анализ теплопроводности показывает, что тепловой поток пропорционален отрицательному температурному градиенту и теплопроводности, определяемым формулой Фурье закон [12].

Эффективная теплопроводность (т.е.  $\lambda_{\text{eff}}$ ) пористых материалов может быть определена путем замены локальной теплопроводности эффективным глобальным коэффициентом  $\lambda_{\text{eff}}$ , определяющим усредненную по пространству теплопередачу.

$\lambda_{\text{eff}}$  оценивает процесс теплопередачи, связанное не только с различными тепловыми характеристиками компонентов образца, но и связанное с порами, примесями и с другими источниками [13].

Существует строгое соотношение между термомеханическим процессом и температурным полем в материалах на основе бетона [14]. Температурные градиенты вызывают градиенты теплового расширения, в результате чего растягивающие напряжения перпендикулярны нагретой поверхности.

## **Аналитические методы теплопередачи и эффективной теплопроводности пористых материалов.**

Аналитические методы оценки эффективной теплопроводности с точки зрения пористости материала учитывают сочетание двух фаз: твердой и пористой. Эти методы не учитывают излучение и обозначают только теплопередачу внутри твердой и газовой фаз. Выбор подходящего метода зависит от формы пор, коэффициента пористости и других микроструктурных характеристик [13].

Далее описано несколько аналитических методов для пористых материалов с объемными долями пор от 0,65 до 1,00.

Отметим, что при всех прочих равных условиях в образцах, твердевших в естественных условиях, сформировались структуры с одинаковыми структурами в цементном камне и бетоне: общая и капиллярная пористость цементного камня (0,52-0,58) и (0,36-0,40), пористость бетона (18,7-19,3) и (19,3-20,7)%.

Простейшее выражение, учитывающее объемный закон смесей, описывает эффективную проводимость  $\lambda_{eff}$  следующим образом [15]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \cdot (1 - v_p) + v_p \cdot \lambda_p, \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  – теплопроводность твердого тела;

$\lambda_p$  – теплопроводность пор;

$v_p$  – объемная доля пор.

Уравнение (1) устанавливает верхний предел расположения двух фаз.

Для пористых материалов с объемной долей пор до 0,65 соотношение Ландауэра (уравнение (2)) стало стандартным аналитическим методом оценки эффективной теплопроводности.

Метод предсказывает теплопередачу в твердых или пористых материалах — например, в наноструктурах [16].

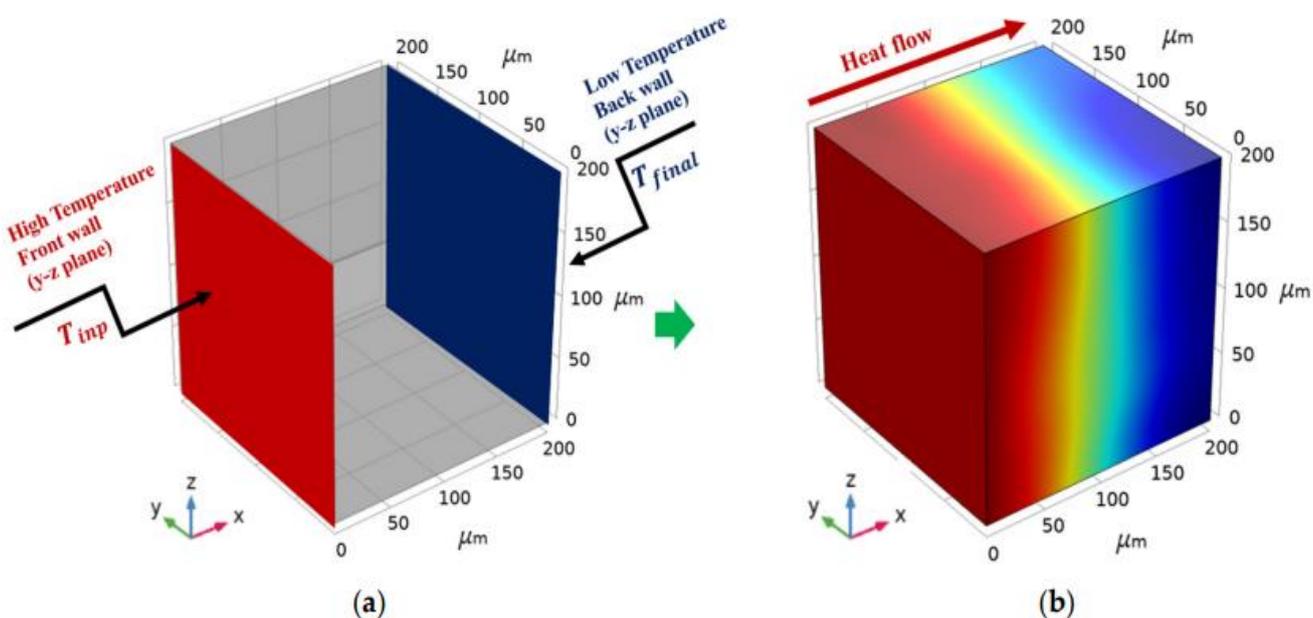
Уравнение (2) было выведено на основе анализа теплопроводности явления в пористых материалах со случайным распределением обеих фаз, включая наличие открытой пористости, соединяющей многочисленные каналы:

$$\lambda_{eff} = 0.25 \cdot [\lambda_p \cdot (3 \cdot v_p - 1) + \lambda_s \cdot (2 - 3 \cdot v_p) + \{[\lambda_p \cdot (3 \cdot v_p - 1) + \lambda_s \cdot (2 - 3 \cdot v_p)]^2 + 8\lambda_s \lambda_p\}^{0.5}], \quad (2)$$

где  $\lambda_s$  — теплопроводность твердого тела;

$\lambda_p$  — теплопроводность пор;

$v_p$  — объемная доля пор.



а – Граничные условия; б – Тепловой поток

Рисунок – 3D-имитационная модель

Аналитические выражения (уравнения (1) и (2)) могут быть использованы для проверки результатов, полученных с помощью численного моделирования в COMSOL Multiphysics.

### Список использованной литературы:

1. Агзамов Ф.А. О необходимой величине расширении тампонажных материалов / Ф.А. Агзамов, В.В. Бабков, И.Н. Каримов // Территория Нефтегаз. – № 8. – 2011. – С. 14-15
2. ГОСТ 1581-96 Портландцементы тампонажные. Технические условия. – Введен 1998–10–01. – М.: МНТКС. – 1998. – 14 с.
3. Никишкин, В.А. Влияние структуры и плотности на прочность и деформативность плотного строительного бетона и его составляющих: монография / В.А. Никишкин // Екатеринбург, УГТУ-УПИ. – 2009. – 269 с
4. Орешкин, Д.В. Геоэкологические проблемы трещиностойкости и теплопроводности тампонажного камня / Д.В. Орешкин, Г.Н. Первушин // Сборник докладов 8-й международной конференции «Стены. Фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики». – 2003. – С. 125-133.
5. Соловьев, А.Я. Исследование влияния теплофизических свойств буровой промывочной жидкости на скорость протаивания многолетнемерзлых пород / А.Я. Соловьев, Р.Р. Сайтов, Ф.Р. Курбанов // Проблемы науки. – 2017. – №6 (19). – С.18-20.
6. Электронный ресурс: Введение в COMSOL Multiphysics [https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysics\\_RU52\\_a.pdf/](https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysics_RU52_a.pdf/), дата обращения 15.10.2019
7. Balaji, N.; Mani, M.; Reddy, B. V. Discerning Heat Transfer in Building Materials. Energy Procedia 2014, 54, 654–668.

8. Hofmeister, A. Measurements, Mechanisms, and Models of Heat Transport; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018. 46. Allen, P.B.; Feldman, J.L. Thermal conductivity of disordered harmonic solids. *Phys. Rev. B* 1993, 48, 12581–12588
9. Anderson, S.A. The Thermal Conductivity of Intermetallics. Master's Dissertation, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 1996.
10. Singh, V.P.; Kumar, M.; Srivastava, R.S.; Vaish, R. Thermoelectric energy harvesting using cement-based composites: A review. *Mater. Today Energy* 2021, 21, 100714.
11. Wang, L. Generalized Fourier law. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1994, 37, 2627–2634.
12. Smith, D.S.; Alzina, A.; Bourret, J.; Nait-Ali, B.; Pennec, F.; Tessier-Doyen, N.; Otsu, K.; Matsubara, H.; Elser, P.; Gonzenbach, U.T. Thermal conductivity of porous materials. *J. Mater. Res.* 2013, 28, 2260–2272.
13. Kalifa, P.; Menneteau, F.-D.; Quenard, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cem. Concr. Res.* 2000, 30, 1915–1927.
14. Collishaw, P.G.; Evans, J.R.G. An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellular materials. *J. Mater. Sci.* 1994, 29, 2261–2273.
15. Angelescu, D.; Cross, M.; Roukes, M. Heat transport in mesoscopic systems. *Superlattices Microstruct.* 1998, 23, 673–689.
16. ISO 8894-1:2010; Refractory Materials—Determination of Thermal Conductivity—Part 1: Hot-Wire Methods (Cross-Array and Resistance Thermometer). ISO Standard: Geneva, Switzerland, 2010.

**Трушкин О.Б., Трепалин М.А. © 2023**