

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635721>

Оригинальное исследование



Модели переноса тепловой энергии в расчётах теплообменного оборудования

А.А. Крюков, Л.А. Марюшин, О.Б. Сенникова, Г.В. Сёмочкин

Московский политехнический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Исследования в области теплопереноса в теплообменном оборудовании показывают значительные отклонения в расчётах, когда теплофизические свойства материалов принимаются усреднёнными. Это создаёт проблемы в проектировании и уменьшает производительность теплообменных аппаратов.

Целью работы является разработка и внедрение моделей теплопередачи с учётом температурных изменений тепловых характеристик материалов с целью повышения точности прогнозов теплопередачи и создания оптимальных конструкций теплообменного оборудования.

Методы. В исследовании использовался численный анализ теплопереноса с учётом температурных изменений теплофизических свойств. Были применены модели подвижности и релаксации теплоносителей. Исследование охватывало анализ таких параметров, как плотность, средняя скорость движения теплоносителей, коэффициент теплопроводности, специфическая теплоёмкость, время релаксации и длина их свободного пути. Методы оценки включали математическое моделирование и численные расчёты.

Результаты. Анализ показал, что использование моделей, учитывающих температурные зависимости, значительно улучшает точность расчётов теплопередачи. Было выявлено, что коэффициент теплопроводности, подвижность носителей и время релаксации существенно зависят от температуры. Определены качественные изменения подвижности тепловых носителей в зависимости от температуры и агрегатного состояния материала.

Заключение. Предложенные модели подвижности и релаксации тепловых носителей позволяют более точно прогнозировать теплопередачу, что улучшает проектирование теплообменных аппаратов и повышает их эффективность в промышленности. Эти модели могут быть использованы для дальнейших исследований и оптимизации теплопередающих систем.

Ключевые слова: теплоперенос; теплообменное оборудование; температурные зависимости; теплофизические свойства; модели подвижности; расчёт теплопередачи.

Как цитировать:

Крюков А.А., Марюшин Л.А., Сенникова О.Б., Сёмочкин Г.В. Модели переноса тепловой энергии в расчётах теплообменного оборудования // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 4. С. 272–277. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635721>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635721>

Original Study Article

Thermal energy transfer models in the heat exchange equipment calculations

Alexey A. Kryukov, Leonid A. Marushin, Olga B. Sennikova, Gleb V. Semochkin

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Studies in the field of heat transfer in the heat exchange equipment show significant deviations in calculations when the thermophysical properties of materials are assumed to be averaged. This creates problems in design and reduces the efficiency of heat exchangers.

OBJECTIVE: Building and implementation of the heat transfer models that consider variations in temperature within the thermal properties of materials, with the goal of enhancing the precision of heat transfer predictions and optimizing the design of heat exchange systems.

METHODS: The study utilized numerical analysis of heat transfer considering temperature variations of thermophysical properties. Heat transfer agent mobility and relaxation models were applied. The study included the analysis of density, average flow rate of heat transfer agents, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, relaxation time and free path length. The evaluation methods included mathematical modeling and numerical calculations.

RESULTS: The analysis showed that the use of the models that take into account temperature dependencies significantly improves the accuracy of heat transfer calculations. The heat transfer coefficient, heat transfer agent mobility and relaxation time were found to depend significantly on temperature. Qualitative changes in the mobility of heat transfer agents as a function of temperature and the aggregate state of the material were determined.

CONCLUSIONS: The proposed models of mobility and relaxation of heat transfer agents allow to predict heat transfer more accurately, which improves the design of heat exchangers and increases their efficiency in industry. These models can be used for further research and optimization of heat transfer systems.

Keywords: heat transfer; heat exchange equipment; temperature dependence; thermophysical properties; mobility models; heat transfer calculation.

To cite this article:

Kryukov AA, Marushin LA, Sennikova OB, Semochkin GV. Thermal energy transfer models in the heat exchange equipment calculations. *Izvestiya MGTU «MAM»*. 2024;18(4):272–277. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635721>

Received: 05.09.2024

Accepted: 18.02.2025

Published online: 18.02.2025

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения расчётов теплообменника или его компонентов, учитывая температурные изменений свойств, вместо использования усреднённых значений, как это обычно делается, можно применять соответствующие модели и зависимости, учитывающие закономерности переноса энергии с учётом свойств теплопроводящих материалов. Проведённые численные исследования [1–4] показали отклонения, причём часто значительные, полученные в результате учёта температурных зависимостей теплофизических свойств от результатов расчётов, где свойства принимались усреднёнными в рабочем интервале температур.

Согласно классической теории [1], величина коэффициента теплопроводности составляет:

$$\lambda = \frac{1}{3} c \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{l}, \quad (1)$$

где c — удельная теплоёмкость, ρ — плотность, $\bar{v}$ и $\bar{l}$ — средняя скорость носителей тепла и длина их свободного пробега.

Эту зависимость также можно представить в виде:

$$\lambda = \frac{1}{3} c \cdot \rho \cdot (\bar{v})^2 \cdot \bar{\tau}, \quad (2)$$

где τ — среднее время релаксации носителей тепла.

Подвижность частицы, переносящей энергию в материалах, как известно, выражается уравнением:

$$u = \frac{\bar{v}}{F}, \quad (3)$$

где $\bar{v}$ — средняя скорость частицы, F — суммарное воздействие сил при её движении.

Согласно теории Нернста-Эйнштейна [3], величину подвижности при переносе массы можно представить в виде:

$$u = \frac{D}{k \cdot T}, \quad (4)$$

где D — коэффициент диффузии, k — постоянная Больцмана.

При переносе тепла электронами, их подвижность выражается уравнением:

$$u = \frac{a}{k \cdot T} \cdot e, \quad (5)$$

где a — коэффициент температуропроводности, равный $\left(\frac{\lambda}{c \cdot \rho}\right)$; e — заряд электрона.

Следуя этому подходу, авторы предлагают при переносе тепла фононами величину подвижности представлять в виде:

$$u = \left(\frac{a}{k \cdot T}\right) \cdot k = \left(\frac{a}{T}\right). \quad (6)$$

Согласно современным теоретическим исследованиям: «Механизмы рассеяния тепловых носителей достаточно точно определяются величиной степени (x) в зависимости подвижности от температуры в виде $U \approx T^x$. Следует отметить, что, как правило, в момент переноса тепла носители испытывают рассеяния на различных объектах (электроны, фононы, примеси и др.), поэтому значение степени x представляет собой некую среднюю величину и точно определить вид рассеяния часто бывает затруднительно» [4, стр. 44].

Учитывая связь подвижности со временем релаксации и длиной свободного пробега носителей, анализ теплопроводности можно провести на основе модели релаксации.

Эту модель можно представить в виде математического выражения:

$$\lambda = \frac{1}{3} c \cdot \rho \cdot (\bar{v})^2 \cdot \tau_p^{n_p}. \quad (7)$$

В этой записи по-прежнему сохраняется проблема выбора правильного значения средней скорости носителей тепла, особенно с учётом её температурной зависимости. Эту проблему нужно решать на основе анализа механизмов рассеяния носителей тепла, структурных особенностей вещества и вида носителей. Эти же вопросы заложены в значениях величины n_p .

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Значения этой величины в уравнении (7) определяют вероятность количества актов рассеяния, которые сопровождают процесс переноса тепла. В ситуации полного отсутствия рассеяния носителей значение $n_p = 0$, а при максимальном рассеянии время релаксации можно описать следующим выражением:

$$\bar{\tau}_p = \frac{\hbar/kT}{\exp\left(\frac{T_{\max}}{T}\right) \pm 1}. \quad (8)$$

Значение $n_p = 1$. Это указывает на то, что температурные изменения степени n в диапазоне от 0 до 1 отражают всю сложность и разнообразие процессов, которые сопровождают рассеяние тепловых носителей. Эти изменения можно качественно оценить с помощью следующих рассуждений.

При увеличении температуры среднее время релаксации уменьшается, поскольку рост температуры ведёт к увеличению возбуждения частиц, что вызывает учащение пиков всех волн и сокращение интервалов между взаимодействиями. В условиях полного рассеяния ($n_p = 1$)

вклад от переносимых частиц, который пропорционален теплопроводности, возрастает, поскольку сокращается среднее время релаксации. Это связано с тем, что при низких температурах вероятность рассеяния волн незначительна, а количество центров рассеяния в веществе ограничено лишь волнами, связанными с электронами, фононами, фотонами и т. д. В этих условиях волны практически не теряют своей энергии и распространяются практически без препятствий.

Важный вопрос, который следует из данного анализа, заключается в том, каким образом определяется зависимость $n_p = f(T)$ и как можно рассчитать эти значения.

Можно наблюдать, что в твёрдом состоянии материала при низких температурах ($T < \theta_v$) величина n остаётся незначительной, что объясняется замороженностью большинства монохроматических волн и ограниченным количеством центров рассеяния в веществе.

Тем не менее, при повышении температуры до определённого уровня (размораживание) наблюдается активизация процессов, что приводит к резкому увеличению значения n_p . Дальнейший рост температуры приводит к незначительному увеличению n коэффициента.

В жидкой фазе коэффициент теплопроводности при тех же значениях n ниже, чем в твёрдом состоянии и ещё более снижен в газообразной фазе. В обоих случаях температурные изменения оказывают менее значительное влияние на величину n_p . Уменьшение значения n в жидкой фазе по сравнению с твёрдой обусловлено исчезновением дальнего порядка, устранением дефектов, характерных для твёрдых тел, и сосредоточением процессов рассеяния преимущественно на ближних расстояниях, то есть в пределах первой координационной сферы.

В газообразной фазе, за исключением ближних взаимодействий, основным источником рассеяния выступают молекулы, что ещё сильнее снижает значение n по сравнению с жидким состоянием.

Важно отметить, что величина n является очень чувствительным параметром. Даже незначительные колебания вплоть до третьего знака после запятой, могут заметно влиять на среднее время релаксации и, соответственно, на теплопроводность. Поэтому зависимость $n_p = f(T)$ должна учитывать все возможные факторы.

Если значение n принять равным нулю (т. е. при отсутствии процессов рассеяния в веществе), коэффициент теплопроводности при данной температуре достигает своего предельного значения. При температуре, характерной для твёрдого состояния, достигается максимальная теплопроводность, которая определяется исключительно теплоёмкостью, плотностью и скоростью носителей. Таким образом, предложенная модель позволяет решить задачу определения предельной теплопроводности реальных материалов, что до настоящего времени не было доказано в научной литературе.

Очевидно, что для получения численных значений величины n нужно прежде всего определиться

со значениями средней скорости носителей тепла. К сожалению, точного решения для значений скорости, длины свободного пробега и времени релаксации носителей тепла, а значит и величины n_p пока в теоретической физике нет.

Поэтому для определения механизмов рассеяния носителей тепла авторы рекомендуют исходить из модели подвижности.

Стоит отметить, что в ряде веществ, таких как полупроводники, аморфные структуры и газы, наряду с указанными выше электронами, фононами и молекулами, носителями теплопереноса и источниками рассеяния могут быть также фотоны, электроны и другие высокоэнергичные частицы. Их роль при последующем анализе различных веществ, естественно будет учитываться.

Тем не менее, все перечисленные выше модели не могут дать однозначный ответ на вопрос о применимости механизмов рассеяния тепловых носителей.

Наиболее проработанной в отношении применения для расчётов теплообменного оборудования является модель подвижности, в которой величина степени x температуры позволяет качественно определить тип рассеяния электронов. Для фононов и добавочных механизмов теплопереноса такой зависимости не существует.

На сегодняшний день известны результаты исследований теплопроводности двуоксида кремния SiO_2 , используемые в виде порошка, в качестве добавки при производстве конструкций из тугоплавких материалов, а также в виде плавленого аморфного материала. Тем не менее, процесс переноса тепла в этих материалах, на наш взгляд, ещё не закончен. Температурные зависимости теплопроводности для плавленого кварца и кварцевого стекла, рассчитанные на основе модели подвижности носителей энергии, представлены на рис. 1.

В данном случае движение электронов определяется их рассеянием на тепловых колебаниях решётки, т. е. на фононах, при повышенных значениях температур ($T > 50 \div 70 \text{ K}$). Характерной особенностью является пропорциональная зависимость подвижности U от температуры $U \sim T^{1.5}$.

Однако следует учитывать, что присутствие добавочных механизмов рассеяния, вызванных наличием примесей, нередко становится столь же значимым, как и основной электрон-фононный механизм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые численные исследования показали, что учёт температурных зависимостей теплофизических свойств значительно повышает точность расчётов по сравнению с традиционными методами, где свойства материалов принимаются усреднёнными. Предложенная модель подвижности и релаксации тепловых носителей позволяет точнее прогнозировать процессы теплопередачи в теплообменных аппаратах, учитывая

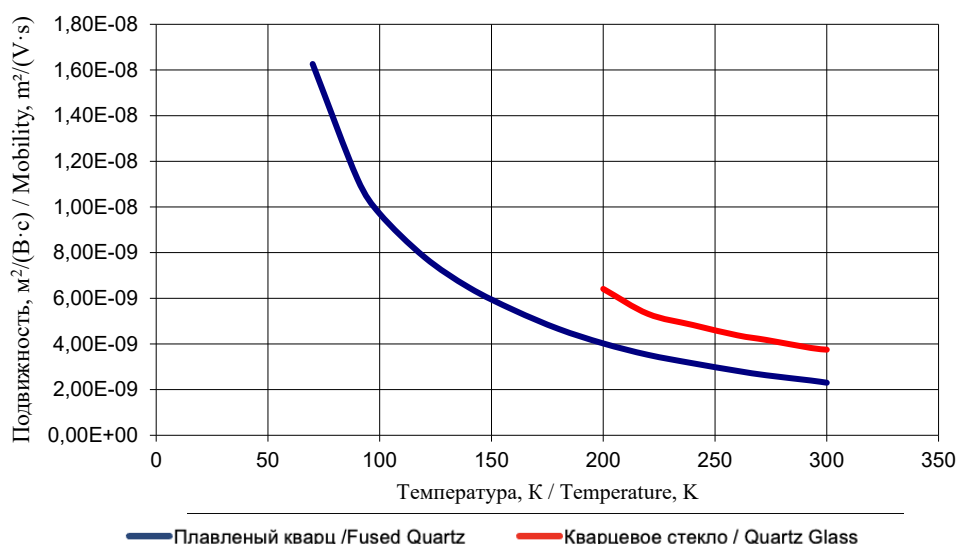


Рис. 1. Температурные зависимости подвижности двуоксида кремния.

Fig. 1. Dependence of silicone dioxide mobility in temperature.

различные механизмы рассеяния (электроны, фононы, примеси) и их взаимодействие в зависимости от температуры и агрегатного состояния вещества. Анализ температурных зависимостей коэффициента теплопроводности и времени релаксации показал значительные изменения характеристик материалов при изменении температуры, что необходимо учитывать для повышения эффективности теплообменного оборудования. Применение данной модели позволяет точнее определять среднюю скорость тепловых носителей и другие ключевые параметры. Дальнейшее изучение будет направлено на расширение модели для учёта более сложных условий эксплуатации и анализ различных типов теплообменных аппаратов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Крюков — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; О.Б. Сенникова — редактирование текста рукописи; Л.А. Марюшин — экспертная оценка, утверждение финальной версии; Г.В. Семочкин — поиск публикаций по теме статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования

и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.A. Kryukov — search for publications, writing the text of the manuscript O.B. Sennikova — editing the text of the manuscript; L.A. Marushin — expert opinion, approval of the final version; G.V. Semochkin — search for publications on the topic of the article. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Features of calculations of heat transfer processes based on models of mobility and relaxation of heat carriers. Edited by A.S. Okhotin. Moscow State Textile University named after A.N. Kosygin. Moscow. 2001:233
2. Zaiman D.M. Models of disorder: theoretical physics of homogeneously disordered systems. Moscow. 1982:591.
3. Okhotin A.S., Maryushin L.A., Pimenova E.L., Afanasyeva E.V. Analysis of the temperature dependences of the diffusivity coefficient of the materials (in Russ.). *Energobezrezhenie i vodopodgotovka*. 2009;57(1):43–46. EDN:JWBVZV
4. Reisland J. Physics of Phonons. Moscow. 1975:365.
5. Croxton K. Physics of the liquid state. Statistical Introduction. Moscow. 1978:400.

6. Okhotin AS. Models of Heat Transfer in Condensed Media. Moscow. 1990:198.

7. Marushin LA, Tikhonova DA. Heat transfer in materials with a disordered. Structure "Conference on Applied Physics,

Information Technologies and Engineering" (APITECH-2019). *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399(5). doi: 10.1088/1742-6596/1399/5/055005 EDN:QEDZEX

ОБ АВТОРАХ

*** Крюков Алексей Алексеевич,**

студент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
адрес: Россия, 107023, Москва,
ул. Большая Семёновская, д. 38;
ORCID: 0009-0003-5460-5208;
eLibrary SPIN: 3780-7865;
e-mail: AlexseyKryukov@yandex.ru

Марюшин Леонид Александрович,

канд. техн. наук, доцент,
профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
ORCID: 0009-0000-5240-0186;
eLibrary SPIN: 3812-2917;
e-mail: katzbalger@yandex.ru

Сенникова Ольга Борисовна,

канд. техн. наук, доцент,
профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
ORCID: 0009-0002-0069-5669;
eLibrary SPIN: 6470-5501;
e-mail: borjusya@yandex.ru

Сёмочкин Глеб Викторович,

студент кафедры «Менеджмент»;
ORCID: 0009-0000-4269-4678;
eLibrary SPIN: 3228-5831;
e-mail: glebsem03@gmail.com

AUTHOR'S INFO

*** Alexey A. Kryukov,**

Student of the Industrial Heat Power Engineering Department;
address: 38 Bolshaya Semenovskaya st, Moscow,
Russia, 107023;
ORCID: 0009-0003-5460-5208;
eLibrary SPIN: 3780-7865;
e-mail: AlexseyKryukov@yandex.ru

Leonid A. Maryushin,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Professor of the Industrial Heat Power Engineering Department;
ORCID: 0009-0000-5240-0186;
eLibrary SPIN: 3812-2917;
e-mail: katzbalger@yandex.ru

Olga B. Sennikova,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Professor of the Industrial Heat Power Engineering Department;
ORCID: 0009-0002-0069-5669;
eLibrary SPIN: 6470-5501;
e-mail: borjusya@yandex.ru

Gleb V. Semochkin,

Student of the Management Department;
ORCID: 0009-0000-4269-4678;
eLibrary SPIN: 3228-5831;
e-mail: glebsem03@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author