

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. С. Невский, Л. В. Ильчукова, О влиянии макрошероховатости на характер излучения поверхности,
ТВТ, 1968, том 6, выпуск 6, 1035–1039

<https://www.mathnet.ru/tvt6002>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.175

24 мая 2025 г., 19:44:42



УДК 536.3:535.34

О ВЛИЯНИИ МАКРОШЕРОХОВАТОСТИ НА ХАРАКТЕР ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

А. С. Невский, Л. В. Ильчукова

Рассмотрено влияние макрошероховатости поверхности на характер ее излучения. Дается решение для случая шероховатости в виде сферических и цилиндрических впадин, а также для поверхности, покрытой канавками треугольного сечения. Для шероховатых поверхностей, в которых соблюдается геометрическое подобие рельефа, влияние шероховатости на распределение и интенсивность излучения оказывается одинаковым. Разница заключается лишь в изменении шага неравномерностей в поле излучения вокруг излучающей поверхности.

Общие положения и зависимости. При изучении влияния шероховатости на излучение поверхности следует различать случаи макрошероховатости и микрошероховатости. Макрошероховатостью называется случай, когда величины выступов шероховатости или впадин и расстояния между ними значительно больше длин волн падающего излучения. Если же размеры указанных элементов поверхности соизмеримы с длинами волн, то имеет место микрошероховатость поверхности.

Влияние на излучение поверхности макрошероховатости определяется законами геометрической оптики. Влияние же микрошероховатости обуславливается в большей степени явлениями дифракции. Ниже рассматривается влияние на излучение поверхности ее макрошероховатости. При этом предполагается, что рельеф поверхности однороден, т. е. что элементы шероховатости повторяются по всей поверхности.

При таком рассмотрении шероховатой поверхности можно различать действительную поверхность, включающую в себя поверхность выступов и впадин шероховатости, и видимую поверхность. Последняя представляет собой поверхность, проведенную касательно к верхним точкам выступов шероховатости (рис. 1).

Делается допущение, что действительная поверхность тела изотермическая и что ее излучение нормально диффузное. Если сделать дополнительное допущение, что плотность отраженного излучения одинакова по всей действительной поверхности, то излучение видимой поверхности будет нормально диффузным, и видимая степень черноты окажется равной [1]

$$\varepsilon_{\text{в}} = \varepsilon / (\varepsilon + rF_0/F), \quad (1)$$

где ε — степень черноты действительной поверхности; $r = 1 - \varepsilon$ — отражательная способность поверхности; F — величина действительной поверхности; F_0 — величина видимой поверхности.

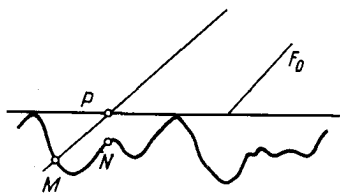


Рис. 1. Схема шероховатости поверхности

Яркость излучения в диатермической среде не меняется. Поэтому в точке P видимой поверхности она будет равна яркости в точке M действительной поверхности, находящейся на продолжении рассматриваемого луча. Яркость в точке M равна величине эффективного излучения элемента поверхности, находящегося в этой точке, деленного на π . Поэтому, чтобы определить поле яркостей какой-нибудь шероховатой поверхности, надо найти распределение плотностей эффективного излучения по ее действительной поверхности. Вместо поля яркостей излучения можно изучить поле степеней черноты, так как при заданной температуре они однозначно связаны друг с другом.

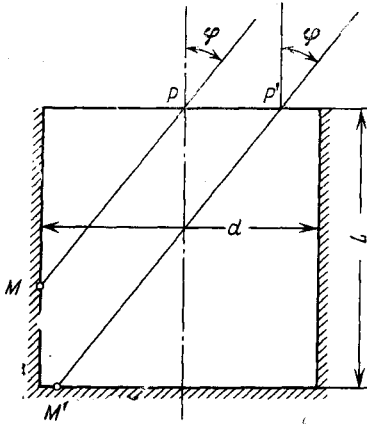


Рис. 2. Схема полости в виде цилиндра

Яркость излучения гладкой излучающей поверхности плавно меняется при изменении положения точки в пространстве и направления. Такое поле называем равномерным. Если поверхность негладкая, то поле излучения будет неравномерным. Величина яркости будет колебаться при изменении положения точки и направления луча. Шаг этих колебаний при изменении координат и направления будет тем меньше, чем больше будет отношение расстояния от точки наблюдения до поверхности к расстояниям

между элементами шероховатости. При большой величине этого отношения шаг колебаний яркостей будет очень малым.

Чувствительный элемент глаза или какого-то измерительного прибора имеет определенную площадь, и в него попадает не один луч, а целый пу-

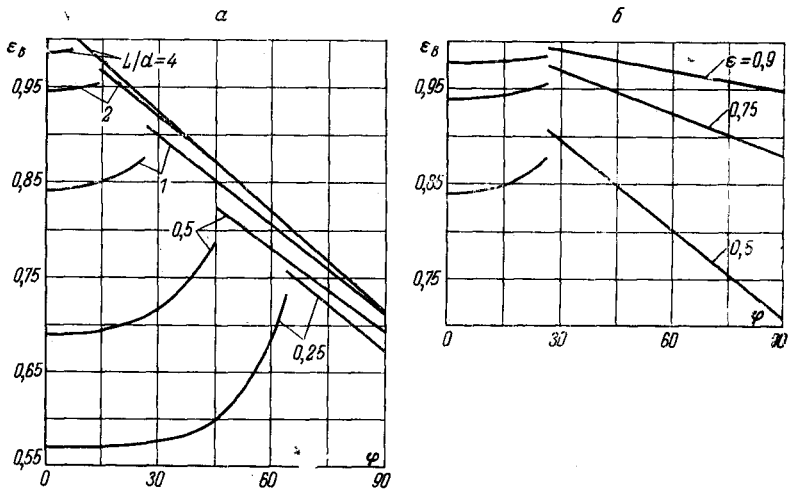


Рис. 3. Видимые степени черноты излучения цилиндрической полости для луча, проходящего через центр выходного сечения в зависимости от направления луча

а — для $\epsilon = 0,5$ с различными L/d , б — для $L/d = 1,0$ при различных ϵ

чок, проходящий через поверхность конечной величины, в определенном телесном угле. Поэтому при очень малых колебаниях в поле яркостей соответствующий чувствительный элемент будет воспринимать ее среднее значение.

Среднюю яркость можно получить путем ее усреднения по видимой поверхности излучающих элементов.

Эффективное излучение в какой-нибудь точке M поверхности складывается из собственного излучения $\epsilon\sigma T^4$ и отраженного $rE_{\text{пад}}$ в соответствии с известной формулой теории лучистого теплообмена [2]

$$E_{\text{пад}}(M) = \int_F E_{\text{эф}}(N) d\varphi_{M,N}, \quad (2)$$

где $E_{\text{эф}}$ и $E_{\text{пад}}$ — плотности эффективного и падающего излучений; $d\varphi_{M,N}$ — угловой коэффициент от элемента поверхности в точке M на элемент поверхности в точке N . Поэтому

$$E_{\text{эф}}(M) = \epsilon\sigma T^4 + r \int E_{\text{эф}}(N) d\varphi_{M,N}. \quad (3)$$

Интегрирование уравнения (3) дает решение задачи о распределении плотности эффективного излучения по действительной поверхности. Величина яркости в точке M , а следовательно, и в точке P , равна

$$B = E_{\text{эф}} / \pi. \quad (4)$$

Таким образом, решается задача о распределении по направлениям и поверхности яркостей излучения. Средняя для какого-нибудь направления яркость может быть получена из (4):

$$\bar{B} = \frac{1}{F} \int B dF. \quad (5)$$

Среднюю по поверхности и направлениям яркость можно найти, интегрируя (5):

$$\bar{\bar{B}} = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \bar{B} \cos \varphi d\omega. \quad (6)$$

Частные случаи. Общее решение задачи для всех видов шероховатости не может быть получено, так как характер излучения зависит от характера шероховатости. Решение задачи для каждого конкретного случая представляет значительные трудности, связанные с необходимостью решения интегрального уравнения (3). Ниже рассматриваются три простейших случая шероховатости.

Сферические полости. Излучающая поверхность покрыта впадинами, имеющими форму шарового сегмента.

Шаровая поверхность обладает той особенностью, что все локальные угловые коэффициенты с какой-нибудь точки поверхности на другую ее часть равны между собой [3]. В результате получается, что на изотермической поверхности плотности эффективного излучения ее повсюду одинаковы, и излучение впадины будет нормально диффузным.

Величина эффективного излучения поверхности равна

$$E_{\text{эф}} = \epsilon\sigma T^4 / (\epsilon + rF_0 / F), \quad (7)$$

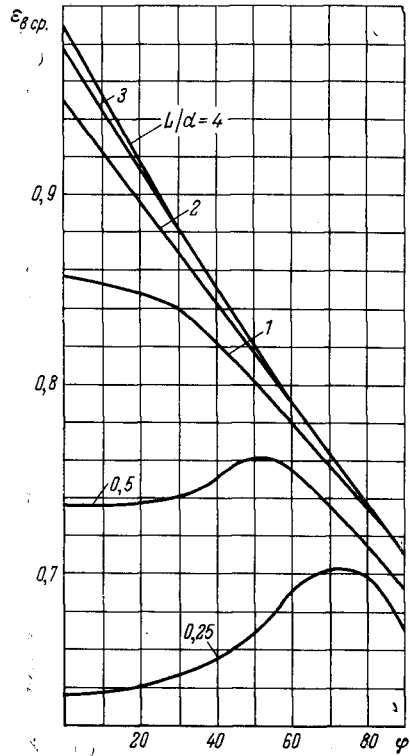


Рис. 4. Средние степени черноты выходного сечения цилиндрической полости в зависимости от направления излучения для разных L/d и $\epsilon = 0,5$

а видимая степень черноты впадины в виде шарового сегмента, как следует из (7), дается выражением

$$\varepsilon_B = \varepsilon / (\varepsilon + rF_0 / F), \quad (8)$$

идентичным формуле (1).

Если излучающаяся поверхность покрыта такими впадинами, то поле излучения будет неравномерным — в местах впадин степень черноты будет ε_B , а в местах, ими не занятых, — ε . Средняя по поверхности степень черноты

$$(\varepsilon_B)_{\text{ср}} = \varepsilon_B F_{\text{вп}} / F_{\text{п}} + \varepsilon (1 - F_{\text{вп}} / F_{\text{п}}), \quad (9)$$

где $F_{\text{вп}} / F_{\text{п}}$ — отношение площади, занятой впадинами, ко всей поверхности.

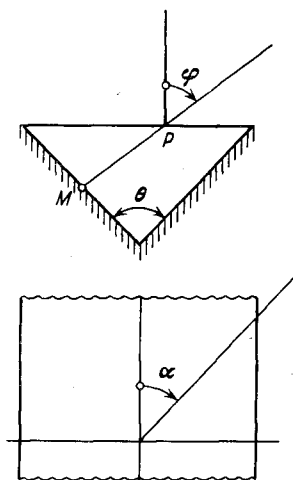


Рис. 5

Рис. 5. Схема полости в виде треугольной канавки

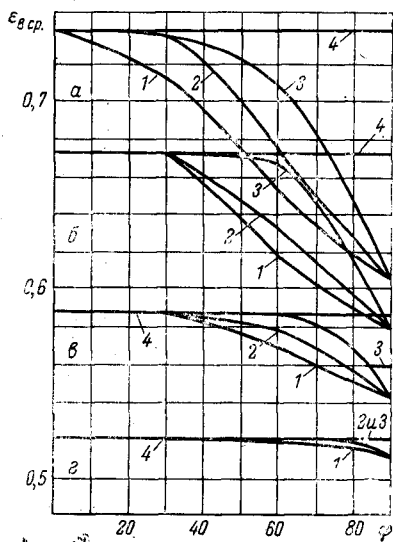


Рис. 6

Рис. 6. Средние степени черноты полости в виде канавки треугольного сечения в зависимости от направления излучения для различных углов раскрытия: а — $\theta = 45^\circ$; б — $\theta = 60^\circ$; в — $\theta = 90^\circ$; г — $\theta = 135^\circ$

1 — для сечения, перпендикулярного образующей канавки, $\alpha = 90^\circ$; 2 — для сечения под углом 45° к образующей канавки, $\alpha = 45^\circ$; 3 — для сечения под углом 20° к образующей канавки, $\alpha = 20^\circ$; 4 — для сечения, параллельного образующим канавки, $\alpha = 0^\circ$

Цилиндрические полости. Характер излучения поверхности, имеющей шероховатости в виде цилиндрических впадин, изучался в работе [4]. В этой работе была решена задача о распределении плотности эффективного излучения открытой с одного конца изотермической цилиндрической поверхности. Расчеты были выполнены для цилиндров с отношением высоты к диаметру $L/d = 0,25; 0,5; 1; 2$ и 4 для степеней черноты 0,5; 0,75 и 0,9.

Видимая степень черноты в какой-нибудь точке P выходного отверстия в направлении, определяемом углом φ к оси цилиндра (рис. 2), будет равна степени черноты в точке M боковой поверхности цилиндра или его дна, на которую опирается рассматриваемый луч. Она будет зависеть от угла φ , азимутального угла и положения точки в выходном сечении. Для луча, проходящего через центр выходного сечения, она будет зависеть только от угла φ . Последняя зависимость представлена на рис. 3, а, для степени черноты 0,5 и разных величин отношения L/d , и на рис. 3, б — для $L/d = 1$ и разных степеней черноты.

При помощи данных статьи [4] были подсчитаны видимые степени черноты выходного отверстия цилиндра для определенного направления,

усредненные по поверхности выходного отверстия. Ввиду того что форма цилиндра симметрична относительно его вертикальной оси, эти усредненные значения ϵ_v зависят только от угла ϕ . Результат такого расчета приведен на рис. 4.

Если имеется поверхность, покрытая небольшими цилиндрическими впадинами, то по формуле (9) для каждого направления можно найти средние по поверхности значения ϵ_v .

Впадины в виде канавок треугольного сечения. В работе [5] исследован вопрос о лучистом теплообмене между серыми пластинами бесконечной длины, имеющими общий угол. Были взяты следующие величины углов θ : 45, 60, 90 и 135°. Степени черноты материала ϵ : 0,1; 0,5; и 0,9. Результаты этой работы можно использовать для определения характера излучения поверхности при шероховатости в виде канавок треугольного сечения (рис. 5).

В этом случае, в отличие от предыдущего, усредненные по выходному сечению видимые степени черноты будут зависеть не только от угла между направлением луча и нормалью к поверхности, но и от азимутального угла.

На рис. 6 представлены результаты подсчетов видимых степеней черноты, усредненных по выходному сечению, в зависимости от угла ϕ между направлением луча и нормалью к излучающей (видимой) поверхности для $\epsilon = 0,5$. Расчет выполнен по материалам работы [5].

Полусферические величины степеней черноты. Полу-сферические величины степеней черноты выходного отверстия полости находятся в результате интегрирования степеней черноты по направлениям и по поверхности выходного сечения. Эти величины для цилиндрических полостей и канавок треугольного сечения вычислены в работах [4, 5]. На рис. 7 эти данные приведены в виде зависимостей средней видимой степени черноты от отношения выходной площади излучения к действительной. Сплошные кривые представляют собой величины степеней черноты, подсчитанные по формуле (1), которая выведена в предположении постоянства по поверхности плотности эффективного излучения. Для случая полости в виде шарового сегмента эта формула является, вместе с тем, и точной. В остальных случаях ее следует рассматривать как приближенную.

Из рис. 7 видно, что если F_0/F не меньше 0,3, приближенная формула для всех случаев дает практически точный результат. Когда F_0/F меньше 0,3, значения степеней черноты по приближенной формуле получаются немного завышенными.

Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники

Поступила в редакцию
7 IX 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Невский. Теплообмен излучением в металлургических печах и топках котлов. Металлургиздат, 1958.
2. Ю. А. Суринов. Изв. АН СССР. Отд. техн. н., № 7, 981, 1948.
3. Г. Л. Поляк. Ж. техн. физ., № 3, 1935.
4. E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert, L. U. Albers. Trans ASME. Ser. C., Heat Transfer, 84, № 1, 1962.
5. E. M. Sparrow, J. L. Gregg, P. Manos. Trans. ASME. Ser. C. Heat Transfer, 83, № 2, 1961.

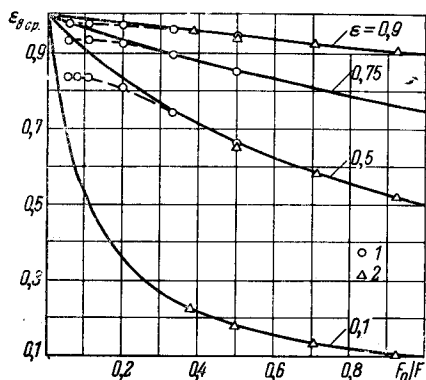


Рис. 7. Величина видимой степени черноты выходного отверстия полости в зависимости от отношения F_0/F для разных ϵ (пунктирные линии — расчет по (1))

1 — для цилиндров с разными отношениями, 2 — для треугольных канавок с разными углами основания