

логий. В этом процессе в качестве локомотива выступают горно-металлургический, нефтегазовый комплексы с их мощным научным сопровождением, как надежные фондообразующие секторы экономики страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алианов Р.А. Казахстан на мировом минерально-сырьевом рынке: проблемы и их решение. Алматы, 2004. 220 с.
2. Пучков Л.А. Россия в горнодобывающем мире // Горный журнал. 2005. №9-10. С. 9-13.
3. Ракишев Б.Р. Системы и технологии открытой разработки. Алматы: НИЦ «Ғылым», 2003. 328 с.
4. Ракишев Б.Р. Казахстан на мировом рынке горнорудного сырья // Горное дело и металлургия в Казахстане. Состояние и перспективы. Алматы, 2006. С. 16-26.

Резюме

Әртүрлі тау-кен шикізаттарын өндіру, олардың жетістіктеріндегі ғылым мен өнеркәсіптің ролі, сонымен қатар Республикамыздың инновациялық дамуы жөнінде мәліметтер келтірілген.

Summary

Data on manufacture of various kinds of mining raw material are cited, a role of a science and the industry in their achievement, and also innovative developments of Republic.

УДК 622.232

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева,
г. Алматы

Поступила 05.12.06г.

*И. Э. СУЛЕЙМЕНОВ, Л. М. ЧЕЧИН, Ч. Т. ОМАРОВ,
Ю. И. РЕВА, Р. М. ИСКАКОВ, Т. А. ФОРМЕНКАНОВ*

ОПТИЧЕСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Альтернативная энергетика, в том числе солнечная, переживает в настоящее время весьма бурный рост, вызванный как рядом геополитических факторов, так и истощением разведанных и/или освоенных месторождений углеводородных топлив. Одно из основных направлений в солнечной энергетике основывается на использовании солнечных концентраторов – отражателей, назначением которых является фокусировка солнечного излучения на рабочих элементах конструкции, содержащих теплоноситель. Известен ряд изобретений, в том числе выполненных в недавнее время, в которых предлагаются различные модификации конструкции солнечных концентраторов, например [1, 2]. Однако все известные типы концентраторов, по существу, сводятся к использованию одной геометрической фигуры – параболы, чье свойство фокусировать лучи в фокальной точке известно уже более двух тысячелетий. Как показывает анализ изобретательской деятельности в данной области, новшества затрагивают в основном системы управления концентраторами, а сами они, как и раньше, имеют форму либо параболоида вращения, либо параболического цилиндра, обеспечивая фокусиров-

ку излучения либо в отдельной точке, либо на фокальной прямой.

На первый взгляд парабола как единственная фигура, обладающая свойством идеальной (с точки зрения геометрической оптики) фокусировки лучей, не может быть заменена на поверхности, порожденные другими фигурами. Однако, как это показано в данной статье, ряд специфических особенностей задачи, решаемой при использовании отражающих поверхностей в качестве концентраторов, позволяет рассматривать проблему несколько более широко, а именно для достаточно широкого круга задач целесообразно использовать зеркала, близкие к параболическим, однако все же отличающиеся от них по форме.

Практическая потребность в использовании такого рода поверхностей связана с последними достижениями в области создания полимерных пленочных покрытий, обладающих высокими (до 95%) коэффициентами отражения [3] света в видимом и инфракрасном диапазонах.

Использование пленок в качестве отражающих покрытий предусматривает переход к принципиально другим способам формирования зеркал, в частности, может быть предложена

технология изготовления зеркал с помощью корда на основе эластомера. В этом случае используется растягивающаяся отражающая пленка, армированная волокном, имеющим сопоставимый или меньший коэффициент линейного растяжения.

Преимущества использования полимерных пленок в качестве материала зеркал достаточно очевидны: малый вес, сравнительно низкая стоимость и т.д. Однако их использование наталкивается также на определенные трудности, в частности, создать поверхность заданного профиля с оптической точностью на основе пленки неизмеримо более сложно, чем на основе твердотельных материалов.

В связи с этим возникает задача разработки концентраторов с формой зеркала, отличной от параболической. В частности, при использовании технологии на основе корда наиболее просто изготовить зеркало, обладающее кусочно-плоской формой. В этом случае материал отражающего эластомера может быть натянут на треугольные ребра, образованные жестким армирующим волокном, а поверхность зеркала в целом представлять собой структуру, составленную из плоских треугольников, обладающих общими ребрами.

Наиболее близкой к традиционной, очевидно, является поверхность, в которой указанные плоские треугольники аппроксимируют параболоид вращения или же цилиндрический параболоид с заданной точностью. Однако, как будет ясно из дальнейшего, это не единственный пример поверхности, в которой оказывается удобным использовать кусочно-плоские элементы. Целесообразно сразу рассматривать случай поверхностей, близких к параболическим, или, еще более общо, рассматривать задачу описания отражения излучения зеркал от поверхности, форма которой близка к заданной. Такая задача позволяет оптимизировать форму поверхности концентраторов, изготавливаемых на основе использования новых полимерных материалов.

Основой для решения этой задачи является аппарат обобщенной Фурье-оптики [4, 5], который позволяет последовательно решить задачу описания отражения волн от поверхности произвольной формы в терминах спектра пространственных частот.

В рамках обобщенной Фурье-оптики [4, 5] показано, что монохроматическое излучение может быть охарактеризовано спектром простран-

ственных частот (угловым спектром) – комплекснозначной функцией $A(\xi)$, заданной на единичной сфере в пространстве волновых векторов:

$$U_1(\mathbf{r}) = \int_{\Sigma_1^+} A_1(\xi_1) \exp(ik\xi_1\mathbf{r}_1) d\Sigma_1^+, \quad (1)$$

где ξ_1 – вектор, пробегающий единичную сферу, \mathbf{r} – текущий радиус-вектор, в котором вычисляется комплексная амплитуда распределения поля $U_1(\mathbf{r})$ электромагнитной волны в скалярном приближении.

Соотношение (1) физически интерпретируется как представление распределения поля монохроматического излучения в виде суперпозиции плоских монохроматических волн, направление распространения каждой из которых задается единичным вектором ξ_1 . Соответственно в подавляющем большинстве практически важных случаев излучение сосредоточено в определенном диапазоне углов, определяемом конструкцией оптической системы. Следовательно, вектора ξ_1 реально пробегают не полную сферу в пространстве единичных векторов, а ее ограниченный фрагмент Σ_1^+ . Как правило, в реальных оптических системах этот фрагмент укладывается в полусферу единичного радиуса, что позволяет говорить о существовании двух общих направлений распространения излучения по отношению к оптической оси прибора. Поэтому допустимо индексировать множества Σ_1 значками «+» и «-», отвечающими одному из двух возможных общих направлений распространения.

В том случае, когда в спектре излучения присутствуют только составляющие, удовлетворяющие условию ординарности [5], спектр излучения может быть вычислен через распределение поля, заданное на отдельной поверхности:

$$A(\xi) = \int \mathbf{N}\xi u(x, y) \exp \times \left[-ik \left(\alpha x + \beta y \pm \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z(x, y) \right) \right] dS, \quad (2)$$

где \mathbf{N} – вектор нормали к поверхности, $z(x, y)$ – функция, задающая рассматриваемую поверхность в декартовых координатах.

Выражение (2) может содержать как положительный, так и отрицательный знак при функции $z(x, y)$. Это соответствует тому, что поле монохроматической волны может быть сформировано излучением, распространяющимся как в прямом,

так и в обратном направлении. Формулы (1) и (2) составляют в совокупности пару интегральных псевдопреобразований. Их отличие от парных интегральных преобразований в строгом смысле этого термина состоит в том, что вычисление спектра пространственных частот по формуле (2) допустимо проводить только при упомянутых выше ограничениях на диапазон углов.

Соответственно отражение монохроматической волны может быть описано в терминах спектра пространственных частот по методике [5]. Именно на первом шаге вычисляется распределение поля, сформированное, скажем, волнами из множества Σ_1^+ (излучение распространяется в положительном направлении) на поверхности зеркала. Поле отраженной волны отличается от него только несущественным постоянным множителем, а его спектр пространственных частот может быть найден по формуле (2).

В работе [5] рассматривалась следующая задача. Задана поверхность волнового фронта падающей волны, требуется отыскать распределение поля, создаваемого отраженным излучением. Данная задача решается последовательным применением псевдопреобразований (1) и (2). На первом шаге определяется спектр пространственных частот падающего излучения (ф.1), от него осуществляется переход к полю на поверхности зеркала (ф.2), затем снова вычисляется спектр пространственных частот [уже с другим знаком при функции $z(x,y)$] и снова переход к распределению поля. Результат может быть представлен в виде интеграла лапласовского вида

$$U(\mathbf{r}') = \int_{\Sigma^-} \int_{S_1} \int_{\Sigma^+} \int_{S_1} \exp\left[ik(\xi \mathbf{r}' - \xi \mathbf{r} + \xi_1 \mathbf{r} - \xi_1 \mathbf{r}_1)\right] \times \\ \times dS_1 d\Sigma_1^+ dS d\Sigma^-, \quad (3)$$

где ξ, ξ – переменные углового спектра падающего и отраженного излучения соответственно, вектор \mathbf{r}_1 пробегает поверхность волнового фронта падающей волны, вектор \mathbf{r} – поверхность зеркала, а вектор \mathbf{r}' есть текущий радиус-вектор точки, в которой вычисляется поле отраженной волны.

Для излучения оптического диапазона интеграл (3) может быть вычислен по многомерному методу стационарной фазы, причем вырожденные точки стационарности в совокупности образуют каустическую поверхность [6]. Условием

вырождения точек стационарности является обращение в ноль производных фазовой функции

$$\Psi = \xi \mathbf{r}' - \xi \mathbf{r} + \xi_1 \mathbf{r} - \xi_1 \mathbf{r}_1 \quad (4)$$

по всем переменным интегрирования.

Необходимо подчеркнуть, что в реальных солнечных концентраторах фокусирование излучения осуществляется на объектах конечного размера (рабочих участках трубопроводов подвода теплоносителя). Более того, в подавляющем большинстве случаев фактор q концентрирования света (отношение площади волнового фронта падающего излучения к площади волнового фронта концентрируемого излучения) имеет сравнительно небольшое значение (порядка 10–30). Оценку для этой величины можно сделать из следующих соображений.

Примем, что инсоляция $I=0,5$ кВт/м², что составляет несколько более 50% от инсоляции, отвечающей солнечному дню на широтах Алматы, т.е. здесь предусмотрен определенный запас, означающий возможность эксплуатации концентратора в зимнее время. Объемная плотность потока энергии, подводимого к теплоносителю с использованием концентратора, составляет qld . При толщине системы трубопровода порядка $d = 1$ см, что вытекает из технологических соображений, связанных с однородностью разогрева теплоносителя, и факторе $q = 20$ обеспечивается подвод энергии порядка 1 кВт на 1 л, что уже обеспечивает устойчивое парообразование (типичная мощность бытового электрического чайника). Данная мощность может быть увеличена еще в несколько раз за счет уменьшения значения d , что также является технически вполне достижимым.

При использовании $q = 20$ и цилиндрической геометрии концентратора линейные размеры области, в которой осуществляется фокусирование, также только в 20 раз меньше поверхности самого концентратора (труба диаметром 1 см при ширине параболического отражателя 20 см). Такая фокальная область весьма далека от характерных размеров области, в которой параболический отражатель, в принципе, может сконцентрировать свет. (Размеры этой области определяются дифракцией на краях апертуры и имеют порядок длины волны.) Это означает, что при использовании таких систем не обязательно говорить о точной фокусировке излучения в точку

(или фокальную прямую, если речь идет о цилиндрических концентраторах). Вопрос может быть поставлен более широко, а именно можно ограничиться тем, что каустическая поверхность преобразованного отражателем волнового фронта будет укладываться в размеры рабочего участка трубопровода, т.е. на языке обобщенной Фурье-оптики все точки вырождения фазовой функции (4) должны лежать внутри заданного объема. Любая поверхность, отвечающая данному критерию, может быть использована для концентратора солнечной энергии.

Покажем теперь, что в рамках обобщенной Фурье-оптики возникает естественная возможность описывать отражение излучения от поверхностей, чья форма близка к заданной. Отправной точкой рассуждений является предельный переход от обобщенной Фурье-оптики к классической.

В этом случае вместо (2) используется его приближенное представление, которое соответствует переходу к парааксиальному приближению:

$$A(\xi) \approx \int \mathbf{N}\xi u(x, y) \times \exp[-ik(\alpha x + \beta y \pm z(x, y))] dS. \quad (5)$$

Формула (5) отличается от формулы (2) отсутствием корня квадратного при функции $z(x, y)$, т.е. формула (5) сводится к классическому преобразованию Фурье от распределения поля с соответствующим фазовым множителем. Именно в указанном смысле отклонения поверхности от плоскости в рамках классической Фурье-оптики описываются через соответствующий фазовый растр: угловой спектр монохроматической волны, согласно (5), есть Фурье-образ произведения поля падающего излучения на функцию $\exp[-ik(\pm z(x, y))]$, которая интерпретируется как функция пропускания растра.

Точно такое же приближение можно использовать и когда «базовая» или «опорная» поверхность не является плоскостью. Запишем

$$z(x, y) = z_0(x, y) + \delta z(x, y). \quad (6)$$

Тогда на основании тех же самых соображений, которые используются при осуществлении предельного перехода к классической Фурье-оптике [7], член, содержащий квадратный корень в (4), можно переписать в приближенном виде

$$\sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z(x, y) \approx \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z_0(x, y) + \delta z(x, y). \quad (7)$$

Иначе говоря, отклонением фазового набега от случая нормального падения плоской волны можно пренебречь при рассмотрении малых девиаций зеркала от поверхности заданной формы. В этом случае соотношение для спектра пространственных частот можно переписать в форме

$$A(\xi) = \int \mathbf{N}\xi u(x, y) \exp[\mu ikz(x, y)] \exp \times \left[-ik(\alpha x + \beta y \pm \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z_0(x, y)) \right] dS. \quad (8)$$

Данный результат можно интерпретировать двояко. С одной стороны, можно использовать ту же трактовку, которая справедлива для классической Фурье-оптики. Произведение $u(x, y) \exp[\mu ikz(x, y)]$, фигурирующее в подынтегральном выражении (8), позволяет рассматривать отклонения поверхности от плоской формы как своего рода фазовый растр, дополнительно наложенный на базовую поверхность $z_0(x, y)$. С другой стороны, необходимо отметить, что поле $u(x, y)$ при рассмотрении работы концентраторов представляет собой поле плоской волны (в силу большого расстояния до Солнца). Следовательно, соотношение (8) позволяет говорить, что рассмотрение отклонений базовой поверхности от заданной формы приводят к тому же результату, что и отклонения падающего излучения от плоской волны.

Подчеркнем, что при использовании зеркал в виде пленочных покрытий неизбежно возникновение собственных колебаний поверхности, например, под воздействием акустических волн и т.д. Следовательно, анализ работы таких концентраторов, даже если говорить о классической параболической форме, должен обеспечить учет данного фактора.

Целесообразно поставить вопрос об устойчивости поверхности в смысле достижения максимально эффективной работы концентратора. Соотношение (8) при этом показывает, что можно рассматривать не сами вариации формы поверхности, а некоторый разброс составляющих углового спектра падающего излучения по направлениям.

Как было показано, при работе реальных концентраторов допустимо говорить не о фокальной точке или фокальной прямой, а о достаточно протяженной фокальной области. Следовательно, вопрос об устойчивости резонатора в рамках обобщенной Фурье-оптики может быть поставлен

так: имеется излучение, спектр пространственных частот которого сконцентрирован в некотором диапазоне углов. Требуется сконцентрировать данное излучение в некоторой фокальной области.

В принципе данная задача решается, в том числе с помощью параболических концентраторов. При отклонении направления плоской волны от оси симметрии системы излучение, по крайней мере, если говорить о приближении параксиальной оптики, фокусируется в точке, близкой к фокальной. В результате отклонения от параболической формы компенсируются тем, что реальное устройство, аккумулирующее энергию, имеет конечные размеры и сохраняет работоспособность до тех пор, пока излучение концентрируется в фокальной области.

Следует, однако, подчеркнуть, что парабола обладает свойством идеальной фокусировки лучей (в смысле геометрической оптики) только по отношению к единственной плоской волне, распространяющейся вдоль ее оси симметрии. Для других плоских волн, что вытекает из известных положений геометрической теории оптических систем [8], указанные отклонения, а точнее аберрации, становятся значительными. Следовательно, возникает следующая возможность – отказаться от идеальной фокусировки отдельной волны, т.е. отдельной составляющей спектра пространственных частот в пользу более точной фокусировки других компонент.

Это является достаточным основанием для целесообразности рассмотрения задачи оптимизации на устойчивость концентратора, которая может быть сформулирована следующим образом. Имеется определенный диапазон углов, в котором сосредоточен спектр пространственных частот. Требуется установить оптимальную форму поверхности, при которой каустические поверхности, образованные каждой спектральной составляющей из этого диапазона, будут укладываться в заданную фокальную область.

Применительно к проектированию солнечных концентраторов данная задача имеет еще один аспект, а именно эксплуатация концентратора так или иначе предполагает использование механизма, обеспечивающего слежение за перемещением Солнца по небосклону. Технически во многих случаях проще реализовать дискретное перемещение, чем непрерывное. Кроме того, эксплуатация концентраторов на транспортных

средствах оказывается затрудненной именно вследствие сложности точной юстировки. Поэтому вопрос об устойчивых концентраторах, способных работать с достаточно большими участками углового спектра, актуален также с точки зрения использования солнечной энергии на транспорте.

Общая задача оптимизации не может быть решена в рамках отдельной статьи, но вопрос об устойчивом концентраторе может быть проиллюстрирован с использованием задачи о фокусировании излучения круговым цилиндром.

На рис. 1 показана каустическая поверхность, которая формируется плоской волной при отражении от зеркала в виде фрагмента кругового цилиндра, имеющего угол раствора 45° (решается задача о цилиндрической поверхности, поэтому в рассмотрении можно удерживать только две координаты).

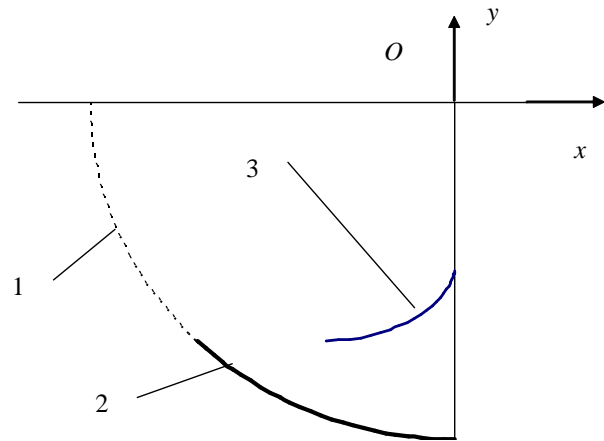


Рис. 1. Каустическая поверхность, образуемая при отражении плоской волны от фрагмента кругового цилиндра с углом раствора 45° , 1 – поверхность цилиндра, 2 – рабочий фрагмент, 3 – каустическая поверхность

Данную каустическую поверхность можно построить следующим образом. В [5, 6] было показано, что каждый локальный элемент поверхности, обладающей локальным значением радиуса кривизны R , формирует отдельную точку на каустической поверхности, причем для определения геометрического места этой точки можно пользоваться формулой тонкой линзы, в которой значение фокусного расстояния зависит от угла падения излучения χ :

$$\frac{1}{r'} - \frac{1}{r_0} = \frac{1}{F}, \quad (9)$$

где $F = 0,5R \cos \chi$.

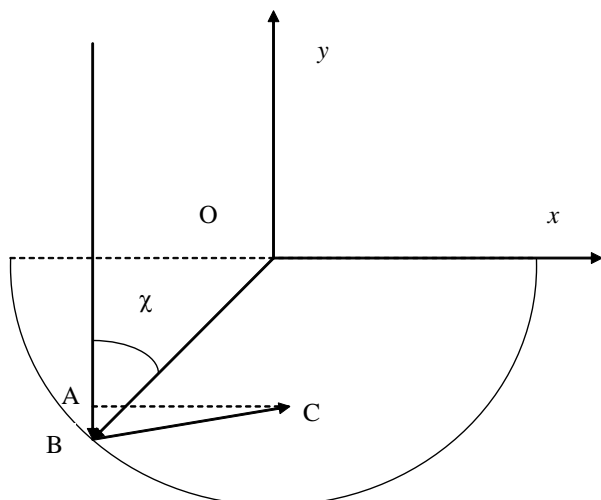


Рис. 2. К построению каустической поверхности при отражении излучения от кругового цилиндра

Фокальная точка лежит на луче, направление которого определяется из равенства углов падения и отражения, а расстояние до нее может быть найдено из (9). Координаты указанной точки относительно точки падения луча В могут быть найдены из прямоугольного треугольника АВС (рис. 2) как:

$$\begin{aligned} |AB| &= F \cos 2\chi = \frac{R}{2} \cos \chi \cos 2\chi, \\ |AC| &= F \sin 2\chi = \frac{R}{2} \cos \chi \sin 2\chi. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно координаты рассматриваемой точки каустической поверхности относительно точки О есть:

$$\begin{aligned} y &= -R \cos \chi + \frac{R}{2} \cos \chi \cos 2\chi, \\ x &= -R \sin \chi + \frac{R}{2} \cos \chi \sin 2\chi. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения (10) можно рассматривать как параметрическое задание каустической кривой, с их помощью построен рис. 1.

В случае, когда область, в которой расположен приемник излучения, полностью захватывает каустическую поверхность, зеркало в виде кругового цилиндра будет решать ту же задачу, что и зеркало, выполненное в виде параболического. Недостатком такой системы являются большие размеры фокальной области, однако круговой цилиндр был использован только для иллюстрации, поэтому остается оправданной постановка задачи на поиск оптимальной формы с указанной точки зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробко В.И., Парамонов И.А. Патент РФ // RU 0002241916 С. 2.
2. Tiry Jr., Tommy Lee. Патент США // US 2000 506561. 18.02.2000
3. Исаков Ринат.
4. Suleimenov I.E., Tolmachev Yu.A. On the possibility of generalized Fourier optics introduction // Optics & Spectroscopy, 1994. V. 76, N 6. P. 999-1004.
5. Suleimenov I.E., Tolmachev Yu.A. Generalized Fourier optics. III. Description of wavefront reflection from the non-flat mirror in terms of the local curvature // Optics & Spectroscopy. 1995. V. 78, N 1. P. 110-113.
6. Suleimenov I.E., Tolmachev Yu.A. On the problem of classification of singular points of caustic surfaces // Optics & Spectroscopy. 1995, V. 79, N 1. P. 170-172.
7. Гудмен Дж. Основы Фурье-оптики: Пер. с англ. / Под ред. Г. И. Косоурова. М.: Мир, 1980. 364 с.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1970.

УДК 551.590.2

Институт ионосферы,
Астрофизический институт
им. В. Г. Фесенкова

Поступила 3.11.06 г.