

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 536.33, 536.241

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-680-688>

Поступило в редакцию 20.06.2019

Received 20.06.2019

А. И. Малиновский*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЕМ
В ЗАСЫПКАХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ***(Представлено академиком О. Г. Пенязьковым)*

Аннотация. Предложена новая методика, позволяющая проводить расчет теплопереноса излучением между частицами, а также между частицами и границей, в подходе метода дискретных элементов (discrete elements method, DEM). В ее основе лежит идея о том, что математическое ожидание угловых коэффициентов между частицами можно выразить как функцию набора значимых локальных параметров засыпки, таких как расстояние между частицами, отношение их радиусов и локальное значение пористости слоя частиц. Расчет значения углового коэффициента по формуле требует существенно меньше вычислительных ресурсов, чем прямое их вычисление двойным интегрированием, при этом обеспечивается реалистичное среднее значение величины и сопоставимая с методами прямого вычисления общая точность расчета. Рассмотрены монодисперсные и полидисперсные засыпки сферических непрозрачных частиц. Показано, что использование безразмерных параметров позволяет сформулировать зависимости для угловых коэффициентов в общем виде. В частности, для углового коэффициента между частицами засыпки была предложена экспоненциальная и линейная аппроксимации. Также в работе получено обобщение зависимостей для различных значений пористости слоя. Было найдено распределение суммарной передаваемой мощности излучения в зависимости от дальности до учитываемых частиц-соседей, даны рекомендации по выбору этого параметра в зависимости от требуемой точности расчета. Помимо этого, на основании эмпирических наблюдений эффективной теплопроводности засыпок предложен способ учета влияния коэффициента черноты материала частиц на величину теплообмена излучением между частицами. Предложенный метод обладает всем необходимым для того, чтобы стать стандартной реализацией механизма переноса тепла излучением в методе дискретных элементов.

Ключевые слова: угловой коэффициент, теплообмен излучением, метод дискретных элементов, полидисперсная засыпка

Для цитирования: Малиновский, А. И. Метод расчета теплопереноса излучением в засыпках сферических частиц / А. И. Малиновский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 6. – С. 680–688. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-680-688>

Andrei I. Malinowski*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus***METHOD FOR CALCULATION OF RADIATIVE HEAT TRANSFER IN BEDS
OF SPHERICAL PARTICLES***(Communicated by Academician Oleg G. Penyazkov)*

Abstract. A new technique for implementing external (particle-to-wall) and particle-to-particle radiative heat transfer in discrete elements method (DEM) simulations is proposed. It is based on the idea that an expected view factor value depends on relevant local bed parameters (distance between particles, particle radius ratio, and local bed porosity). Calculation of average view factors via the formula requires considerably less computational effort than direct *in situ* integration, when this happens a reasonable average value and an overall accuracy comparable to direct calculation are provided. Both mono- and polydisperse mixtures of spherical opaque particles were considered. It was shown that using nondimensional parameters, a simple general dependence for an external radiative heat flux may be introduced. Exponential and linear fits were proposed for estimating the particle-particle radiative heat flux. The generalization of the obtained formulas for various bed porosities is proposed. The distribution of cumulative transferred heat flux across the particles up to a certain distance was found, and the recommendations regarding the choice of that parameter to achieve a desired accuracy were formulated. Also, the method to account for the particle emissivity was proposed on the basis of the empirical dependence between emissivity and radiative heat flux in porous materials. The proposed method satisfies all the requirements to become a standard implementation of radiative heat transfer calculation in DEM.

Keywords: view factor, radiative heat transfer, discrete elements method, polydisperse mixture

For citation: Malinouski A. I. Method for calculation of radiative heat transfer in beds of spherical particles. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 6, pp. 680–688 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-680-688>

Введение. В системах, состоящих из газов и твердых дисперсных частиц, существует несколько основных механизмов переноса тепла: теплопроводность (по контактам между частицами и газовым прослойкам), конвекция (при движении как газа, так и самих частиц), и теплообмен излучением между частицами. Их относительный вклад может существенно меняться в зависимости от физических условий; в частности, величина потока теплового излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Есть несколько индикаторов того, что роль излучательного переноса велика в конкретном приложении: если частицы (а значит, и поры между ними) относительно велики (10^{-3} м); температура выше 700 К; а также в случае, если тепловое излучение является единственным средством внешнего подвода тепла. Примерами таких приложений являются лазерное спекание частиц в аддитивных технологиях; горение сыпучих топлив; а также концентрирующие гелиотермические станции с пневмотранспортом инертных частиц в качестве теплоносителя.

Не существует общих континуальных моделей, которые способны учесть и описать все особенности поведения гранулированных систем. Наиболее перспективный из существующих подходов состоит в создании сопряженного представления системы, который использует свойства и динамику частиц в виде отдельных твердых тел для описания дискретной фазы, и гидродинамический подход сплошной среды для описания газовой фазы. Метод дискретных элементов (Discrete Elements Method – DEM) дает возможность разрешить большинство проблем континуального подхода, используя естественное рассмотрение системы на масштабе размеров отдельных частиц.

В этом подходе каждой частице приписываются собственные значения физических величин (координаты, скорости, температура и т. д.). Используемые на сегодняшний день программные коды для расчета методом дискретных элементов (LIGGGHTS, XDEM, EDEM, mFix) непрерывно развиваются, и методы расчета теплообмена по механизмам теплопроводности и конвекции можно считать сформировавшимися [1]. Они применяются с минимальными вариациями в большинстве работ по численному моделированию теплообмена. Но стандартного метода расчета теплообмена излучением, удовлетворяющего всем сформулированным выше требованиям, до сих пор предложено не было. Представленная работа стремится устранить этот пробел.

Рассмотрение систем в подходе метода дискретных элементов [2] накладывает ряд ограничений на метод расчета теплообмена излучением. Основными требованиями являются высокая скорость расчета; рассмотрение процессов на уровне отдельных частиц; обеспечение консервативности расчетной схемы; попарное описание взаимодействия; ограниченная дальность взаимодействия; возможность параллельного расчета; наконец, точность.

Существующие методы расчета теплообмена излучением в системах частицы–газ. Исторически наиболее часто для описания теплопереноса в системах из частиц и газа (какими являются насыпные и псевдооживленные слои) используется представление об эффективной теплопроводности такой системы. Само значение коэффициента переноса либо измеряется эмпирически, либо находится одним из способов моделирования.

Для метода DEM предложено несколько подходов к расчету переноса тепла излучением, и в каждом, на наш взгляд, есть существенные недостатки. В основном отличия заключаются в выбранном балансе между точностью и скоростью расчетов.

Один из самых простых методов был предложен в [3]. Он вводит понятие локальной температуры $T_{i,local}$, получаемой усреднением температуры частиц в некоторой окрестности данной (i -й) частицы. Эта величина затем используется как эффективная температура окружающей среды для расчета баланса потока излучения $Q_{i,rad}$ от i -й частицы:

$$Q_{i,rad} = \sigma \varepsilon_i A_i (T_{i,local}^4 - T_i^4),$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана; ε_i – коэффициент черноты; T_i – температура i -й частицы; A_i – ее площадь поверхности.

Такой расчет простой и относительно быстрый. Недостаток метода состоит в том, что из-за независимого расчета потока на каждой частице нельзя гарантировать консервативность суммарной энергии; кроме того, велика погрешность при сильном градиенте температуры в окрестностях частицы.

Еще один способ предложен в [4]. Угловой коэффициент между частицами $F_{i \rightarrow j}$ определяется как отношение площадей i -й частицы к сумме площадей A_j всех j окружающих частиц

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{A_i}{\sum_j A_j}.$$

В такой постановке i -я частица испускает тепловое излучение, соответствующее температуре ее поверхности T_i , и поглощает тепловой поток от j окружающих частиц с коэффициентами, равными $F_{i \rightarrow j}$. Метод дает достаточно грубые значения потока (точность не лучше 30 %), зато он простой в расчете и может применяться не только к частицам, но и к участкам ограждающих поверхностей.

Другой подход, использующий разбиение Вороного, представлен в [5]. Частицы полагаются диффузно отражающими (коэффициент черноты $\varepsilon_{r,i}$) и непрозрачными. Поток излучения между соседними частицами учитывается только в пределах телесного угла, образованного общей гранью многогранника Вороного; боковая поверхность области считается диффузно серой. Поток излучения $Q_{i,\text{rad}}$ между двумя частицами:

$$Q_{i \rightarrow j, \text{rad}} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{r,i}}{\varepsilon_{r,i} A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij} + (1/A_i F_{iR} + 1/A_j F_{jR})^{-1}} + \frac{1 - \varepsilon_{r,j}}{\varepsilon_{r,j} A_j}},$$

где F_{ij} – угловой коэффициент между видимыми сегментами сфер; F_{iR} – угловой коэффициент между сегментом сферы и боковой поверхностью многогранника Вороного; A_i, A_j – площади сегментов.

Одним из недостатков метода является пренебрежение эффектом уменьшения углового коэффициента третьими частицами; для ближайших же частиц, наоборот, угловой коэффициент будет занижен из-за расчета между сегментами вместо всей поверхности сфер. Помимо этого, разбиение Вороного является вычислительно сложным и не может выполняться достаточно часто в нестационарном расчете.

Также применяется метод трассировки лучей. Несмотря на удобство и универсальность использования стандартных процедур [6] из стандартных библиотек OpenGL, из-за вычислительной сложности невозможно обновлять данные по угловым коэффициентам на каждом шаге. Таким образом, метод не предназначен для расчета задач с нестационарным положением элементов.

Существует упрощенный подход [7], когда угловой коэффициент между i -й и j -й частицами считается равным телесному углу от проекции j -й частицы на поверхность i -й. В этом методе также учитывается перекрытие видимых частей соседних частиц. Метод, хотя и существенно производительнее классической трассировки лучей, в случае решения нестационарной задачи оказывается пригодным только для системы из малого числа частиц. Кроме того, замена углового коэффициента видимыми телесными углами является грубой для ближайших частиц, удельный вклад которых в теплообмен как раз наибольший.

Идея получить статистический массив данных угловых коэффициентов для засыпки частиц одним из медленных методов прямого расчета, обнаружить закономерности в нем и использовать в дальнейших расчетах их предсказания довольно очевидна и встречалась в нескольких вариантах.

В [8] для обработки массива полученных угловых коэффициентов использовали нейросети. Это способ получить механизм предсказания результата расчета абстрагируясь от предположений о причинно-следственных связях. На наш взгляд, в рассматриваемом случае с небольшим числом параметров задачи такой подход избыточен по сравнению с нахождением простой интерполяционной функции.

Другим способом увеличить скорость расчета [9] является метод сферического усреднения. Он основан на нахождении эмпирической связи для углового коэффициента между частицами в зависимости от расстояния между ними на основании статистики по большому числу реализаций. На основе этих данных в [10] получена интерполяционная формула для углового коэффициента

$$F_{ij} = 0,21e^{0,0322L-1,094L^2},$$

где L – расстояние между центрами частиц, нормированное на их радиус. Такая же идея может быть положена в основу расчета теплообмена частицы со стенкой.

Проблема этого подхода в том, что не учитываются локальные параметры упаковки частиц (например, в окрестностях газовых пузырей в псевдооживленном слое). В опубликованных работах также отсутствует обобщение метода расчета для полидисперсной засыпки частиц.

Материалы и методы исследования. Идея расчета. Для расчета угловых коэффициентов предлагается использовать значение математического ожидания угловых коэффициентов, полученное с учетом набора значимых локальных параметров засыпки. В качестве таких параметров выступает расстояние между частицами, отношение их радиусов и локальное значение пористости слоя частиц. Математическое ожидание находится обработкой значений угловых коэффициентов, рассчитанных прямым численным интегрированием для сгенерированных засыпок частиц. Расчет углового коэффициента по полученной формуле требует существенно меньше вычислительных ресурсов, чем прямое вычисление двойным интегрированием или методом Монте-Карло.

Используются следующие физические приближения: рассматриваются сферические непрозрачные частицы, формирующие засыпку с локально постоянным значением пористости. Отражением излучения пренебрегается, используется аппарат геометрической оптики. Частицы считаются однотемпературными.

В таком случае величина теплового потока, обусловленного излучением, между частицами i и j может быть записана в виде

$$Q_{i \rightarrow j, \text{rad}} = \sigma \epsilon_r A_i (T_i^4 - T_j^4) F_{ij},$$

где F_{ij} – угловой коэффициент между i -й и j -й частицами; A_i – площадь поверхности i -й частицы, m^2 ; T_i – температура i -й частицы, К; ϵ_r – коэффициент черноты материала поверхности частиц.

Методология расчета. Для корректного расчета необходимо генерировать засыпку со свойствами, соответствующими реальным засыпкам. В то же время модельная система должна быть совместимой с подходом дискретных элементов. Для создания засыпок использовался программный пакет LIGGGHTS® версии 3.8.0, использующий метод упругих сфер с законом Гука для механического взаимодействия между частицами. Свойства частиц приведены в таблице и являются стандартными для такого типа задач.

Свойства частиц засыпки
Properties of bed particles

Параметр Parameter	Значение Value
Модуль Юнга, Па	$5,0 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона	0,45
Коэффициент восстановления	0,9
Коэффициент трения	0,5
Количество частиц	12000
Отношение диаметров области и частиц	30

Угловые коэффициенты частицы с ограждающей стенкой рассчитывались по отношению к цилиндрической боковой поверхности. Размеры слоя относительно частиц были достаточно большими, чтобы считать радиус кривизны боковой стенки стремящимся к бесконечности. Из расчета исключались частицы, находящиеся ближе пяти диаметров от торцов, ввиду влияния торцевых эффектов на упаковку.

Для моделирования полидисперсных засыпок использовалось распределение Розина–Рэммера частиц по размерам, характерное для получаемых дроблением материалов:

$$Y = 1 - e^{(-x/x_0)^n},$$

где Y – кумулятивная массовая доля частиц с радиусом, меньшим x ; x_0 и n – параметры распределения. Массив радиусов частиц генерировался численно с использованием генератора псевдослучайных чисел. Параметры засыпок были выбраны $x_0 = 0,0003$, значения параметра ширины распределения от 4 до 18.

Процедура генерации засыпок была следующей. Для получения случайной плотной упаковки необходимое количество частиц генерировалось в сосуде с цилиндрическими стенками, затем на них начинала действовать внешняя сила (имитируя силу тяжести). В таких условиях частицы формируют естественным путем устойчивую засыпку со стороны одного из торцов области. Типичным случаем является случайная плотная упаковка сферических частиц, имеющая пористость 0,36. В системах с псевдооживлением могут существовать засыпки с большей пористостью.

Для воспроизведения высоких значений пористости частицы генерировались в цилиндрической области стандартного начального размера, после чего один из торцов цилиндра перемещался (по типу поршня) на расстояние, обеспечивающее нужную среднюю пористость в оставшемся объеме. Такое движение приводило оказавшиеся на пути поршня частицы в движение и нарушало равномерное распределение частиц по слою. Чтобы восстановить однородность, частицы в цилиндре несколько раз «встряхивались»: им сообщались скорости, случайно распределенные по направлению и нормально – по модулю. Конечное расположение частиц устанавливалось после рассеяния кинетической энергии в результате соударений.

Таким образом были получены засыпки с естественной пористостью (0,39), а также со значениями в интервале от 0,45 до 0,62. Для рассмотрения более высоких значений пористости, которые соответствуют отдельным витающим частицам, предлагаемый метод теряет эффективность. Итоговое распределение частиц оказывается достаточно однородным за исключением пристеночных областей. Возле стенки, как хорошо известно, возникает структура с несколькими выраженными слоями частиц, параллельными плоскости стенки.

Вычисление угловых коэффициентов. Сформированная засыпка частиц используется для получения массива данных по угловым коэффициентам между парами частиц, а также между частицей и стенкой. Численный расчет угловых коэффициентов предполагает численное интегрирование дифференциальных угловых коэффициентов между элементарными элементами ΔF_{ij} на поверхности двух объектов (сфер) с площадью поверхности, соответственно, A_i и A_j

$$\Delta F_{ij} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi s^2} dA_j; F_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i, A_j} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi s^2} dA_j dA_i.$$

Для численного расчета в работе применялся метод разбиения видимой части поверхности по азимутальному и зенитному углам с равным шагом.

Для случая расчета угловых коэффициентов между частицей и стенкой в качестве поверхности последней выбирался диск, центрированный с проекцией частицы и лежащий в тангенциальной плоскости стенки (рис. 1, *b*).

Верификация и оптимизация точности. Для проверки корректности численной реализации метода результаты расчета были сопоставлены с известными асимптотическими случаями. Для углового коэффициента между двумя сферами $F_{сф}$ с отношением радиусов $R = r_1 / r_2$ и нормированным на радиус расстоянием $S = s / r_2$ получено [11] аналитическое выражение

$$F_{сф} = \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{S + R + 1} \right)^2} \right) \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{S + R + 1} \right)^2} \right) \left(\frac{R}{S + R + 1} \right)^{-2}.$$

Отличие формульных и расчетных значений составило менее 2 % для двух сфер с разбиением сеткой в 40 на 40 участков. При этом большая дискретизация существенно увеличивает время расчета.

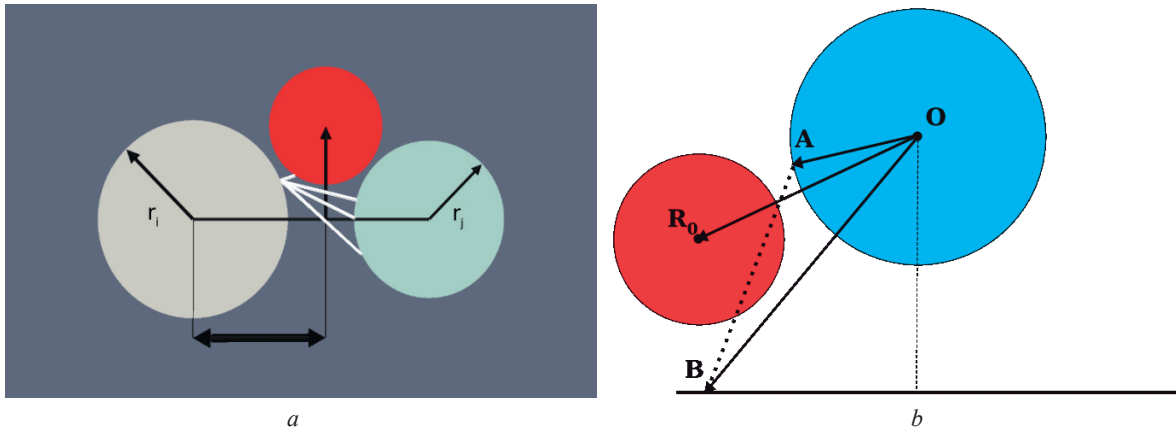


Рис. 1. Схема расчета угловых коэффициентов между частицами (а) и частицей и стенкой (b) с учетом наличия экранирующих частиц (красные)

Fig. 1. Sketch of view factor calculation between particles (a) and between particle and wall (b) with respect to obstructing particle (red)

Для угловых коэффициентов между сферой и стенкой были исследованы диаметр и число элементов сетки заменяющего стенку диска. В результате оптимизации производительности и точности для дальнейших расчетов был выбран диаметр диска $D = 4L$, а сетка разбивалась на 40 элементов в каждом направлении.

Результаты и их обсуждение. Угловые коэффициенты частицы со стенкой. Угловой коэффициент между частицей в засыпке и стенкой быстро падает с увеличением дистанции между ними в силу простых геометрических причин. Принимая во внимание используемые допущения физической модели (в частности, изотермичность частицы), в реальных расчетах значения углового коэффициента между частицей и стенкой меньше 10^{-2} – 10^{-3} можно считать равными 0 без ухудшения точности конечного теплового расчета.

Нам удалось выделить несколько параметров, с помощью которых можно сформулировать относительно простое выражение для углового коэффициента между частицей и стенкой.

Введем параметр нормализованного расстояния до стенки $L^* = H / r$, где H – расстояние от сферы до стенки (равно 0 в случае касания), а r – радиус частицы.

В области $F_{ex} > 0,05$ подходит простая линейная интерполяция, точность (до 10 %) которой приемлема в большинстве приложений DEM. Интерполяция справедлива для $L^* < 1,5$

$$F_{ex-lin} = 0,31 - 0,19L^* \tag{1}$$

Еще одной интерполяцией может выступать экспоненциальная функция в виде

$$F_{ex-exp} = 0,31e^{-1,2L^*}.$$

Экспоненциальная функция корректно описывает поведение углового коэффициента во всем диапазоне L^* .

Полученные выше формулы приемлемо описывают средние значения угловых коэффициентов и для полидисперсной засыпки частиц. В таком случае меньшие по размеру частицы имеют в среднем больший угловой коэффициент со стенкой, поскольку могут находиться ближе к ней.

Точность формулы (1) удалось улучшить, введя дополнительный параметр r^* : отношение размера рассматриваемой частицы r к среднему радиусу частиц смеси $\langle r \rangle$

$$r^* = (r - \langle r \rangle) / \langle r \rangle.$$

В таком случае формула для углового коэффициента принимает вид

$$F_{ex} = 0,31 - 0,19L^* - 0,10r^*.$$

В случае учета также такого параметра, как пористость слоя ε , удалось получить следующее, наиболее общее, выражение:

$$F_{\text{ex}} = 0,20 - 0,31L^* + 0,28\varepsilon + 0,31\varepsilon L^* = (0,20 + 0,28\varepsilon) - (0,31 - 0,31\varepsilon)L^*.$$

Угловые коэффициенты между частицами. В качестве основных параметров в случае рассмотрения угловых коэффициентов между частицами в засыпке выступали радиусы частиц и расстояние между ними.

При рассмотрении полидисперсных систем для сохранения консервативности постановки метод должен быть «симметричным», т. е. давать одно и то же значение теплового потока при рассмотрении любой частицы из пары, даже если их размеры не совпадают. Математически это означает условие

$$F_{i \rightarrow j} A_i = F_{j \rightarrow i} A_j. \quad (2)$$

Нами была получена зависимость углового коэффициента между частицами только для наиболее важного с практической точки зрения случая случайной упаковки полидисперсной засыпки (пористость 0,39). Она представляется в виде двух выражений.

Для частицы j с радиусом r_j , находящейся в прямом контакте с частицей i радиусом r_i ,

$$F_{i-j,\text{dir}} = 0,23(r_i / r_j + 0,852)^{-1,8}.$$

Для всех остальных частиц – общая зависимость

$$F_{i-j,\text{indir}} = \exp^{-3,22-0,56L^*+1,40L^{*2}}. \quad (3)$$

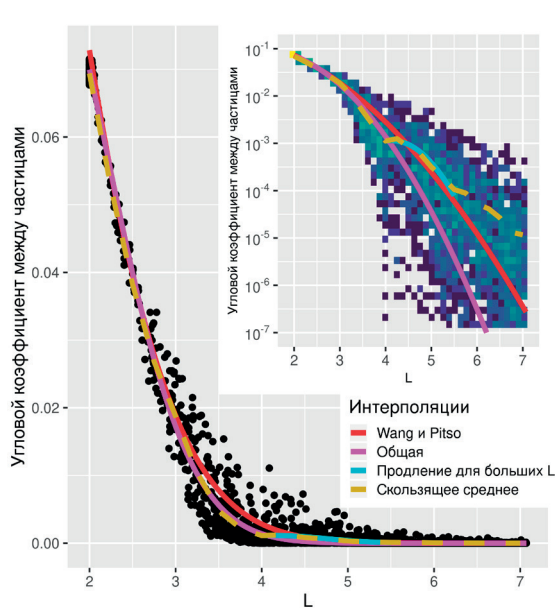


Рис. 2. Угловые коэффициенты между частицами в монодисперсной засыпке с естественной пористостью в зависимости от L (отношение расстояния между центрами частиц к радиусу) и предложенные интерполяционные функции для этой зависимости (на врезке с логарифмическим масштабом также цветом представлена плотность вероятности для значений углового коэффициента)

Fig. 2. Particle-particle view factors in monodisperse close random packing as a function of L (ratio of distance between particle centers and their radius) and suggested interpolation functions. In the logarithmic scale sidebar plot probability distribution is depicted by color

В области $L = \frac{d}{\langle r \rangle} > 4$ можно локально заменить (3) более подходящей функцией

$$F_{i-j,\text{indir}} = \exp^{-31,6-1,45L^*+12,0L^{*2}}, \quad (4)$$

где d – дистанция между центрами частиц; $\langle r \rangle$ – средний радиус частиц засыпки.

Для полидисперсной засыпки частиц (3) используется при $r_i < r_j$, в обратном случае – преобразуется заменой порядка частиц согласно (2).

На рис. 2 представлено распределение угловых коэффициентов, полученное путем прямого расчета для большого числа монодисперсных частиц в плотной упаковке. Известная ранее [10] интерполяция точно описывает зависимость для небольших расстояний между частицами ($L < 3$). Предложенную в данной работе общую интерполяцию (3) следует использовать до $L \leq 4$, для описания на интервале $4 \leq L \leq 5,5$ следует использовать отдельное выражение (4).

Важнейшим вопросом является выбор дистанции отсечения, дальше которой перенос излучением между частицами не учитывается. В предыдущих работах детального анализа этого параметра не проводилось, а критерием выступала малость коэффициента между двумя частицами. Действительно, с ростом расстояния средний угловой коэффициент экспоненциально падает; однако квадратично растет количество частиц, приходящихся

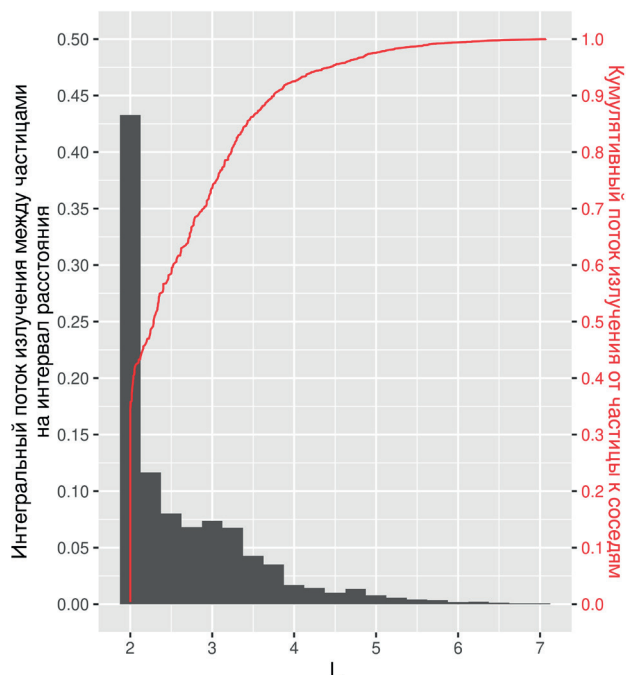


Рис. 3. Гистограмма распределения доли общего потока излучения, приходящейся на соседние частицы с расстоянием до центра, лежащим в данном интервале; график – кумулятивная сумма этой величины до данного расстояния

Fig. 3. Histogram of radiative flux portion attributed to particles with distance in current bin; plot is cumulative sum of aforementioned quantity

В связи с этим мы рекомендуем устанавливать дистанцию отсечения L от 4 до 5 в зависимости от требуемой точности расчета, что позволит корректно учитывать свыше 90 % теплового потока от частиц.

Верификация. Для верификации результатов моделирования мы сравнили результаты расчета по предложенным формулам с данными по угловым коэффициентам между частицами в засыпке, полученными [12] прямым численным расчетом для двух случайных частиц в засыпке. Как видно на рис. 4, имеет место как качественное, так и количественное совпадение с предложенными в работе формулами.

Заключение. Предложен метод расчета радиационного теплопереноса в засыпках частиц, совместимый с методом дискретных элементов и основанный на зависимости коэффициента видимости от расстояния между частицами, пористости засыпки, дисперсионного состава засыпки, коэффициента черноты.

Проведена валидация метода по данным стационарной и нестационарной тепловых задач на стендах-демонстраторах с графитовой засыпкой. Сочетание производительности и точности расчета является лучшим из подобных существующих методов.

Благодарности. Работа частично была выполнена при поддержке БРФФИ в рамках проекта T17PM-109.

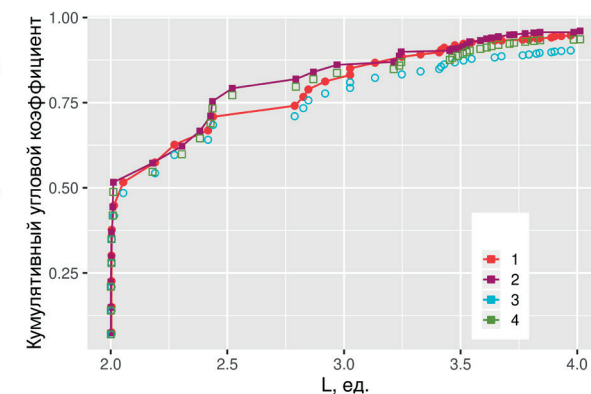


Рис. 4. Кумулятивная сумма угловых коэффициентов между частицами в плотной засыпке: 1, 2 – данные расчета из [12]; 3, 4 – расчет для тех же положений частиц по (3)

Fig. 4. Cumulative view factors of selected particle to its neighbours: 1, 2 – data from [12]; 3, 4 – calculation for the same particle positions using (3)

на единицу дистанции. В результате суммарный поток поглощаемого излучения падает не так быстро.

На рис. 3 видно, что хотя значительная часть поглощаемого потока излучения приходится на ближайших соседей, на достаточно далекие частицы ($L > 3$) приходится как минимум 25 % потока.

Acknowledgements. This work is partially supported by BRFFR under the grant T17PM-109.

Список использованных источников

1. Discrete particle simulation of particle–fluid flow: model formulations and their applicability / Z. Y. Zhou [et al.] // J. Fluid Mech. – 2010. – Vol. 661. – P. 482–510. <https://doi.org/10.1017/s002211201000306x>
2. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM / C. Kloss [et al.] // Prog. Comput. Fluid Dyn. An Int. J. – 2012. – Vol. 12, N 2/3. – P. 140. <https://doi.org/10.1504/pcfd.2012.047457>
3. Zhou, Z. Y. Particle scale study of heat transfer in packed and bubbling fluidized beds / Z. Y. Zhou, A. B. Yu, P. Zulli // AIChE J. – 2009. – Vol. 55, N 4. – P. 868–884. <https://doi.org/10.1002/aic.11823>

4. Peters, B. Simulation of thermal conversion of solid fuel by the discrete particle method / B. Peters, A. Džiugys, R. Navakas // *Lith. J. Phys.* – 2011. – Vol. 51, N 2. – P. 91–105. <https://doi.org/10.3952/lithjphys.51204>
5. Cheng, G. J. Particle Scale Evaluation of the Effective Thermal Conductivity from the Structure of a Packed Bed: Radiation Heat Transfer / G. J. Cheng, A. B. Yu // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2013. – Vol. 52, N 34. – P. 12202–12211. <https://doi.org/10.1021/ie3033137>
6. Fully parallel, OpenGL-based computation of obstructed area-to-area view factors / S. C. Kramer [et al.] // *J. Build. Perform. Simul.* – 2015. – Vol. 8, N 4. – P. 266–281. <https://doi.org/10.1080/19401493.2014.917700>
7. Forgber, T. A novel approach to calculate radiative thermal exchange in coupled particle simulations / T. Forgber, S. Radl // *Powder Technol.* – 2018. – Vol. 323. – P. 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.014>
8. Kang, H. H. A data driven artificial neural network model for predicting radiative properties of metallic packed beds / H. H. Kang, M. Kaya, S. Hajimirza // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2019. – Vol. 226. – P. 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.01.013>
9. Pitso, M. L. Characterisation of long range radiation heat transfer in packed pebble beds / M. L. Pitso. – Pretoria, 2011. – 108 p.
10. Wang, X. A prediction model for the effective thermal conductivity of mono-sized pebble beds / X. Wang, J. Zheng, H. Chen // *Fusion Eng. Des.* – 2016. – Vol. 103. – P. 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.12.051>
11. Howell, J. R. Thermal Radiation Heat Transfer / J. R. Howell, M. P. Menguc, R. Siegel. – 6th ed. – CRC Press, 2015. – 1016 p. <https://doi.org/10.1201/b18835>
12. Feng, Y. T. An accurate evaluation of geometric view factors for modelling radiative heat transfer in randomly packed beds of equally sized spheres / Y. T. Feng, K. Han // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2012. – Vol. 55, N 23–24. – P. 6374–6383. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.025>

References

1. Zhou Z. Y., Kuang S. B., Chu K. W., Yu. A. B. Discrete particle simulation of particle–fluid flow: model formulations and their applicability. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, vol. 661, pp. 482–510. <https://doi.org/10.1017/s002211201000306x>
2. Kloss C., Goniva C., Hager A., Amberger S., Pirker S. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 2012, vol. 12, no. 2/3, pp. 140. <https://doi.org/10.1504/pcfd.2012.047457>
3. Zhou Z. Y., Yu A. B., Zulli P. Particle scale study of heat transfer in packed and bubbling fluidized beds. *AIChE Journal*, 2009, vol. 55, no. 4, pp. 868–884. <https://doi.org/10.1002/aic.11823>
4. Peters B., Džiugys A., Navakas R. Simulation of thermal conversion of solid fuel by the discrete particle method. *Lithuanian Journal of Physics*, 2011, vol. 51, no. 2, pp. 91–105. <https://doi.org/10.3952/lithjphys.51204>
5. Cheng G. J., Yu A. B. Particle Scale Evaluation of the Effective Thermal Conductivity from the Structure of a Packed Bed: Radiation Heat Transfer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, vol. 52, no. 34, pp. 12202–12211. <https://doi.org/10.1021/ie3033137>
6. Kramer S. C., Gritzki R., Perschke A., Rösler M., Felsmann C. Fully parallel, OpenGL-based computation of obstructed area-to-area view factors. *Journal of Building Performance Simulation*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 266–281. <https://doi.org/10.1080/19401493.2014.917700>
7. Forgber T., Radl S. A novel approach to calculate radiative thermal exchange in coupled particle simulations. *Powder Technology*, 2018, vol. 323, pp. 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.014>
8. Kang H. H., Kaya M., Hajimirza S. A data driven artificial neural network model for predicting radiative properties of metallic packed beds. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, vol. 226, pp. 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.01.013>
9. Pitso M. L. *Characterisation of long range radiation heat transfer in packed pebble beds*. Pretoria, 2011. 108 p.
10. Wang X., Zheng J., Chen H. A prediction model for the effective thermal conductivity of mono-sized pebble beds. *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 103, pp. 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.12.051>
11. Howell J. R., Menguc M. P., Siegel R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 6th ed. CRC Press, 2015. 1016 p. <https://doi.org/10.1201/b18835>
12. Feng Y. T., Han K. An accurate evaluation of geometric view factors for modelling radiative heat transfer in randomly packed beds of equally sized spheres. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 23–24, pp. 6374–6383. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.025>

Информация об авторе

Малиновский Андрей Игоревич – мл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a_malin@hmti.ac.by.

Information about the author

Malinouski Andrei Iharavich – Junior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a_malin@hmti.ac.by.