УДК 536.242:622

**Н.Н.СМИРНОВА**
*Факультет фундаментальных и гуманитарных дисциплин, доцент кафедры общей и технической физики*
**ФАМ ТХИ ЛЬЕУ**
*Горный факультет, группа НГ-02*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА И ТЕПЛООТДАЧИ В ЗАДАЧАХ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА

Наибольшее развитие теория фильтрационного теплообмена получила всвязи с освоением геотермальных ресурсов. В задачах горной теплофизики, как правило, реальный коллектор циркуляционной системы заменяется моделью. Каждая расчетная схема содержит величины, характеризующие интенсивность процессов переноса тепла. Выполнен анализ теоретических исследований и экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи и эффективной теплопроводности. Сделаны некоторые рекомендации относительно применения этих коэффициентов в существующих моделях фильтрационного теплообмена. Большой разброс в экспериментальных данных и отсутствие четких теоретических зависимостей указывает на необходимость обоснованного выбора коэффициентов и выполнения расчетов для сравнительного анализа различных моделей теплообмена.

The theory of filter heat exchange got the main development owing to development of geothermal resources. In problems of mining thermal physics, as a rule, a real collector of a circulating system is replaced with its model. Each calculation diagram contains quantities which characterize the intensity of heat transfer process. Analysis of theoretical research and experimental data based on heat emission coefficient and effective thermal conductivity was carried out in this work. Some recommendations concerning application of this coefficient in known models of filtration heat emission were offered. There is a necessity of grounded selection of coefficients and implementation calculation for comparative analyses of different models because of significant diversity in experimental data and absence of clear theoretical dependences.

Актуальность данной проблемы продиктована широким разнообразием приложений фильтрационного теплообмена к решению вопросов прогноза и регулирования теплового режима в геотехнологических системах. Наибольшее развитие теория фильтрационного теплообмена получила в связи с освоением геотермальных ресурсов и нефтяных месторождений [5, 6, 9, 11-13, 15].

При изучении процессов теплопереноса при фильтрации в задачах горной теплофизики реальный коллектор циркуляционной системы заменяется моделью. Модели представляют собой гомогенную (однородную) среду с эффективными свойствами [9, 14, 17] или гетерогенную среду с периодической изотропной структурой (система параллельных пластин, цилиндров, шаров) [2, 5, 6, 8, 11-13, 15, 19].

Существующие методы расчета базируются на различных серьезных допущениях. В каждую расчетную схему входят величины, характеризующие интенсивность процессов переноса тепла. Теоретические и экспериментальные исследования коэффициентов переноса и тепломассоотдачи выполнены в большом объеме [1-4, 6-8, 10, 18, 20, 21].

При описании процессов на основании гомогенных моделей возникает необходимость использования эффективных коэффициентов теплопроводности.

Принципиально зависимость коэффициентов переноса от скорости фильтрации $U_ф$, размера частиц $d_ч$ и пористости $m$ явля-

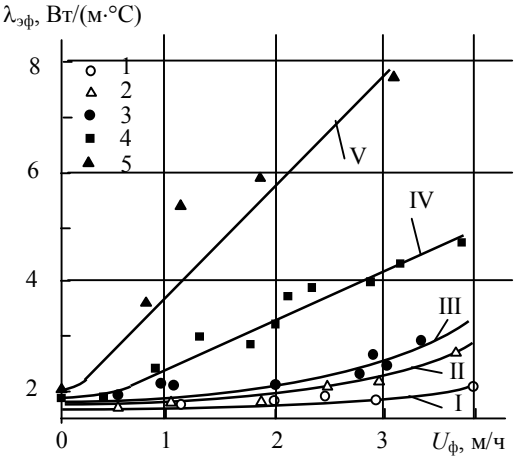



Рис.1. Результаты определения коэффициента эффективной теплопроводности однородно-зернистых материалов [10]
1-5 – эксперимент; I-V – теоретические кривые; $d_ч$, мм: 1 – 2-3, 2 – 3-5, 3 – 5-7, 4 – 10-15, 5 – 15-35; I – 2,5, II – 4, III – 6, IV – 5, V – 25

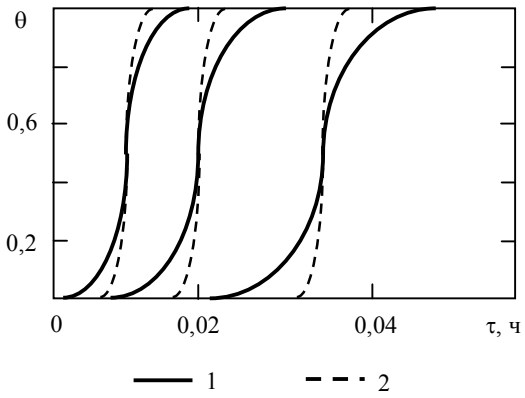



Рис.2. Результаты расчета по гомогенной модели теплообмена для Re > 20
1 – $\lambda_{эф} = 6 + 0{,}09\mathrm{RePr}$; 2 – $\lambda_{эф} = \lambda_в m + \lambda_п(1 - m)$, где индексы в и п означают соответственно воду и породу

ется строго доказанной. На рис.1 представлены результаты экспериментов для однородно-зернистых материалов [10].

Большинство теоретических результатов по эффективным коэффициентам получено при выводе макромасштабных балансовых уравнений гетерогенных смесей на основе различных процедур усреднения [3, 4].

На основании анализа большого объема экспериментальных данных в монографии С.С.Кутателадзе [7] приводятся значения коэффициентов $A$ и $B$ для обобщенной формулы безразмерного эффективного коэффициента теплопроводности зернистого слоя:

$$\overline{\lambda}_{эф} = A + B\mathrm{Pe}, \qquad (1)$$

где $\mathrm{Pe} = \mathrm{PrRe}$ – число Пекле; Pr – число Прандтля; Re – число Рейнольдса.

Сравнительный анализ, выполненный в работе [6] при Re > 20, показал, что использование в гомогенных моделях теплообмена вместо средневзвешенных эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф}$ коэффициентов, рассчитанных по формуле (1), существенным образом изменяет температурный профиль в сторону его расплывания (рис.2). Такой результат указывает на необходимость учета продольной эффективной теплопроводности при больших скоростях фильтрации и в гетерогенных моделях наряду с теплоотдачей на границе раздела фаз.

В расчетных схемах, где учитывается термическое сопротивление со стороны твердой фазы гетерогенной среды, участвуют коэффициенты, которые, в свою очередь, могут быть разделены на три группы:

- коэффициенты теплоотдачи к стенке круглого или плоского канала без пористого слоя при течении в нем жидкости;
- коэффициенты теплоотдачи к стенке круглого или плоского канала, заполненного пористым слоем, при фильтрации в нем жидкости;
- коэффициенты теплоотдачи при обтекании структурных элементов фильтрующей среды.

Тепломассоотдача при ламинарном и турбулентном течении в щелях и каналах без пористого скелета достаточно хорошо изучена. Коэффициенты этой группы могут быть использованы в физических моделях трещиноватых коллекторов, систем трещин гидроразрыва, а также при изучении теплообмена в скважинах.

Во всех задачах, где необходимо учесть конечную скорость теплообмена на границе фильтрационной области, появляется вопрос о коэффициентах теплоотдачи к стенкам каналов с засыпкой. Такая ситуация возникает при необходимости учета теплопритока из массива горных пород, окружающих сравнительно тонкий коллектор.

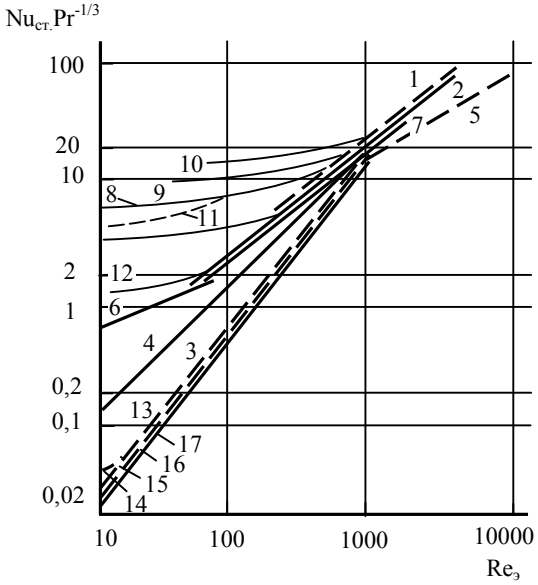



Рис.3. Зависимость числа Нуссельта $Nu_{ст}$ для стенки от $Re_э$ по данным разных авторов [1]
1 – Аэров, Умник; 2 – Аэров, Батищев (без учета продольной теплопроводности); 3 – Аэров, Батищев (с учетом продольной теплопроводности); 4 – Гальперин, Кочан; 5 – Яги и Вакао; 6-17 – различные значения $d_ч$ и отношения $d_{тр}/d_ч$

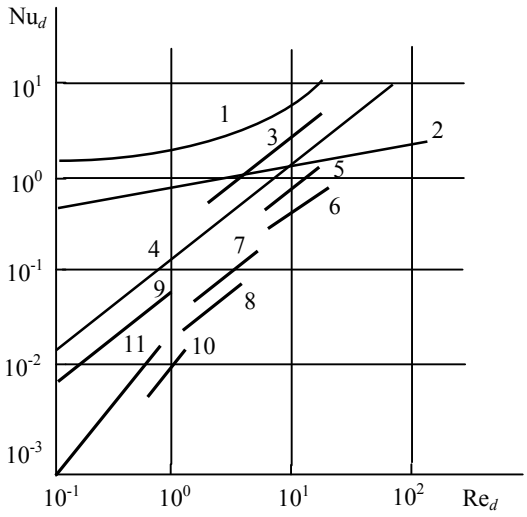



Рис.4. Зависимость коэффициента теплоотдачи к элементам засыпки от числа $Re_d$ по данным разных авторов [18]
1 – Ранц; 2 – Пфефер; 3 – Глиддон; 4 – Кунии, Сузуки; 5-7 – Эйхорн; 8 – Мимура; 9 – Цибульский; 10 – Сузуки; 11 – Кунии, Смит

Отсутствие четких теоретических зависимостей [14, 17, 18, 20, 21] и большой разброс в экспериментальных данных (рис.3) требуют серьезного анализа и обоснования выбора этих коэффициентов. В работах [6, 9] экспериментальные результаты по коэффициентам теплоотдачи к стенке фильтрационного канала получены с применением электрохимического метода диагностики. Их можно рекомендовать как наиболее надежные, так как указанный метод не приводит к нарушению среды и структуры течения. Полученная на основе двухслойной модели [6, 8] теоретическая зависимость для безразмерного коэффициента теплоотдачи

$$\mathrm{Nu}_{ст} = \left( \frac{5}{\mathrm{Re}} + \frac{1}{\lambda_{эф}} \right)^{-1} \qquad (2)$$

хорошо согласуется с этими результатами.

Эксперименты, выполненные В.А.Мухиным, А.В.Гориным и другими исследователями [16], показали, что при более высоких скоростях фильтрации эффективный перенос тепла возрастает и характерным масштабом становится не размер канала $d_{тр}$, а диаметр частиц. Влияние инерционных сил, ответственных за возникновение эффективного переноса, становится наиболее существенным при $\mathrm{Re}_d > 50$ ($\mathrm{Re}_d$ – число Рейнольдса, построенное по диаметру частицы). В работе [16] было предложено классифицировать гидродинамические режимы фильтрационного течения в зернистом слое следующим образом: инерционный ($5 \le \mathrm{Re} \le 80$), переходный ($80 \le \mathrm{Re} \le 120$), турбулентный ($\mathrm{Re} > 120$).

В соответствии с вышеуказанной классификацией предложены зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости фильтрации для инерционного и турбулентного режимов течения в канале с засыпкой. Общий вид безразмерного коэффициента теплоотдачи

$$\mathrm{Nu} = A\,\mathrm{Re}^{n}\,\mathrm{Pr}^{\alpha},$$

где $A$, $\alpha$, $n$ – коэффициенты, зависящие от режима течения и условий эксперимента.

Расчет по формулам моделей с гетерогенной средой, в наиболее корректной постановке задачи с граничными условиями третьего рода, требует выбора зависимости для коэффициента теплоотдачи к единич-

ным элементам засыпки. Здесь функциональные зависимости числа Нуссельта $Nu_d$ от числа Рейнольдса $Re_d$ изменяются в очень широких пределах [18, 20, 21] (рис.4).

Таким образом, все сказанное указывает на необходимость обоснованного выбора зависимостей для коэффициентов переноса и теплоотдачи, а также выполнения сравнительного анализа результатов вычисления температуры теплоносителя на выходе из зоны фильтрационного теплообмена при использовании различных моделей теплообмена.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. *Аксельруд Г.А.* Решение обобщенной задачи о тепломассообмене в слое // Инж.-физ. журн. 1966. Т.11. № 1. С.28-34.

2. *Аэров М.Э.* Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М.Э.Аэров, О.М.Тодес. Л.: Химия, 1968. 512 с.

3. *Буевич Ю.А.* К теории переноса в гетерогенных средах // Инж.-физ. журн. 1988. Т.54, № 5. С.770-779.

4. *Буевич Ю.А.* Об эффективной проводимости зернистых материалов // Прикл. механика и техн. физика. 1973. № 4. С.57-66.

5. *Гендлер С.Г.* Об одном методе решения задач теплопереноса в гетерогенной среде / С.Г.Гендлер, И.А.Павлов // Инж.-физ. журн. 1984. Т.39. № 1. С.161.

6. *Дядькин Ю.Д.* Геотермальная теплофизика / Ю.Д.Дядькин, С.Г.Гендлер, Н.Н.Смирнова. СПб: Наука, 1993. 256 с.

7. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 366 с.

8. *Мухин В.А.* Исследование процессов тепломассообмена при фильтрации в пористых средах / В.А.Мухин, Н.Н.Смирнова; ИТФ СО АН СССР. Новосибирск, 1978, препринт-26. 27 с.

9. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

10. *Перльштейн Г.З.* Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.

11. *Ромм Е.С.* Об одном случае теплопереноса в трещиноватой горной породе // Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Севера / Ленинградский горный ин-т. Л., 1972. С.92-96.

12. *Романов В.А.* Теплообмен при вынужденной конвекции в слабопроницаемой среде / В.А.Романов, Н.Н.Смирнова // Инж.-физ. журн. 1977. Т.33. № 2. С.305-310.

13. *Романов В.А.* Нестационарный теплообмен в гетерогенной среде // Инж.-физ. журн. 1975. Т.29. № 3. С.522-526.

14. *Рубинштейн Л.И.* Температурные поля в нефтяных пластах. М.: Недра, 1972. 276 с.

15. *Смирнова Н.Н.* Решение уравнений переноса тепла при фильтрации методом сведения к эквивалентному уравнению теплопроводности // Физическая гидродинамика и теплообмен / ИТФ СО АН СССР. Новосибирск, 1978. С.61-68.

16. Теплообмен в зернистом слое при умеренных числах Рейнольдса / Р.А.Дехтярь, Д.Ф.Сиковский, А.В.Горин, В.А.Мухин // Теплофизика высоких температур. 2002. Т.40, № 5. С.748-755.

17. *Чекалюк Э.Б.* Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. 237 с.

18. *Cubulski A.*, *Van Dallen M.J.*, *Verkerk J.W.*, *Van der Berg* //Chem. Eng. Sci. 1975. Vol.30. № 9. P.1015-1018.

19. *Klinkennberg A.* // Trans. Am. Geop. 1958. Vol.67. P.3-7.

20. *Yagi S.*, *Wakao N.* // Amer. Inst. Chem. J. 1959. Vol.5. P.79.

21. *Yagi S.*, *Kunii D.*, *Wakao N.* // Am. Inst. Chem. E. Jornal. 1960. Vol.6. № 4. P.543-546.