

Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ КОНЦЕНТРАТОРЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ

Под редакцией **Д. С. Стребкова**

2-е издание, исправленное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям

**Книга доступна в электронной библиотеке biblio-online.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 621.383(075.8)

ББК 30я73

С84

Авторы:

Стребков Дмитрий Семенович — доктор технических наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой ЮНЕСКО «Возобновляемая энергетика и сельская электрификация», научный руководитель Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, профессор кафедры «Основы радиотехники и телевидения»; руководитель научной рабочей группы европейского бюро ЮНЕСКО по образованию в области солнечной энергетики;

Тверьянович Эдуард Владимирович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией солнечных электростанций ВИЭСХ с 1991 по 2010 год.

Рецензенты:

Лидоренко Н. С. — член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, советник Российской академии наук;

Тарнижевский Б. В. — доктор технических наук, заведующий отделением энергосбережения и нетрадиционных источников энергии Энергетического института имени Г. М. Кржижановского.

Стребков, Д. С.

С84

Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения : учеб. пособие для вузов / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович ; под ред. Д. С. Стребкова. — 2-е изд., испр. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 265 с. — (Серия : Авторский учебник).

ISBN 978-5-534-08777-2

Учебное пособие посвящено основным видам и принципам работы солнечных концентраторов — оптических устройств, повышающих плотность потока солнечного излучения. Рассматривается разработка и изготовление солнечных высокотемпературных установок, концентраторов, применяемых для создания фотоэлектрических модулей и для солнечных станций с тепловыми циклами преобразования энергии. Приведены варианты новых концентрирующих схем, а также расчеты технико-экономического эффекта станций с концентраторами.

Издание содержит богатый иллюстративный материал в виде схем, графиков и фотографий.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям, аспирантов, преподавателей и всех интересующихся.

УДК 621.383(075.8)

ББК 30я73

Разыскиваем правообладателей и наследников Тверьяновича Э. В.: <https://www.biblio-online.ru/inform>
Пожалуйста, обратитесь в Отдел договорной работы: +7 (495) 744-00-12; e-mail: expert@urait.ru



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Стребков Д. С., Тверьянович Э. В., 2007

© Стребков Д. С., Тверьянович Э. В., 2019,
с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2019

ISBN 978-5-534-08777-2

Оглавление

Предисловие	7
Глава 1. Параболоидные концентраторы солнечного излучения.....	10
1.1. Основные принципы работы параболоидных концентраторов	10
1.2. Центробежный метод изготовления параболоидных концентраторов	13
1.3. Параболоиды из стекла	24
1.4. Методы испытания параболоидных зеркал.....	27
1.5. Солнечные установки с использованием параболоидных концентраторов	31
<i>Выводы по главе 1</i>	41
Глава 2. Концентраторы на основе концентрических линз Френеля.....	42
2.1. Преломляющие системы в качестве концентраторов солнечного излучения.....	42
2.2. Расчет профилей линз Френеля в монохроматическом приближении	43
2.3. Светопропускание линз Френеля.....	44
2.4. Концентрирующая способность линз Френеля	46
2.5. Оптико-энергетические характеристики концентрических линз Френеля.....	50
2.6. Пассивные системы термостабилизации солнечных элементов в модулях с концентрическими линзами Френеля	53
<i>Выводы по главе 2</i>	56
Глава 3. Линейные линзы Френеля	57
3.1. Угловые поперечные и продольные дефокусировки линейных линз Френеля	57
3.2. Экспериментальное исследование стеклянной линейной линзы Френеля	62
3.3. Тепловой солнечный модуль с линейной линзой Френеля	65
3.4. Фотоэлектрический солнечный модуль с линейной линзой Френеля	67
3.5. Линейные линзы Френеля в качестве солнцезащитных ограждений зданий	69
<i>Выводы по главе 3</i>	71
Глава 4. Призмённые концентраторы.....	72
4.1. Выбор параметров призмённых концентраторов	72

4.2. Светопропускание призмных концентраторов	75
4.3. Типы призмных концентраторов	77
4.4. V-образный призмный концентратор	84
4.5. Фотоэлектрические модули с призмными концентраторами	86
<i>Выводы по главе 4</i>	90
Глава 5. Фоконы и фоклины	92
5.1. Формообразование и расчет основных параметров	92
5.2. Технологии изготовления фоконов	95
5.3. Экспериментальное исследование энергетических характеристик фоконов и модулей на их основе.....	97
5.4. Расчет радиатора охлаждения фоконного модуля	100
5.5. Фоклины	106
5.6. Сочетания фоклинов и призмных концентраторов	112
<i>Выводы по главе 5</i>	122
Глава 6. Стационарные цилиндрические концентраторы с U-образным профилем	123
6.1. Принцип построения и работы U-образных концентраторов	123
6.2. Факетные U-образные параболоцилиндрические концентраторы	126
6.3. Выбор параметрического угла стационарных параболоцилиндрических концентраторов.....	130
6.4. Параметры поля стационарных концентраторов	138
6.5. Экспериментальное исследование U-образных концентраторов и модулей на их основе.....	143
6.6. Тепловой солнечный модуль со стационарным U-образным концентратором	150
<i>Выводы по главе 6</i>	152
Глава 7. Варианты стационарных параболоцилиндрических концентраторов	153
7.1. Концентраторы параболоцилиндрические с разными параметрическими углами.....	153
7.2. Концентраторы с S-образными вторичными отражателями.....	155
7.3. Цилиндрический ω -образный концентратор	165
7.4. Реализация солнечного модуля с ω -образным концентратором	169
7.5. Концентраторы стационарные параболоцилиндрические асимметричные	172
7.6. Симметричные стационарные цилиндрические концентраторы с многоуровневой системой концентрации	179
<i>Выводы по главе 7</i>	182
Глава 8. Голографические и люминесцентные концентраторы ...	183
8.1. Принцип работы и основные параметры голографических концентраторов	183
8.2. Голографические концентраторы с использованием принципов призмных концентраторов.....	185
8.3. Голографические концентраторы типа «киноформ»	187
8.4. Матрицы киноформных концентраторов	190

8.5. Люминесцентные концентраторы.....	191
8.6. Экспериментальное исследование люминесцентного трансформатора.....	193
<i>Выводы по главе 8</i>	195
Глава 9. Жалюзийные гелиостаты-концентраторы	196
9.1. Косинусный эффект в линейных жалюзийных гелиостатах.....	196
9.2. Межжалюзийный эффект	198
9.3. Затенение и блокировка радиации в линейных жалюзийных гелиостатах	200
9.4. Потери радиации в линейных жалюзийных гелиостатах.....	202
9.5. Методика расчета выработки линейных жалюзийных гелиостатов	203
9.6. Эпюры выработки энергии линейными жалюзийными гелиостатами	206
<i>Выводы по главе 9</i>	208
Глава 10. Концентрирующие системы для солнечных электростанций с тепловыми циклами преобразования энергии (состояние проблемы)	210
10.1. Солнечные станции башенного типа	211
10.2. Солнечная электростанция на основе параболических концентраторов	215
10.3. Станции на основе параболических концентраторов	216
10.4. Недостатки солнечных электростанций с тепловыми циклами преобразования	217
<i>Выводы по главе 10</i>	219
Глава 11. Концентрирующая система для солнечной электростанции на основе ориентированных вторичных отражателей.....	221
11.1. Принцип работы системы	221
11.2. Оптические схемы системы концентрирования	222
11.3. Угловые размеры элементарного солнечного луча	224
11.4. Принципы построения станций «закрытого типа»	227
<i>Выводы по главе 11</i>	231
Глава 12. Концентрирующая система для солнечных станций «закрытого типа» с активным прозрачным покрытием.....	232
12.1. Устройство и принцип работы	232
12.2. Расчет параметров линзы-шара	235
12.3. Расчет характеристик системы	237
12.4. Расчетные конструктивные параметры системы.....	242
<i>Выводы по главе 12</i>	242
Глава 13. Концентрирующая система на основе линз Френеля и световодов для нагрева теплоносителя	244
13.1. Принцип работы системы	244
13.2. Пример расчетных характеристик	247
<i>Выводы по главе 13</i>	250

Глава 14. Экономические вопросы использования концентрирующих систем в солнечных установках	251
14.1. Ситуация на рынке фотоэлектричества	251
14.2. Влияние концентраторов на формирование стоимости солнечной фотоэлектростанции	252
14.3. Расчет окупаемости солнечных электрических станций.....	254
14.4. Примеры оценки экономической эффективности.....	257
<i>Выводы по главе 14</i>	260
Литература	261
Новинки издательства по электроэнергетике и смежным дисциплинам.....	262
Об авторах.....	264

Предисловие

Концентраторы — это оптические устройства, повышающие плотность потока солнечного излучения. Для высокотемпературных установок, или «солнечных печей», повышение плотности излучения на приемнике приводит к созданию температур 3000 °С и выше, что позволяет вести синтез всех тугоплавких материалов.

Для солнечных электростанций с тепловыми циклами преобразования энергии концентраторы позволяют создать температуры, необходимые для получения пара с определенными параметрами.

Для фотоэлектричества концентраторы решают следующие задачи:

- повышают КПД преобразования излучения солнечными элементами (СЭ)¹;
- повышают КПД преобразования за счет комбинированного одновременного использования электричества и тепла;
- снижают установленную стоимость солнечных установок за счет уменьшения количества дорогостоящих СЭ.

В книге отражен пятидесятилетний опыт работы авторов по созданию концентраторов и различных устройств с их использованием, таких как солнечные высокотемпературные установки, фотоэлектрические модули, солнечные тепловые коллекторы.

Книга может быть использована как учебное пособие для студентов и аспирантов по специальностям «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии», «Солнечные энергетические установки», а также представляет интерес для научных работников, инженеров и техников, занимающихся вопросами исследований, проектирования, изготовления и испытаний солнечных концентраторов и солнечных энергетических установок. Книга будет полезна широкому кругу читателей, интересующихся проблемами развития солнечной энергетики.

Глава 1 посвящена разработке и изготовлению солнечных высокотемпературных установок, в том числе технологии изготовления точных параболических концентраторов методом центробежной отливки полимерных форм и изготовления по ним гальванопластических копий. Кроме того, здесь рассмотрены другие методы изготовления высокопотенциальных концентраторов.

¹ Это фундаментальное свойство концентрированного излучения описано в статьях: Лидоренко Н. С., Евдокимов В. М. Термодинамические основы преобразования солнечной энергии в фотоэлектрических системах // Гелиотехника. 1994. № 1. С. 3—10; Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937—947.

Главы 2—9 посвящены в основном концентраторам, применяемым для создания фотоэлектрических модулей. Большое внимание уделено разработке и исследованию новых типов низкопотенциальных концентраторов, которые могут работать в стационарном режиме круглый год.

Главы 10—13 посвящены вопросам создания концентрирующих устройств для солнечных станций с тепловыми циклами преобразования энергии.

В главе 10 проанализирована работа существующих электростанций с тепловыми циклами, показано, что использование простых оптических схем для станций башенного типа и для параболоцилиндрических солнечных электростанций (СЭС) является источником проблем этих станций, не вышедших на уровень рентабельности. Авторы не ставят своей задачей принизить научные и технические достижения в области создания этих СЭС, а хотят лишь продемонстрировать, что выбранные оптические схемы не являются единственными. Возможны другие варианты создания мощных СЭС с иными оптическими схемами, которые даже в предварительном рассмотрении показывают более высокие характеристики.

Варианты новых концентрирующих схем приведены в главах 11—13. В процессе разработки этих схем была выдвинута концепция создания солнечных станций «закрытого типа», в которых все оптические и механические устройства находятся в закрытом помещении с режимом «чистой атмосферы», а солнечное излучение проникает через прозрачные покрытия. По мнению авторов, идея является плодотворной, поскольку решает многие проблематичные вопросы эксплуатации существующих СЭС, а именно старения и коррозии материалов, ветровых нагрузок, очистки от загрязнения. Предложенные варианты не решили проблему создания таких типов станций до конца, но определили перспективные направления исследований.

В главе 13 приведен вариант станции, которую можно было бы реализовывать в настоящее время без риска неудачи, так как схемы линз Френеля со световодами в настоящее время прекрасно исследованы с положительным результатом.

Глава 14 посвящена вопросам расчета технико-экономического эффекта станций с концентраторами.

Немного об истории использования концентраторов в России. В 1741 г. М. В. Ломоносов предложил многолинзовую солнечную печь¹. Указывая на трудности изготовления больших линз и зеркал, применявшихся ранее для концентрации солнечных лучей, он написал: «Я счел на благо по мере сил моих уничтожить каким-либо способом упомянутые трудности и попытаться увеличить зажигательную силу этих приборов, которые прославлены столькими работниками, двинувшими вперед естествознание, и которые, я не сомневаюсь, придут на помощь в химических работах, требующих сильного огня». Он описал предложенную им концентрирующую систему, состоящую из 8 стеклянных линз и 8 плоских зеркал, которые были установлены на «подвижном

¹ Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 1. М. : Изд-во АН СССР, 1950.

столике» для того, чтобы «лучи Солнца, непрерывно меняющие место, одинаково отражались зеркалами и преломлялись в линзах, а общий фокус неизменным оставался во время любого длительного опыта».

В 1890 г. профессор В. К. Церасский провел опыты по расплавлению многих металлов и металлоидов с помощью концентрированных солнечных лучей¹.

В 1928 г. в журнале «Вестник знания» профессор В. П. Вейнберг опубликовал анализ состояния гелиотехники в мире и предложил солнечную установку для орошения степей Средней Азии².

В 1959 г. вышла первая аналитическая работа, посвященная использованию концентраторов солнечного излучения³.

Впервые в СССР в 1970-х гг. доктором технических наук Б. В. Тарнижевским была разработана солнечная фотоэлектрическая установка с концентраторами и использована для водоподъемного комплекса в пустынях Туркмении.

Книга не претендует на освещение всех направлений отечественной солнечной энергетики. В ней рассматриваются работы, в которых авторы принимали непосредственное участие или выступали в роли заказчиков.

Вопросы общего содержания, посвященные использованию солнечной энергии, изложены в работах авторов книги⁴.

Мы благодарны всем коллегам и сотрудникам, принимавшим участие в работах.

Авторы с благодарностью и уважением отмечают вклад советских и российских ученых в развитие солнечной энергетики с концентраторами солнечного излучения: В. М. Андреев, Р. Р. Апариси, В. М. Евдокимов, В. А. Баум, В. К. Баранов, А. В. Вартанян, В. А. Грилихес, Р. А. Захидов, А. И. Кулагин, Н. С. Лидоренко, Б. В. Тарнижевский, Д. И. Тепляков; научной школы Д. С. Стребкова: В. В. Афян, А. Е. Иродионов, М. М. Остроушенко, В. В. Дубовицкий, С. Н. Кивалов, Б. И. Содномов, О. В. Шеповалова, П. П. Безруких, Е. Г. Базарова, И. В. Митина, А. Т. Джайлани, Н. С. Филиппченкова, В. А. Панченко и другие.

¹ *Цераский В. К.* Русский астрономический календарь на 1909 г. Нижний Новгород, 1908.

² *Вейнберг В. П.* Солнечные двигатели, перспективы гелиотехники // Вестник знания. 1928. № 4. С. 206—220.

³ *Вейнберг В. Б.* Оптика в установках для использования солнечной энергии. Л. : Оборонгиз, 1959.

⁴ *Поулек В, Либра М., Стребков Д. С., Харченко В. В.* Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии / под ред. Д. С. Стребкова. М. : ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2018; *Безруких П. П., Стребков Д. С.* Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии / под ред. Д. С. Стребкова. — М. : ГНУ ВИЭСХ, 2005; *Strebkov D. S., Tveryanovich E. V., Tukhov I. I., Irodionov A. E., Bezzukikh P. P.* PV0-Thermal Static Concentrator Modules // Proceedings of the So1ar 2002 Conference. Reno/Sparks Nevada. June 12—20, 2002. Editor R. Campbell-Howe. 2002. 7 p.; *Strebkov D. S., Bezzukikh P. P., Tveryanovich E. V., Zadde V. V., Nikitin B. A., Tukhov I. I., Chirkov V. G., Kivalov S. N.* New stationary PV concentrator module. World sustainable energy day // Proceedings of International Conference Energy Globe (1—3 March 2001). Wels, Austria, 2001. P. 283; *Стребков Д. С., Тверьянович Э. В.* Концентрирующие системы для солнечных электростанций // Теплоэнергетика. 1999. № 2. С. 10—15.

Глава 1

ПАРАБОЛОИДНЫЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Основные принципы работы параболических концентраторов

Форма отражающей поверхности параболического концентратора образуется вращением параболы вокруг оси симметрии. Одно из свойств параболы — сходимость всех световых лучей, падающих параллельно главной оптической оси (оси симметрии) в фокусе F . Параболический концентратор создает изображение удаленного предмета в фокальной плоскости.

Описанию распределения плотности энергии в фокусе параболических концентраторов посвящено много работ¹. Парабола относится к разряду высокопотенциальных концентраторов, концентрация излучения которых может превысить 10^4 .

Кратко рассмотрим формирование освещенности в фокальном пятне параболического концентратора, эти сведения потребуются нам при оценке качества поверхности концентраторов, расчете плотности облучения в фокальных областях, для сравнения формирования пятна для отражательных систем и линзовых.

На рис. 1.1 показана схема формирования фокального пятна параболического концентратора: элементарный солнечный луч с угловым размером $2\varphi_0$ ($2\varphi_0 = 32$ угл. мин, или $2 \cdot 0,004654$ рад) отражается от поверхности концентратора и попадает на фокальную плоскость, где след этого луча представляет собой элементарный эллипс с полуосями:

$$a = \frac{p\varphi_0}{(1 + \cos U)\cos U}, \quad b = \frac{p\varphi_0}{1 + \cos U}, \quad (1.1)$$

где $p = 2f$ — фокальный параметр параболы; f — фокусное расстояние; U — угол раскрытия параболического концентратора.

¹ Захидов Р. А., Умаров Г. Я., Вайнер А. А. Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем. Ташкент : ФАН, 1977; Солнечные печи / под ред. В. А. Баума. М. : Иностранная литература, 1960; Грилихес В. А., Матвеев В. М., Полуэктов В. П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. С. 90—97.

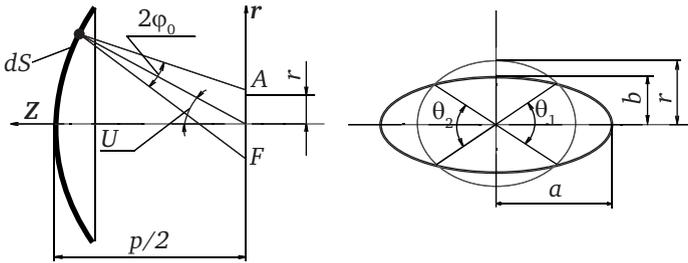


Рис. 1.1. Схема формирования фокального пятна в фокусе параболических концентраторов

От разных радиальных зон отражающей поверхности концентратора (с разными углами U) эллипсы имеют разные размеры, которые, накладываясь друг на друга, формируют плотность фокального облучения. Самой приближенной оценкой максимальной плотности излучения в фокусе является подсчет по формуле

$$E_F = \rho_{\text{отр}} \frac{1}{\varphi_0^2} \sin^2 U_m E_0, \quad (1.2)$$

где $\rho_{\text{отр}}$ — коэффициент отражения концентратора; φ_0 — угол раскрытия элементарного солнечного луча; U_m — наибольший угол раскрытия парабоида на сторону (угловые градусы); E_0 — плотность солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Несовершенство отражающей поверхности концентратора при этом приводит к размытию пятна вследствие несовпадения их центров по случайному закону. Лучше всего освещенность в фокальном пятне (E_r) описывается кривой нормального распределения Гаусса:

$$E_r = E_{\text{max}} e^{-cr^2}, \quad (1.3)$$

$$E_{\text{max}} = \left(\frac{180}{\pi} \right)^2 E_0 \rho_{\text{отр}} h^2 \sin^2 U, \quad (1.4)$$

$$c = 3,283 \cdot 10^3 \left(\frac{h}{p} \right)^2 (1 + \cos U)^2, \quad (1.5)$$

где r — радиус в фокальной плоскости; h — мера точности концентратора, характеризует форму распределения облученности.

На рис. 1.2 показано влияние меры точности h на характер распределения энергии по фокальному пятну (максимальное значение меры точности $h = 4 \text{ град}^{-1}$ или $h_k = 229 \text{ рад}^{-1}$, соотношение между этими значениями определяется выражением $h = h_k \pi / 180$).

С технологической точки зрения определять неточности поверхности в процессе изготовления концентраторов и оценивать отдельные технологические этапы по вносимым погрешностям удобнее по откло-

нениям луча от точки расчетного фокуса, что можно проверить непосредственно в процессе осуществления технологии и определить среднюю квадратичную погрешность поверхности. На рис. 1.3 приведена связь между средней квадратичной погрешностью отклонения реальных лучей от расчетной точки фокуса и мерой точности¹. Ниже будут рассмотрены вопросы определения средней квадратичной угловой погрешности при оптических испытаниях концентраторов, результаты которых по рис. 1.3 могут быть представлены как энергетические характеристики в фокальном пятне.

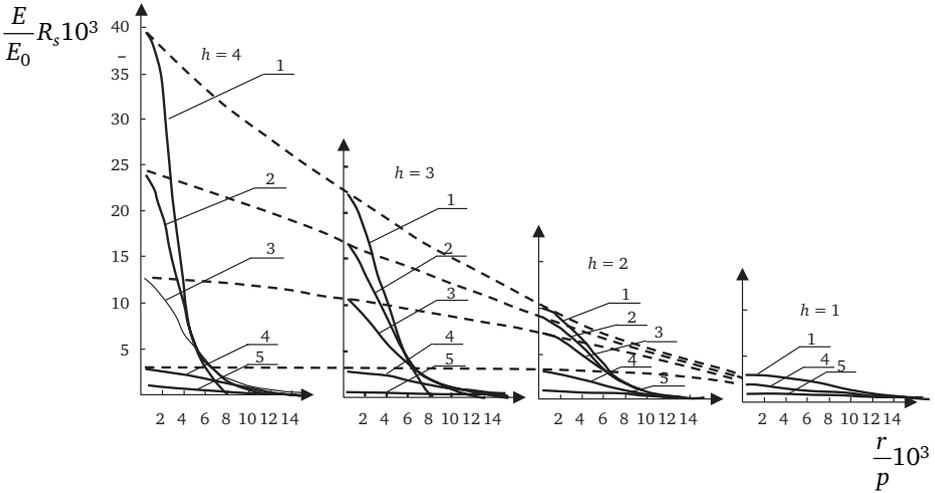


Рис. 1.2. Влияние меры точности h на характер распределения облученности в фокальном пятне для параболоида с углом раскрытия $U = 60^\circ$

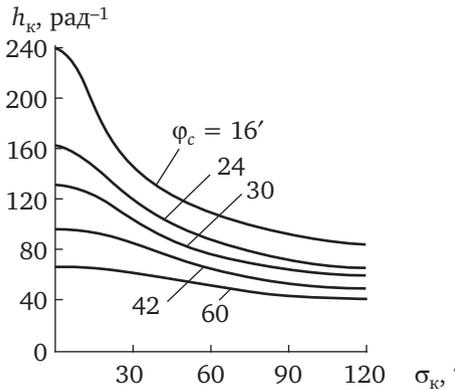


Рис. 1.3. Связь меры точности h_k со средней квадратичной погрешностью отклонений лучей от расчетного фокуса (σ_k) параболоидных концентраторов при разных значениях углового размера солнечного диска (для Земли $16'$)

¹ Грилихес В. А., Орлов П. П., Попов Л. Б. Солнечная энергия и космические полеты. М.: Наука, 1984. С. 23—27.

1.2. Центробежный метод изготовления параболических концентраторов

1.2.1. Физические принципы метода центробежной отливки параболических концентраторов

Наилучшие стеклянные параболические зеркала (диаметром до 3 м) изготавливались по дорогой технологии: плоское стекло деформировали при нагреве, придавая форму параболического, затем механической обработкой доводили поверхность до нужного качества и точности. Другой метод получения параболических поверхностей строится на свойстве жидкости приобретать параболическую поверхность при равномерном вращении. Впервые таким способом знаменитый оптик Р. Вуд¹ изготовил параболическое ртутное зеркало. Затем были предложены способы зафиксировать форму ртути в твердом материале путем нанесения на нее во время вращения затвердевающих смол². Суть метода строится на свойстве жидкостей с разными удельными весами образовывать эквипотенциальные поверхности при равномерном вращении (рис. 1.4). Форма образующегося параболического определяется выражением

$$z = \frac{\omega^2}{2g}(x^2 + y^2), \quad (1.6)$$

где ω — угловая скорость вращения (с^{-1}); g — ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$); z, x, y — линейные координаты. Выражение (1.6) задает параболический с параметром параболы $1/a^2 = \omega^2/(2g)$.

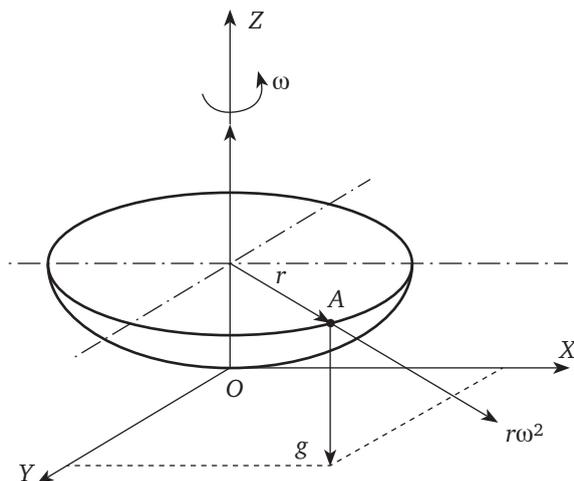


Рис. 1.4. Схема образования параболической формы поверхности жидкости при вращении

¹ Wood R. W. // *Astrophysics*. 1909. № 29. P. 164—176.

² Archibald P. B. // *Solar Energy*. 1957. № 2/3. P. 102.

Представляет принципиальный интерес влияние вращения Земли на формообразование свободной поверхности жидкости, т. е. влияние ускорение Кориолиса, что может сказаться при проведении отливок большого диаметра (несколько десятков метров), для которых данный метод изготовления будет наиболее выгоден.

На рис. 1.5 приведена схема, показывающая, что в системе «Земля — центробежная установка» частицы жидкости участвуют в двойном движении, а именно вокруг своей оси и вокруг оси вращения Земли. На частицу A действуют следующие силы:

- центробежная $\omega^2 r$, направленная по радиусу r ;
- сила от вращения Земли, равная $2\Omega V_r$, где Ω — угловая скорость вращения Земли, $V_r = \omega r$ — скорость частицы в относительном движении;
- центробежная сила от вращения Земли $\Omega^2 H$, где H — радиус точки A относительно оси вращения Земли;
- сила тяжести g .

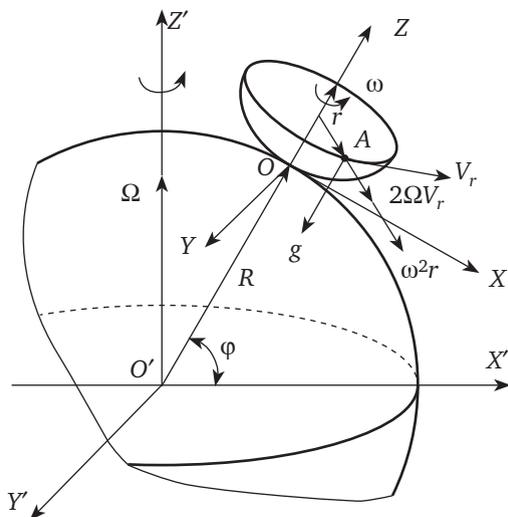


Рис. 1.5. Схема для расчета ускорения Кориолиса при центробежных отливках большого диаметра

Учет всех приведенных сил приводит к уравнению свободной поверхности вращающейся жидкости в виде

$$z = \frac{(\omega^2 + 2\Omega\omega \sin \varphi)}{2(g - \Omega^2 H \cos \varphi)} x^2 + \frac{(\Omega^2 H \sin \varphi)}{(g - \Omega H \cos \varphi)} x + \frac{(\omega^2 + 2\Omega\omega)}{2(g - \Omega^2 H \cos \varphi)} y^2. \quad (1.7)$$

В результате преобразований получаем уравнение поверхности на полюсе Земли:

$$z = \frac{(\omega + \Omega)^2}{2g} r^2. \quad (1.8)$$

На экваторе при $\varphi = 0$ формула приобретает вид

$$z = \frac{\omega^2}{2g} x^2 + \frac{\omega^2 + 2\Omega\omega}{2g} y^2, \quad (1.9)$$

соответствующий эллиптическому параболоиду.

Анализ выражения (1.9) показывает, что при отливке на экваторе параболоида диаметром 30 м разность между большой и малой полуосями эллипса составит 1,94 мм.

1.2.2. Технология центробежной отливки параболоидных матриц-оригиналов

Суть технологии заключается в следующем: на равномерно вращающуюся жидкость наливают более легкий материал, который в процессе вращения отверждается. В результате получают выпуклую форму-оригинал с гладкой поверхностью высокой чистоты, оформленной на разделе двух жидкостей, например ртуть — жидкий полимер. На рис. 1.6 показаны отлитые на ртути матрицы-оригиналы из эпоксидной смолы диаметром 200 мм (1, 2) и отражатель (3), изготовленный методом гальванопластики из никелевых электролитов.

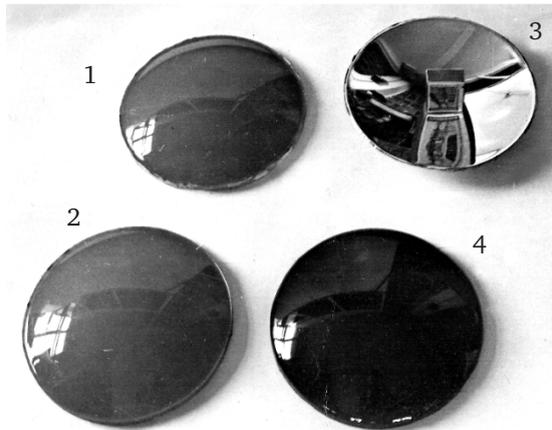


Рис. 1.6. Матрицы-оригиналы (1, 2) из эпоксидной смолы, отлитые на ртути; никелевая гальванокония (3); матрица из пека, отлитая на глицерине (4)

Работа со ртутью опасна и вредна, поэтому был предпринят поиск других материалов, позволяющих получать отливки с необходимым качеством формы и поверхности.

Были опробованы материалы, требующие выдерживания температурных режимов. Положительный результат (рис. 1.6, 4) был получен для каменноугольного пека с добавкой битума в качестве формообразующего отвердевающего вещества и глицерина с добавкой хлористого кальция (CaCl_2) в качестве жидкого подслоя. Каменноугольный пек

имеет удельный вес $1,2 \cdot 10^3$ кг/м³, температуру плавления 70 °С, подслон имел удельный вес $1,39 \cdot 10^3$ кг/м³, добавка битума применялась в качестве пластификатора. Процесс требует жестких температурных режимов, отливки получаются качественные, но очень хрупкие, пригодные для получения только одной гальваноконии.

Другой технологией, давшей положительные результаты, явилась технология использования в качестве жидкого подслоя фторорганических жидкостей с удельным весом, приближающимся к $2 \cdot 10^3$ кг/м³, в качестве материала формы — эпоксидных компаундов. В процессе отработки технологий были уточнены факторы, влияющие на качество отливки, а именно:

- разность удельных весов матрицы и подслоя должна быть не менее $0,5 \cdot 10^3$ кг/м³;
- вибрация фундамента установки вызывает кольцевые волны, поэтому система передачи от привода к заливочной чаше должна иметь компенсационные звенья, например муфты с эластичными элементами;
- требование к вертикальности оси вращения чаши вытекает из основополагающих принципов этого процесса (см. рис. 1.4), в противном случае возникает кольцевая деформация поверхности отливки.

В результате проведенной работы был предложен способ центробежной отливки параболоидных матриц на «твердом подслое». Суть предложенного способа¹ состоит в том, что полимерную смолу наливают на поверхность твердого подслоя вместо ртути. В качестве такого подслоя используют жидкий силиконовый каучук, который обладает антиадгезионными свойствами по отношению к большому количеству полимерных смол. Для защиты поверхности каучука от воздушных возмущений его поверхность защищают слоем более легкого силиконового масла, которое затем сливают.

Суть способа заключается в том, что в чашу сначала заливают слой эпоксидной смолы, который полимеризуется в процессе вращения. Поверхность полученной вогнутой параболоидной формы непригодна к использованию в качестве отражающей поверхности из-за различных дефектов (раковины от пузырей воздуха, пленки помутнения от взаимодействия с влагой воздуха и т. д.), но она является первым приближением по своей форме к расчетному параболоиду. На полученную поверхность наносят разделительный слой в виде кремнийорганического каучука, который, исправляя дефекты первого слоя, уточняет форму параболоида и дает зеркальную вогнутую поверхность. При этом усадочные явления почти не портят качество поверхности, так как каучук имеет низкую усадку и залит слоем равной толщины по всей поверхности. Затем на подготовленный подслон заливают первый тон-

¹ Авторское свидетельство № 238126. Способ изготовления форм для центробежной отливки деталей / Н. С. Лидоренко, Ф. Х. Набиуллин, З. М. Бузова, Т. Л. Варакина, М. С. Сладков, Э. В. Тверьянович, В. П. Сазонов // БИ. 1969. № 9.

кий слой эпоксидного компаунда без наполнителя, затем более толстый слой смолы с наполнителем для уменьшения усадочных явлений. При необходимости в этот слой вводят арматуру.

Была разработана установка с диаметром чаши 2,5 м (рис. 1.7), со стабилизированным электроприводом, с точностью установки вертикальности оси ± 15 угловых секунд¹. На рис. 1.8 показана отлитая эпоксидная матрица-оригинал диаметром 1,5 м.



Рис. 1.7. Экспериментальная установка для отливки параболоидных матриц-оригиналов диаметром до 2,5 м:

1 — чаша для отливки; 2 — секторная матрица; 3 — гальванокпия с нее

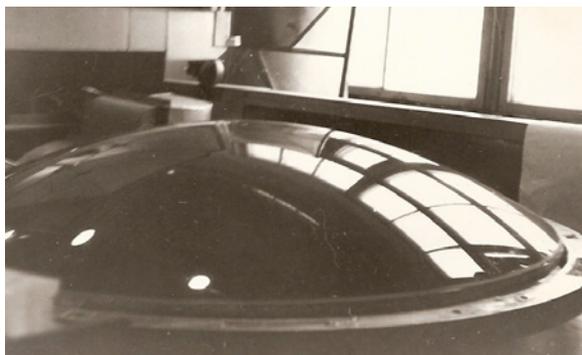


Рис. 1.8. Матрица-оригинал диаметром 1,5 м в процессе подготовки к изготовлению гальванокпии на поворотном столе

¹ Тверьянович Э. В. и др. Изготовление параболоидных концентраторов методом центробежной отливки с последующим съемом гальванокпий // Доклады Ереванской конференции по гелиотехнике. М. : ВНИИТ, 1969. С. 199—206; Тверьянович Э. В. Исследование деформаций матриц-оригиналов методом тензометрии // Гелиотехника. 1972. № 1. С. 25—29; Тверьянович Э. В., Набиуллин Ф. Х., Бузова З. М. Изготовление параболических форм-оригиналов методом центробежной отливки // Концентраторы солнечной энергии. Л. : Энергия, 1972. С. 23—27.

Рассмотрим более подробно погрешности формы параболоида, возникающие при центробежном методе его изготовления.

Происходят усадки полимерных материалов при переходе из жидкой фазы в застывшую. Для подслоя из силиконовых материалов усадку устраняют подготовкой дна емкости и многоразовыми заливками тонких слоев.

Была проведена проверка качества параболоидной поверхности подслоя из силиконовых каучуков диаметром 1,5 м. Проверка проводилась методом единичного луча (см. ниже) с записью на фотопластинку. Результаты приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Продольные отклонения луча от точки расчетного фокуса для подслоя отливки диаметром 1,5 м

$R_{\text{нач}}$ — $R_{\text{кон}}$, нм	750— 700	700— 650	650— 600	600— 550	550— 450	450— 350	350— 250	250—0
F , см ²	2280	2120	1070	1810	3140	2520	1890	1970
M	0,129	0,12	0,116	0,102	0,178	0,143	0,107	0,111
0°	+3	+5	0	-1	0	-3	-4	-6
45°	+2	+6	+3	+1	-2	-2	-3	-4
90°	+3	+4	0	-2	-3	-2	-4	-5
135°	+2	+4	0	-2	-1	-2	-3	-4
180°	+4	+4	-1	-1	-1	-3	-4	-5
225°	+3	+3	-3	0	-1	-2	-2	-6
270°	+3,5	+4	0	-1	-2	-2	-2	-4
315°	+3	+4	-1	-2	-1	-2	-3	-5

Примечание. $R_{\text{нач}}$ — $R_{\text{кон}}$ — граничные радиусы зон, нм; F — площади зон, см²; M — ценность зон. Отклонения даны в миллиметрах.

Отливка матрицы-оригинала производилась из эпоксидных компаундов разного состава. Первый слой толщиной 3—4 мм заливается из смолы с большим количеством пластификатора и разбавителя для уменьшения вязкости и усадочных явлений. На рис. 1.9 видно, что компаунд первого слоя имеет самую малую усадку, но длительность полимеризации составляет 8 сут.

Погрешности, вносимые усадками при изготовлении матрицы-оригинала, изучались по показаниям тензометрических датчиков, установленных внутри отливки на среднем слое по толщине (рис. 1.10). С их помощью фиксировалась деформация средней поверхности матрицы по всем технологическим операциям, что позволило оценить влияние усадочных и температурных факторов на точность параболоидной поверхности.

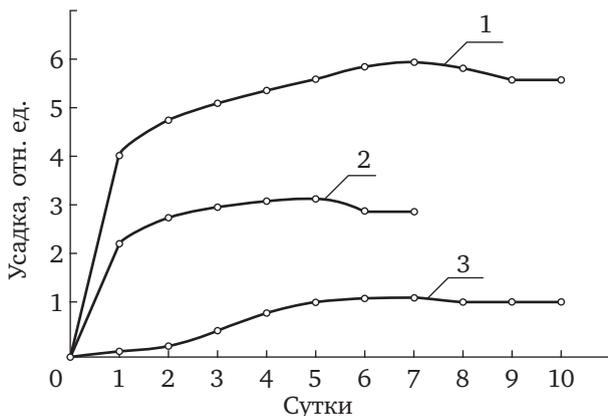


Рис. 1.9. Длительность усадки в эпоксидных заливочных компаундах: 1 — стандартный компаунд без наполнителя; 2 — компаунд с наполнителем; 3 — пластифицированный компаунд первого слоя

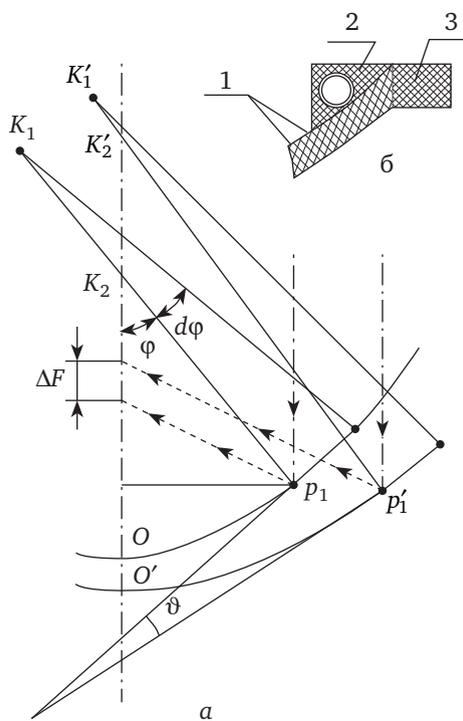


Рис. 1.10. Определение отклонения нормалей от начальной точки p_1 до p_1' поверхности по показаниям тензометрических датчиков, угловое отклонение касательной ϑ (а); схемы заделки арматуры (1) и отбортовки (2) для обруча жесткости (3) (б)

В теории тонких оболочек для определения деформаций используется уравнение совместности перемещений и деформаций, связывающее угол поворота нормали с относительной деформацией:

$$\delta_N = \left(\varepsilon_1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \varepsilon_2 \right) \operatorname{ctg} \vartheta - \frac{1}{\rho_1} \frac{d(\rho_2 \varepsilon_2)}{d\varphi}, \quad (1.10)$$

где δ_N — угол поворота нормали в меридиальном сечении; ε_1 — относительное меридиальное удлинение элементов поверхности; ε_2 — саггитальное удлинение; ρ_1, ρ_2 — меридиальные и саггитальные радиусы кривизны поверхности; φ — угол между нормалью и оптической осью.

Относительное удлинение элементов определяется по показаниям тензодатчиков как $\varepsilon = \Delta L/L$, где ΔL — приращение базы датчика к первоначальной длине L .

Если известны параметры оболочки и экспериментально определены ε_1 и ε_2 , то можно вычислить угол поворота нормали δ_N при деформации в некоторой точке поверхности. Отраженный луч в данной точке отклонится от расчетного фокуса на величину $\delta = 2\delta_N$.

Весь процесс изготовления концентратора по описываемой технологии состоит из следующих технологических операций, представленных на рис. 1.11: отливка матрицы-оригинала, гальванопроцесс изготовления вогнутой формы (операция 1), выпуклой формы (2) и концентратора (3).

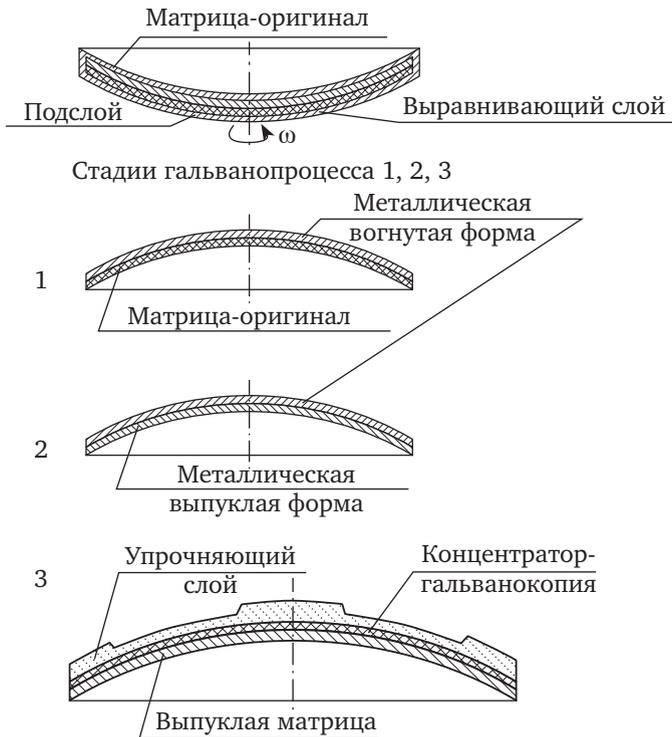


Рис. 1.11. Технологические операции при изготовлении концентраторов по отлитым матрицам: отливка матрицы-оригинала; изготовление с помощью гальванопластики вогнутой формы (1), выпуклой формы-матрицы (2), концентратора (3)

Поскольку жидкость в процессе вращения чаши находится в относительном покое, т. е. не движется относительно чаши, метод центробежного литья может быть применен для изготовления отдельных фрагментов составных параболических концентраторов или концентраторов типа зеркал Френеля, для которых поверхность каждого кольца такого зеркала выполнена по параболической форме и изготовлена при соответствующей скорости вращения и смещения оси чаши по отношению к оси вращения (рис. 1.12).



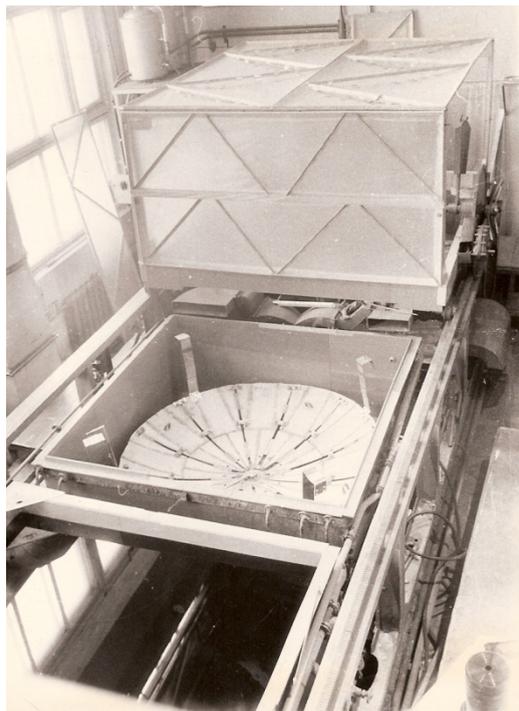
Рис. 1.12. Секторная отливка матрицы-оригинала для концентратора \varnothing 2,5 м на установке для изготовления гальванокопий

1.2.3. Метод гальванопластики в изготовлении параболических концентраторов

Гальванопластика дает возможность изготовить легкие металлические концентраторы высокой точности и любых необходимых размеров¹. Метод производства концентраторов заключается в следующем. На матрицу, имеющую желаемую конфигурацию и высокий класс чистоты отражающей поверхности, химическим способом наносят токопроводящий слой серебра, на который затем электрохимически осаждают слой металла, например никеля или меди, заданной толщины. К полученной копии прикрепляют каркас жесткости, после чего копию отделяют от матрицы.

Отработка технологии первоначально велась на стеклянных матрицах, затем на полимерных, изготовленных методом центробежной отливки. Была изготовлена гальваническая технологическая линия для матриц размером до 1,5 м, схема которой приведена на рис. 1.13.

¹ *Набиуллин Ф. Х. и др. Метод гальванопластики в изготовлении параболических концентраторов // Концентраторы солнечной энергии. Л. : Энергия, 1972. С. 19—23.*



**Рис. 1.13. Технологическая линия для изготовления гальванокопий
Ø до 2,5 м**

Предварительно матрицу тщательно очищали, обезжировали и устанавливали в контактирующее устройство. Создание надежного контакта между слоем серебра, нанесенным химическим путем, и подводными электрическими токами шинами — один из важных факторов, влияющих на качество гальваноконструкции. Контакты должны обеспечивать равномерный подвод тока ко всей покрываемой металлом поверхности.

Перед нанесением на матрицу слоя химического серебра поверхность ее активируют путем обработки раствором двуххлористого олова. Серебро осаждают из водного раствора азотнокислого серебра, в качестве восстановителя при этом служит инвертированный сахар. После нанесения серебра производят электролитическое осаждение первичного слоя никеля толщиной 10—15 мкм (так называемая «затяжка» никелем). Первичное осаждение никеля можно производить как из сернокислого, так и сульфаминового электролитов. Электролит должен обеспечивать пластичность осаждающего никеля, иначе пленка за счет сил внутренних напряжений, возникающих в осаждающемся металле, может оторваться от формы. Внутренние напряжения в никелевом слое уменьшают за счет введения в электролит специальных органических добавок.

После первичного осаждения никеля на копию наращивают толстый слой металла. Электролиты для наращивания толстых слоев должны:

1) обеспечивать достаточно высокую производительность; 2) иметь высокую рассеивающую способность, чтобы изделие имело одинаковую толщину на любом участке поверхности.

К металлу, осаждаемому гальванопластическим способом, предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, он должен быть достаточно твердым и прочным, чтобы гальванопластические копии сохраняли форму в процессе эксплуатации; с другой — не слишком хрупким, так как чрезмерные внутренние напряжения, возникающие в твердом слое, ведут к короблению копий. Для наращивания толстых слоев металла используют сернокислые электролиты никелирования или омеднения.

После окончания наращивания копию вместе с матрицей тщательно промывают теплой водой, высушивают и прикрепляют к ней каркас для придания жесткости. После этого копию отделяют от матрицы. Общий вид копии, полученной с полимерной формы диаметром 1,5 м, показан на рис. 1.14.



Рис. 1.14. Гальванокопия, созданная по отлитой из эпоксидной смолы матрице-оригиналу \varnothing 1,5 м (по краям концентратора выполнена отбортовка для крепления обода жесткости)

По тензодатчикам, установленным в матрице-оригинале, контролировались деформации формы на всех технологических операциях, что дало возможность составить гистограмму (рис. 1.15) возникновения деформации формы по операциям и внести корректировки для их уменьшения.

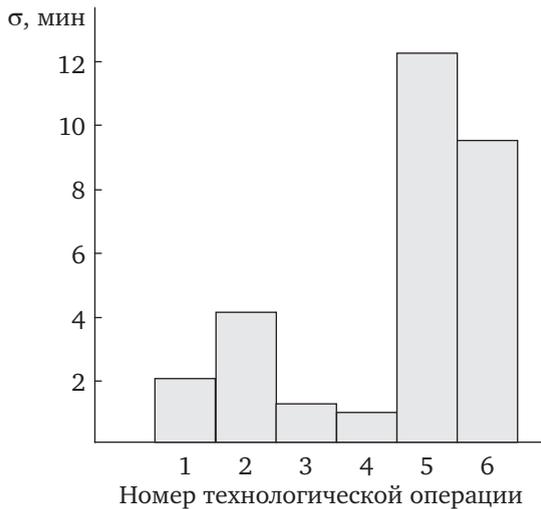


Рис. 1.15. Средние квадратичные угловые погрешности матрицы-оригинала из полимерных материалов, возникающие в процессе изготовления на следующих технологических операциях:

1 — усадка; 2 — заделка арматуры; 3 — отделение матрицы от подслоя; 4 — изготовление отбортовки по периметру; 5 — термодформации при гальванопластике; 6 — окончательная погрешность матрицы (уменьшение суммарной погрешности по сравнению с этапом 5 объясняется взаимной компенсацией отклонений на разных этапах)

Завершая тему центробежных отливок, следует отметить их большие возможности помимо тех, которые рассмотрены выше. Так, этим методом можно изготовить концентратор с заданным распределением энергии в фокальном пятне¹. Суть метода поясняется рис. 1.16. Чаша для отливки матриц выполнена в виде отдельных кольцевых емкостей, в которых отливки ведут отдельно, при этом смещают на необходимую величину центр вращения чаши. Поле отливки всех кольцевых участков их объединяют в единую матрицу.

1.3. Параболоиды из стекла

1.3.1. Метод моллирования стекла

Метод моллирования, хорошо известный в стеклянной промышленности, заключается в прогибе листового стекла на металлическую матрицу при нагреве до температур размягчения стекла под действием силы веса или вакуума. Таким методом изготавливались прожекторные отражатели диаметром до 3 м, этим же методом изготавливаются отражатели строительных прожекторов диаметром до 0,5 м.

¹ Авторское свидетельство № 209674. Способ изготовления концентрирующих зеркал / Ф. Х. Набиуллин, М. С. Сладков, Э. В. Тверьянович, Б. В. Тарнижевский // БИ. 1968. № 5.

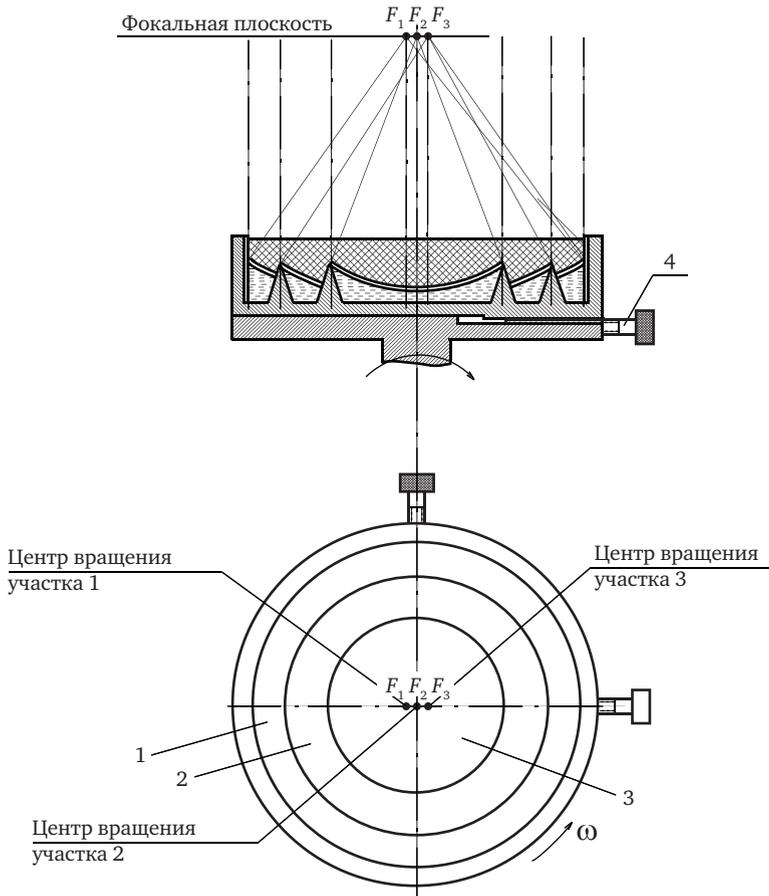


Рис. 1.16. Способ отливки матрицы с заданным распределением облученности в фокальном пятне:

1, 2, 3 — кольцевые участки с центрами вращения F_1, F_2, F_3 ; 4 — механизм смещения чаши вращения по отношению к оси вращения

Для изготовления концентратора диаметром 10 м для высокотемпературной солнечной печи в г. Ереване¹ была предложена матрица для моллирования отдельных фрагментов концентратора с перенастраиваемой поверхностью². Суть метода демонстрируется на рис. 1.17. Матрица состоит из плиты 1, на которой установлены стойки 2 с поворотными площадками 4. Перед моллированием площадки 4 устанавливаются по касательным к необходимой поверхности 3 с помощью специальных шаблонов. Ориентированные площадки на стойках 2 фиксируются.

¹ Тверьянович Э. В. и др. Исследование и разработка полупромышленной высокотемпературной установки с диаметром концентратора 10 м // Доклады первой Всесоюзной конференции по возобновляемым источникам энергии. М. : Энергия, 1972. С. 236—246.

² Авторское свидетельство № 1250792. Матрица для изготовления факет концентратора солнечной энергии методом моллирования стекла / В. В. Ростокинский, Э. В. Тверьянович, М. Г. Шекоян, А. В. Вартамян, К. Ф. Мадейян, В. В. Афан // БИ. 1986. № 30.

Таким образом, матрица готова к проведению процесса моллирования. При необходимости, используя другой шаблон, стойка 2 и площадки 4 могут быть перенастроены на другую поверхность 3. Использование таких матриц позволило изготовить концентратор¹ диаметром 10 м.

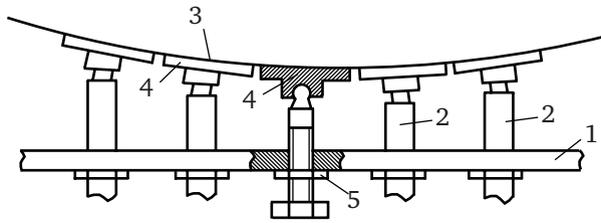


Рис. 1.17. Матрица с перенастраиваемой поверхностью для изготовления составных концентраторов методом моллирования (пояснения в тексте)

1.3.2. Изготовление отражающей поверхности из плоских изогнутых зеркал

Метод прогиба плоских зеркал для получения концентраторов значительных размеров с высшими оптическими характеристиками впервые использовал французский исследователь Ф. Тромб при изготовлении солнечной печи в Пиренеях. Стекло по этому методу прогибается по опорам, расположенным по его периферии, путем приложения усилий в центре стекла, причем величина прогиба должна находиться в пределах упругого прогиба. Был предложен оптический элемент, позволяющий осуществить прогиб отражающих фацет на небольших пластинах. На рис. 1.18 показан оптический элемент 1, прогиб которого по металлической подложке 2 осуществляет винт 5 через резиновые прокладки 8. Большое количество таких элементов, собранных на плоской панели 3, с помощью винтов 4 ориентируются так, что отражают солнечный поток в общий фокус².

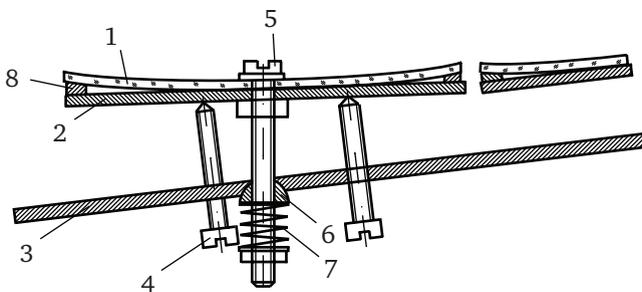


Рис. 1.18. Оптический элемент с прогнутыми плоскими зеркалами на плоском основании (пояснения в тексте)

¹ Алексанян А. М., Афян В. В., Батикян Г. А., Вартамян А. В. Разработка крупногабаритных параболических фацетных концентраторов // Гелиотехника. 1988. № 3. С. 24—28.

² Авторское свидетельство № 684262. Оптический элемент / Э. В. Тверьянович, В. В. Мадаев, С. С. Сюлаев, А. Н. Корягин, К. В. Жуков, А. В. Вартамян // БИ. 1979. № 33.