

УДК 669.041:536.331.001.573

УСКОРЕННАЯ ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВТОРЯЕМОСТИ ТРАЕКТОРИЙ ЛУЧЕЙ*

*Коптелов Р.П., младший научный сотрудник кафедры автоматики (r-koptelov@mail.ru)
Конашкова А.М., к.т.н., доцент кафедры философии*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Трассировка лучей используется в расчетах лучистого теплообмена в качестве метода учета экранирования излучения, а также для вычисления угловых коэффициентов излучения. Трассировка лучей на конечно-элементной сетке предполагает вычисление списка пройденных ячеек и пересеченных граней на пути луча. В стандартном методе трассировки лучей для определения следующей ячейки проверяется пересечение луча с каждой из возможных граней текущей ячейки, до которой дошел луч. Предложен метод ускоренной трассировки лучей, основанный на том, что каждый текущий луч проходит по близкой траектории к предыдущему лучу и должен в начале траектории пересекать те же грани и ячейки сетки, которые пересекает и предыдущий луч. Для каждого луча при определении следующей ячейки на его пути сначала проверяется пересечение с гранью, которую пересек предыдущий испущенный луч. Если пересечение найдено, то другие грани не проверяются. Если луч не пересекает выбранную грань сетки, проверяются оставшиеся грани в соответствии со стандартным методом. Предложенный метод протестирован для вычисления геометрических коэффициентов излучения на модели секционной печи с использованием шестигранной сетки. При тестировании применялись как детерминированный, так и случайный способы выбора направлений лучей. Использовалось различное количество лучей, испускаемых с каждой грани сетки, участвующей в теплообмене излучением (стенки печи, поверхности заготовок и ролика). Показана эффективность метода при детерминированном выборе направлений, которая увеличивается с ростом количества лучей. При проведении тестов использовалось от 221 тыс. до 88 млн лучей. Показано, что во многих случаях (от 19,6 до 71,4 %) достаточно проверить пересечение луча лишь с одной из пяти граней ячейки, и первая проверенная грань имеет пересечение с лучом. Предложенный метод не оказывает влияния на точность результатов и дает выигрыш в скорости до 30 %.

Ключевые слова: теплообмен излучением, трассировка лучей, экранирование излучения, угловые коэффициенты, сетка, секционная печь, метод Монте-Карло.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-13-18

При использовании упрощенных моделей технических систем, таких как металлургические печи и другие высокотемпературные агрегаты, часто допускается, что излучение беспрепятственно проходит от одной зоны к другой, от излучающей поверхности или объема газа к поглощающей. В реальности большинство систем имеет сложную геометрию, в которой излучение экранируется, блокируется имеющимися в системе препятствиями: заготовками, стенками самой печи. Наличие неучтенных препятствий на пути излучения может привести к существенным погрешностям при определении тепловых потоков, температур или угловых коэффициентов излучения. В частности, две площадки, участвующие в теплообмене, могут частично или полностью «не видеть» друг друга, что необходимо учитывать при расчетах.

Трассировка лучей является, во-первых, методом учета экранирования излучения, и, во-вторых, методом расчета угловых коэффициентов излучения [1]. Существует множество методов расчета угловых коэффициентов излучения [2 – 8], в том числе аналитичес-

кое решение [9], однако в случае с наличием препятствий на пути излучения неотъемлемой частью расчетов является трассировка лучей.

Геометрический угловой коэффициент F_{12} характеризуется долей лучей, испущенных с поверхности 1 и попавших на поверхность 2:

$$F_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (1)$$

где N – количество испущенных лучей; w_i – вес i -го луча, который определяется методом испускания (выбора направлений) лучей; $\delta = 1$, если испущенный луч попадает на поверхность 2 и $\delta = 0$, если луч попадает на другую поверхность. Наиболее часто приводится формула для случая равных весов [10]:

$$F_{12} = \frac{N_\delta}{N}, \quad (2)$$

где N_δ – количество лучей, пересекающих площадку 2.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №14-08-31080.

Наибольшее развитие трассировка лучей получила в области компьютерной графики [11, 12]. Разработаны методы трассировки лучей на различных типах структурированных и неструктурированных сеток [13 – 17]. В данной работе за основу взят следующий стандартный метод трассировки лучей на конечно-элементной сетке, наиболее известный в области лучистого теплообмена [18].

1. Трассировка начинается с выбора точки испускания луча и грани сетки, которой принадлежит эта точка. Для трассировки используется вся заранее вычисленная и хранимая информация о соответствии между гранями и ячейками сетки.

2. Определяется смежная с гранью ячейка, через которую проходит луч.

3. Определяются остальные грани, принадлежащие данной ячейке.

4. Проверяется пересечение луча с каждой гранью, с которой пересечение возможно до тех пор, пока не будет определена грань, которую пересекает луч. Использовался алгоритм, описанный в работах [19, 20], однако может использоваться и другой алгоритм, например разбиение четырехугольной грани на два треугольника и пересечение луча с треугольниками. В используемом алгоритме сначала вычисляется точка пересечения луча с плоскостью грани. Затем проверяется, находится ли точка пересечения внутри четырехугольника [19], ограничивающего данную грань, при этом четырехугольник представляется в виде пересечения четырех полуплоскостей. Если точка принадлежит всем четырем полуплоскостям (находится по одну и ту же сторону от всех четырех отрезков, упорядоченных по часовой или против часовой стрелки), то она принадлежит четырехугольнику [20] (рис. 1).

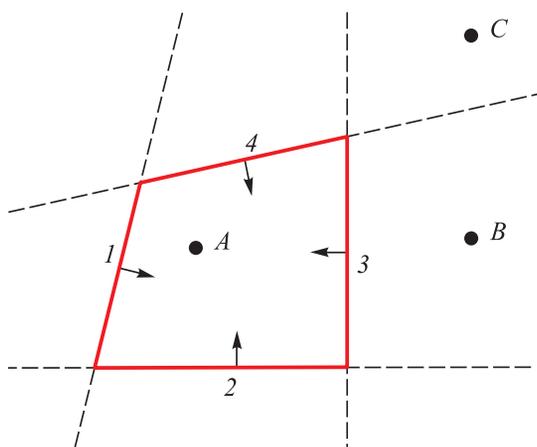


Рис. 1. Проверка принадлежности точки четырехугольнику: точка *A* принадлежит всем полуплоскостям; точка *B* – всем, кроме третьей полуплоскости; точка *C* – только первой и второй полуплоскости

Fig. 1. Point in quadrilateral test: point *A* belongs to all halfplanes, point *B* belongs to all halfplanes except 4th; point *C* belongs to halfplanes 1 and 2

5. Если пересекаемая лучом грань является границей твердой поверхности (стенкой печи или заготовки) или границей сетки, то луч поглощается ей или отражается – в зависимости от граничных условий. При поглощении луча дальнейшая его трассировка не требуется.

6. Если пересекаемая лучом грань не является границей твердой поверхности, то по номеру грани определяется номер следующей ячейки на пути луча.

7. Шаги 3 – 6 повторяются до тех пор, пока луч не достигнет границы твердой поверхности или границы сетки.

Использование повторяемости траекторий лучей

В данной работе лучи испускаются из центра каждой излучающей поверхности, включая стенки печи и заготовок. Используются две схемы испускания лучей: детерминированный выбор направлений и метод Монте-Карло. Лучи испускаются по направлению к некоторым заданным точкам на поверхности полусферы. В качестве направлений выбираются направляющие косинусы данной точки на поверхности полусферы (рис. 2). При детерминированном выборе направлений

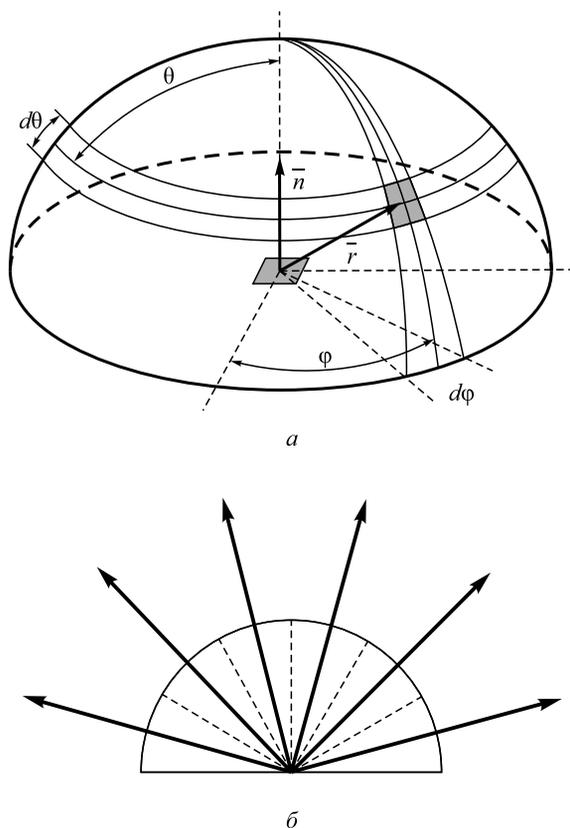


Рис. 2. Выбор направления испускания лучей: *a* – разбиение угловых интервалов на полусфере (\vec{n} – нормаль к излучающей поверхности, \vec{r} – вектор направления луча); *б* – иллюстрация равных угловых интервалов

Fig. 2. Choosing ray directions: *a* – subdivision of hemisphere into angular intervals; *б* – equal angular intervals; \vec{n} – normal vector to emitting surface, \vec{r} – ray direction

интервалы 180° двух углов θ и φ делятся на равные подынтервалы $d\theta$ и $d\varphi$, лучи направляются в центры этих подынтервалов. В методе Монте-Карло значения углов θ и φ выбираются случайным образом.

Предлагаемый метод ускоренной трассировки лучей применим при детерминированном выборе направлений и основан на том, что каждый текущий луч проходит по близкой траектории к предыдущему лучу, и, возможно, в начале траектории пересекает те же грани и ячейки сетки, которые пересекает и предыдущий луч (рис. 3).

Здесь траектория луча состоит из списка последовательно пересеченных граней и списка последовательно пройденных ячеек. Список граней и ячеек сохраняется для предыдущего луча. Хранить список граней и ячеек для всех предшествующих лучей не нужно, так как траектория текущего луча сравнивается только с траекторией одного предыдущего луча. На рис. 3 изображены лучи R_1 и R_2 , пересекающие в начале пути одни и те же грани и ячейки. После трассировки луча R_1 сохраняется список граней $F_1, F_2, F_3, F_4, F_6, F_8$ и ячеек C_1, C_2, C_3, C_4, C_6 . Когда начинается процесс трассировки луча R_2 , он может пересечь грани F_2 или F_{11} . В стандартном методе трассировки лучей используется какой-либо порядок проверки граней, например, сначала проверяется (в трехмерном случае) верхняя грань, затем нижняя и т. д.

Основная идея предлагаемого метода состоит в том, чтобы сначала проверить пересечение луча с той гранью, которую пересек предыдущий луч (здесь F_2 вместо F_{11}). Если текущий луч пересекает ту же грань, которую пересек предыдущий луч, остальные грани

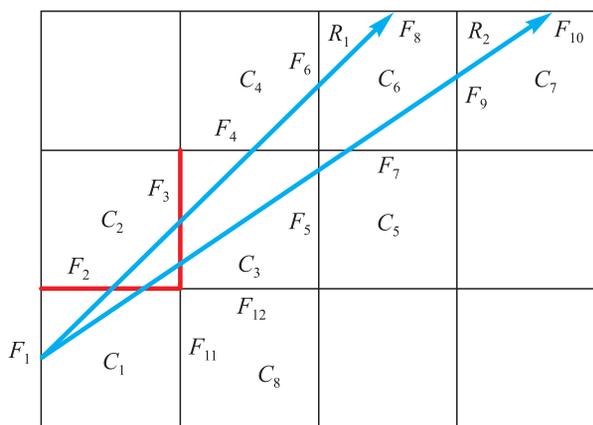


Рис. 3. Два луча, пересекающие в начале пути одни и те же грани и ячейки (оба луча пересекают ячейки C_1, C_2, C_3 и грани F_2, F_3 в одной и той же последовательности):

R_1, R_2 – номера лучей; $F_1 - F_{12}$ – номера граней; $C_1 - C_8$ – номера ячеек; жирные линии – грани, пересекаемые обоими лучами

Fig. 3. Two rays intersect the same faces and cells in the beginning of their tracks: both rays intersect cells C_1, C_2, C_3 and faces F_2, F_3 with the same sequence:

R_1, R_2 – ray numbers; $F_1 - F_{12}$ – face numbers; $C_1 - C_8$ – cell numbers. Faces intersected by both rays are marked bold

текущей ячейки можно не проверять. Определяется следующая по ходу луча ячейка и процесс повторяется. Если текущий луч пересек другую грань, то это означает, что траектория текущего луча отошла достаточно далеко от траектории предыдущего луча и дальнейшая трассировка текущего луча продолжается по стандартному алгоритму. Однако в любом случае следующий луч будет трассироваться на основе траектории текущего луча.

Схема и результаты численного эксперимента

Предложенный метод трассировки лучей проверен на модели секционной печи, представленной на рис. 4. Используется упрощенная модель: цилиндрические заготовки и ролик заменены на параллелепипеды.

Сведения о модели

Количество узлов сетки по осям x, y, z : $23 \times 15 \times 14$

Количество поверхностных элементов сетки по осям x, y, z : $22 \times 14 \times 13$

Всего узлов: 5760

Всего объемных элементов (ячеек) сетки: 4004

Всего поверхностей, участвующих в теплообмене излучением (стенки печи, поверхности заготовок и ролика): 2216

Угловых коэффициентов: $2216^2 = 4,9 \cdot 10^6$

Угловых коэффициентов, которые нужно рассчитывать (с учетом правила взаимности и условия выпуклости всех поверхностей): $2,45 \cdot 10^6$.

Результаты сравнения скорости работы двух методов: предложенного метода, использующего повторяемость траекторий лучей, и стандартного метода приведены в таблице. Всего было трассировано от 221 тыс. до 88 млн лучей. Лучи испускались из центров излучающих площадок. Тесты проводились на компьютере Intel Pentium II 1,83 ГГц. Здесь процент угадываний пересеканной грани – сколько раз потребовалось проверить только одну грань ячейки (в % от общего числа проверок).

При использовании метода Монте-Карло направления испускания лучей выбираются случайным образом и поэтому каждый луч идет по существенно отличной траектории от предыдущего луча. Независимо от количества испускаемых лучей достигнут низкий процент угадываний (3,3 – 3,9 %), при этом сам предлагаемый метод сложнее, чем стандартный метод трассировки лучей. Поэтому при случайном выборе направлений метод с использованием повторяемости траекторий лучей требует даже больше времени, чем стандартный метод на 2,8 – 6,4 %.

При детерминированном выборе направлений процент угадываний пересеканной грани увеличивается с ростом числа испускаемых лучей от 19,6 % при испускании 100 лучей с каждой поверхности до 71,4 % при испускании 40 тыс. лучей с каждой поверхности. В последнем случае выигрыш по времени составляет 30,3 %.

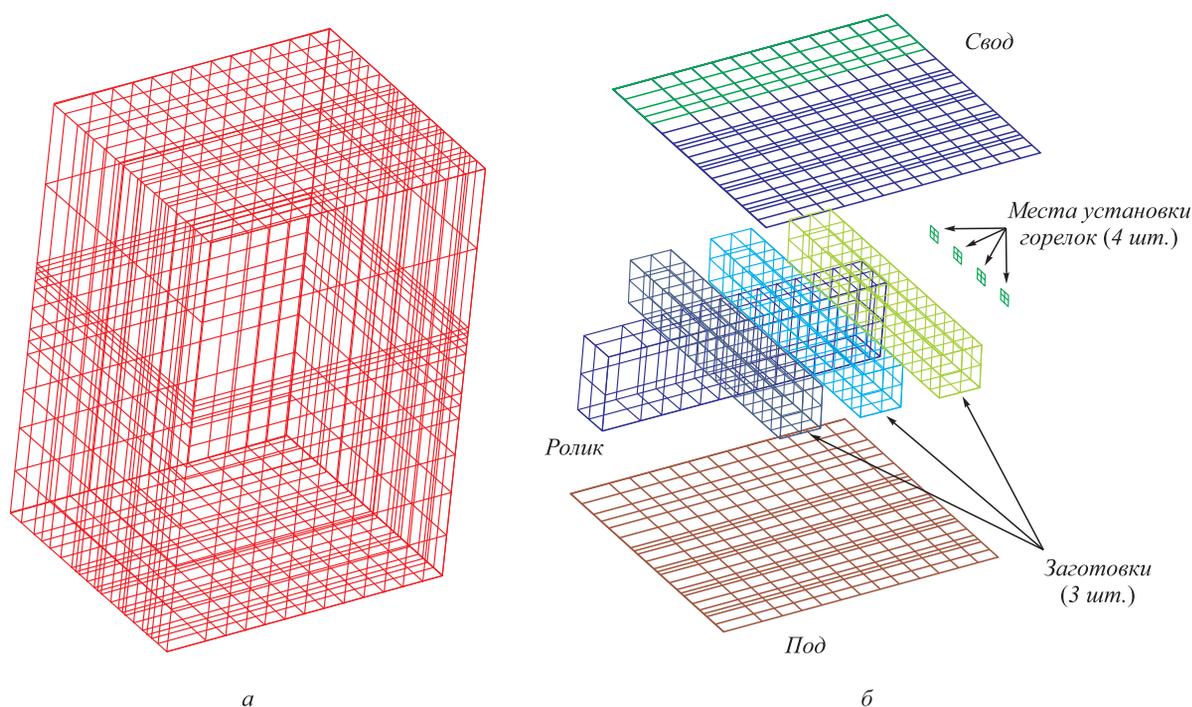


Рис. 4. Модель секционной печи шаропрокатного цеха:
 а – общий вид сетки; б – конструкция (показаны заготовки, ролик и места установки горелок)

Fig. 4. Sectional furnace model:
 a – general mesh view, б – construction (bills, roll and burner slots are shown)

Время вычисления угловых коэффициентов излучения с помощью трассировки лучей

Time of view factors calculation using ray tracing

Количество лучей из каждой излучающей поверхности	Детерминированный выбор направлений			Случайный выбор направлений		
	угадываний, %	стандартный метод, с	предложенный метод, с (уменьшение времени от стандартного метода, %)	угадываний, %	стандартный метод, с	предложенный метод, с (увеличение времени от стандартного метода, %)
100	19,6	1,632	1,629 (-0,2 %)	3,3	1,958	2,083 (+6,4 %)
900	36,5	13,590	12,300 (-9,5 %)	3,9	16,89	17,36 (+2,8 %)
10 000	58,2	133,73	103,17 (-22,9 %)	3,9	170,34	177,94 (+4,5 %)
40 000	71,4	527,3	367,39 (-30,3 %)	3,9	675,56	707,56 (+4,7 %)

Выводы. Предложен метод ускоренной трассировки лучей, основанный на том, что каждый текущий луч проходит по близкой траектории к предыдущему лучу, и, возможно, в начале траектории пересекает те же грани и ячейки сетки, которые пересекает и предыдущий луч. Для каждого луча при определении следующей ячейки на его пути сначала проверяется пересечение с гранью, которую пересек предыдущий испущенный луч. Если пересечение найдено, то другие грани не проверяются. Оставшиеся грани проверяются иначе, как в стандарт-

ном методе трассировки лучей. Предложенный метод протестирован на модели секционной печи и показал свою эффективность при использовании совместно с детерминированным выбором направлений испускания лучей (достигнут выигрыш в скорости 30,3 %). При этом метод не оказывает влияния на точность вычислений, так как заключается в том, что меняется только порядок проверки пересекаемых граней, но не количество лучей или их траектории. Предложенный метод может применяться и для моделей с тетраэдральной сеткой, а

также в системах с непрозрачной средой и при испускании лучей из объемных зон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маликов Г.К., Лисиенко В.Г., Коптелов Р.П. Методы трассировки лучей для определения угловых коэффициентов излучения в промышленных сложных геометриях // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 53 – 59.
2. Emery A.F., Johansson O., Lobo M., Abrous A. A comparative study of methods for computing the diffuse radiation view factors for complex structures // ASME journal of heat transfer. 1991. No. 113. P. 413 – 422.
3. Walton G.N. Calculation of obstructed view factors by adaptive integration. Washington: National institute of standards and technology – NISTIR 6925, 2002. – 20 p.
4. Modest M.F. Radiative heat transfer. – New York: Academic press, 2003. – 822 p.
5. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative Transfer. – New York: McGraw-Hill, 1967. – 410 p.
6. Mitalas G.P., Slesphenson D.G. Fortran IV programs to calculate radiant interchange factors. NRC of Canada, Ottawa, DBR-25. 1966. – 30 p.
7. DiLaura D.L. New procedures for calculating diffuse and non-diffuse radiative exchange form factors. Proc. 33-rd. National heat transfer conf. Albuquerque. 1999. P. 99 – 107.
8. Cohen M.F., Greenberg D.P. Aradiosity solution for complex environments // ACM SIGGRAPH. 1985. No. 19(3). P. 31 – 40.
9. Schroder P., Hanrahan P. A closed form expression for the form factor between two polygons. Department of computer science, Princeton university, technical report CS-404-93. 1993. – 12 p.
10. Naeimi H., Kowsary F. Simplex ray-object intersection algorithm as ray tracer for Monte Carlo simulations in radiative heat transfer analysis // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 38. P. 99 – 107.
11. Graphics Gems II. Arvo J. ed. New York: Academic Press, 1991. – 473 p.
12. Wald I., Mark W.R., Gunther J. etc. State of the art in ray tracing animated scenes // Computer graphics forum. 2009. Vol. 28 No. 6. P. 1691 – 1722.
13. Cosenza B. A survey on exploiting grids for ray tracing // Eurographics Italian Chapter Conference. 2008.
14. Marmitt G., Slusallek P. Fast ray traversal of tetrahedral and hexahedral meshes for direct volume rendering // Eurographics IEEE-VGTC Symposium on Rendering, 2006.
15. Favre J., Lohner R. Ray tracing with a space-filling finite element mesh // International journal for numerical methods in engineering. 1994. Vol. 37. P. 3571 – 3580.
16. Lagae A., Dutre P. Accelerating ray tracing using constrained tetrahedralizations // Eurographics Symposium on Rendering. 2008. Vol. 27. No. 4. P. 1303 – 1312.
17. Marmitt G., Slusallek P. Fast ray traversal of unstructured volume data using Plucker tests. Computer Graphics Lab, Saarland University. Technical report. 2005. – 8 p.
18. Mazumder S. Methods to accelerate ray tracing in the Monte Carlo method for surface-to-surface radiation transport // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 2009. Vol. 128 No. 9. P. 945 – 952.
19. Badouel D. An efficient ray-polygon intersection / Graphics Gems I. – New York: Academic Press, 1990. P. 390 – 393.
20. Haines E. Point in Polygon Strategies / Graphics Gems IV. – New York: Academic Press, 1995. P. 24 – 46.

Поступила 13 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 1, pp. 13–18.

ACCELERATED RAY TRACING FOR RADIATIVE HEAT TRANSFER MODELING: USING REPETITION OF RAY TRACKS

R.P. Koptelov, A.M. Konashkova

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Ray tracing is used in radiative heat transfer calculations for utilizing presence ray obstructions and for view factors calculation. Ray tracing with finite-element mesh supposes determination of traversed cells and intersected faces along the ray. In standard ray tracing next cell is determined by searching cell's intersected face among several cell faces. A new accelerated method of ray tracing is proposed. The method is based on assumption that track of each current ray is close to track of previous ray and current ray may intersect the same faces and cells as previous ray does. For current ray and current cell the face is firstly checked for intersection which was intersected by previous ray. If ray intersects that face, other faces are not checked. If ray doesn't intersect checked face, remain faces are checked like with standard method. Proposed method was tested for view factors calculation with model of sectional furnace with hexahedral mesh. Both deterministic and Monte-Carlo methods were used for choosing ray directions. Various numbers of rays were tested to emit from each mesh face that involves in radiative heat transfer (furnace bounds, surface of billets and roll). The method gives acceleration if ray directions are chosen deterministically, and the acceleration increases as number of rays increases. It is shown that in many cases (from 19.6 % to 71.4 %) it is enough to check intersection with only one of five faces, and first checked face is intersected by checked ray. The method doesn't affect the accuracy and gives up to 30 % of acceleration.

Keywords: radiative heat transfer, ray tracing, ray obstruction, view factors, mesh, sectional furnace, Monte-Carlo method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-13-18

REFERENCES

1. Malikov G.K., Lisienco V.G., Koptelov R.P. Azimuth beams tracing methods for slope emissivity determination at conditions of industrial complex geometries. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2010, no. 7, pp. 53–59. (In Russ.).
2. Emery A.F., Johansson O., Lobo M., Abrous A. A comparative study of methods for computing the diffuse radiation view factors for complex structures. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1991, no. 113, pp. 413-422.
3. Walton G.N. *Calculation of obstructed view factors by adaptive integration*. Washington: National institute of standards and technology – NISTIR 6925, 2002, 20 p.
4. Modest M.F. *Radiative heat transfer*. New York: Academic press, 2003, 822 p.
5. Hottel H.C., Sarofim A.F. *Radiative Transfer*. New York: McGraw-Hill, 1967, 410 p.
6. Mitalas G.P., Slesphenson D.G. *Fortran IV programs to calculate radiant interchange factors*. NRC of Canada, Ottawa, DBR-25. 1966, 30 p.
7. DiLaura D.L. New procedures for calculating diffuse and non-diffuse radiative exchange form factors. *Proc. 33-rd. National heat transfer conf. Albuquerque*. 1999, pp. 99–107.
8. Cohen M.F., Greenberg D.P. A radiosity solution for complex environments. *ACM SIGGRAPH*. 1985, no. 19(3), pp. 31–40.

9. Schroder P., Hanrahan P. *A closed form expression for the form factor between two polygons*. Department of computer science, Princeton university, technical report CS-404-93. 1993, 12 p.
 10. Naeimi H., Kowsary F. Simplex ray-object intersection algorithm as ray tracer for Monte Carlo simulations in radiative heat transfer analysis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011, vol. 38, pp. 99–107.
 11. *Graphics Gems II*. Arvo J. ed. New York: Academic Press, 1991, 473 p.
 12. Wald I., Mark W.R., Gunther J., Boulos S., Ize T. etc. State of the art in ray tracing animated scenes. *Computer graphics forum*. 2009, vol. 28, no. 6, pp. 1691–1722.
 13. Cosenza B. A survey on exploiting grids for ray tracing. *Eurographics Italian Chapter Conference*, 2008.
 14. Marmitt G., Slusallek P. Fast ray traversal of tetrahedral and hexahedral meshes for direct volume rendering. *Eurographics IEEE-VGTC Symposium on Rendering*, 2006.
 15. Favre J., Lohner R. Ray tracing with a space-filling finite element mesh. *International journal for numerical methods in engineering*. 1994, vol. 37, pp. 3571–3580.
 16. Lagae A., Dutre P. Accelerating ray tracing using constrained tetrahedralizations. *Eurographics Symposium on Rendering*. 2008, vol. 27, no. 4, pp. 1303–1312.
 17. Marmitt G., Slusallek P. *Fast ray traversal of unstructured volume data using Plucker tests*. Computer Graphics Lab, Saarland University. Technical report. 2005, 8 p.
 18. Mazumder S. Methods to accelerate ray tracing in the Monte Carlo method for surface-to-surface radiation transport. *Trans. ASME. J. Heat Transfer*. 2009, vol. 128, no. 9, pp. 945–952.
 19. Badouel D. An efficient ray-polygon intersection. In: *Graphics Gems I*. New York: Academic Press, 1990, pp. 390–393.
 20. Haines E. Point in polygon strategies. In: *Graphics Gems IV*. New York: Academic Press, 1995, pp. 24–46.
- Acknowledgements.** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the project no.14-08-31080.
- Information about the authors:**
- R.P. Koptelov**, Junior Researcher of the Chair “Automatics”
(r-koptelov@mail.ru)
- A.M. Konashkova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Philosophy

Received May 13, 2015