

УДК 536.24

В.М. БАТУРКИН, В.К. ЗАРИПОВ, Ч. АНДРАКА

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ФИТИЛЕЙ КУПОЛОВ РЕСИВЕРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В установках и устройствах, использующих излучение Солнца, всё шире находят применение тепловые трубы [1-4]. Приёмники излучения на основе тепловых труб существенно повышают эффективность высокотемпературных ресиверов солнечных энергетических установок либо солнечных низкотемпературных коллекторов водонагревательных устройств.

В качестве капиллярных структур высокотемпературных тепловых труб - ресиверов обычно применяются фитили из сеток, порошков или, в последнее время, из войлоков. Например, в работах [2, 3] использованы высокопористые войлоки

(пористостью 95...98%) из стальных длинных волокон диаметром 4 и 8 мкм. Эти структуры показали высокие теплотранспортные характеристики, пригодные для создания ресиверов с тепловой мощностью до 80 кВт. Недостатком таких фитилей оказалась невысокая прочность, что привело к нестабильности геометрических параметров структур в процессе их функционирования.

В работах [3, 4] описаны результаты исследований альтернативной конструкции металлической войлочной фитиля, изготовленного на основе дискретных монодисперсных волокон длиной 3мм и диаметром 30 мкм. Эти войлоки имеют более низкую пористость (80...90%),

но обладают значительно более высокой механической прочностью. Структурные, гидродинамические и механические свойства таких фитилей оказались вполне приемлемыми с точки зрения их использования в качестве капиллярно-пористых покрытий теплообменных поверхностей абсорберов ресиверов.

Весьма важным для дальнейшего использования данного типа фитилей при серийном производстве солнечных высокотемпературных энергетических установок является отработка технологии изготовления структур и технологии нанесения такого покрытия на наружную поверхность купола абсорбера ресивера с целью обеспечения надёжного механического и хорошего теплового контактов купола с фитилём.

Описанные в литературе методы изготовления капиллярно-пористых структур, а также способы их соединения с корпусом тепловой трубы [4-7], в данном случае, мало приемлемы. В основном из-за больших габаритов изделий (0,4...0,7 м, площадь покрытия - 0,1...0,25 м²) и значительной кривизны тепловоспринимающей поверхности (радиус полусфер от 0,17 до 0,244 м и более).

Поэтому целью настоящей работы являлось:

1) разработка технологии изготовления фитилей для двух размеров ресиверов: малого (наружный радиус 178 мм, высота 119 мм, масса 1118 г) и большого (247 мм, 173 мм, 2014 г) куполов (угол раскрытия $146 \pm 0,5^\circ$, толщина стенки 0,89 мм), изготовленных из никелевого сплава Haynes Alloy 230;

2) исследование свойств фитилей ресиверов, спеченных из стальных монодисперсных дискретных волокон диаметром 30 мкм, длиной $3 \pm 0,2$ мм. Материал волокон сталь 316L.

1 Особенности технологии изготовления фитилей на криволинейной поверхности
Традиционная технология изготовления фитилей из монодисперсных дискретных волокон, приведенная в работе [8, глава 6.1], предполагает резку микропроволоки, войлокование, спекание и прессование волокон, нанесение и крепление готового фитиля в оболочке тепловой трубы (механически, точечной сваркой или спеканием). Однако, такая последовательность операций оказалась неприемлемой при изготовлении куполов ресиверов, так как приводит к образованию волнистости (гофров) фитиля при покрытии плоской структурой криволинейной поверх-

ности. Избежать появления гофров можно предварительным секционированием фитиля, однако, это приводит к ухудшению его гидравлических характеристик из-за щелей между секциями при их сборке. Устранить эти щели полностью невозможно. Кроме того, трудно обеспечить хорошее качество контакта (например, спеканием) при креплении готового фитиля к поверхности, особенно неплоскостной поверхности по причине неравномерного прилегания волокон во всех точках.

В данной работе особенности изготовления фитилей на поверхности малого и большого куполов заключались в изменении способа войлокования, а также объединении нескольких технологических операций. Так войлокование, которое осуществлялось с помощью специально разработанной оснастки, позволило совместить 3 операции: формования капиллярной структуры, как массива, непосредственно на поверхности купола, соединения дисперсных волокон друг с другом, крепления капиллярной структуры к поверхности купола с помощью спекания.

Спекание проводилось в вакуумной печи при оптимальных параметрах: времени - 2 часа и рабочей температуре - 1240°C при разрежении в печи - 10^{-4} мм рт. ст.

С целью увеличения механической прочности соединения фитиля с поверхностью купола, согласно рекомендациям работы [4], на поверхности пористого покрытия равномерно размещался груз из керамических элементов. Среднее значение удельной нагрузки на капиллярное покрытие при спекании составляло около 1 г/см². Прижим структуры к куполу и принятые условия спекания обеспечили качественную диффузионную сварку волокон с куполом, а также между собой с образованием капиллярно-пористой структуры сферической формы толщиной 12...13 мм и объёмной пористостью около 95%. Масса волокон в фитилях малого и большого куполов составила 694 г и 1228 г, соответственно.

Для придания фитилям окончательной толщины ($4 \pm 0,1$ мм) и объёмной пористости (81% на малом куполе и 83% на большом) они подвергались прессованию. Как выяснилось в ходе экспериментов, два традиционных способа прессования: 1) с помощью пуансона и матрицы, 2) с помощью роликов - оказались малоприспособными, так как приводили к частичному вытягиванию фитиля вдоль образующей купола.

В данной работе для прессования фитилей на куполах было сконструировано, изготовлено и применено специальное устройство. В процессе многократного прессования оно обеспечивало приложение силы перпендикулярно поверхности купола в любом месте прессования. Расстояние между опорным и прессующим элементами задавалось с помощью микрометрического винта с ценой деления 10 мкм. Усилия прессования находились в диапазоне $1...5 \text{ кг/см}^2$.

После прессования купол вместе с фитилём повторно спекался в печи с целью образования шеек контактов между волокнами, которые дополнительно возникали в процессе прессования. Температура спекания - 1200°C , время - 2 часа, среднее значение удельной нагрузки на поверхность пористого покрытия при спекании примерно 1 г/см^2 .

2 Механическая прочность фитилей и качество их соединения с криволинейной поверхностью. В работе [4] приведены результаты исследования механических свойств образцов металловолокнистых фитилей размером $10 \times 10 \text{ мм}$, в том числе, качества их соединения с подложками. Однако приведенные в работе данные о прочности плоских небольших по размеру образцов фитилей, достаточно сложно применить к структурам криволинейной формы, поэтому усилия отрыва фитилей от плоских подложек явно неадекватны значениям в случае сферических поверхностей. В данной работе были

проведены исследования зависимости усилий отрыва фитилей от поверхности криволинейной формы.

В качестве опытных образцов были использованы: 1) малый купол: наружный радиус 178 мм, высота 120 мм, масса 1124 г, толщина фитиля 4 мм, пористость 81,6%, масса фитиля 677 г, высота офитилённой части купола 103 мм; 2) фрагмент купола: ширина фитиля 120 мм, длина 232 мм, радиус изгиба подложки 177 мм, толщина фитиля 4 мм, пористость 81,8%.

Массив фитиля прорезывался корончатой фрезой с целью создания не связанных с массивом пятчиков капиллярной структуры диаметром 10 мм и высотой 4 мм, к поверхности которых приклеивались металлические болтики (рис. 1, а, в). Специальный стенд позволял отрывать пятчики фитилей в направлении, строго перпендикулярном поверхности купола (или фрагмента) в любой точке отрыва. Точность измерения усилий отрыва - не хуже 10 г/см^2 . Схема установки представлена на рис. 1, б.

В результате проведенных экспериментов выяснились следующие обстоятельства. Усилия отрыва капиллярной структуры от криволинейной поверхности зависят от положения точки отрыва: чем дальше эта точка удалена от вершины, тем ниже значение σ , которое примерно пропорционально косинусу угла ψ , определяющему положение исследуемой точки на поверхности ($0^\circ -$

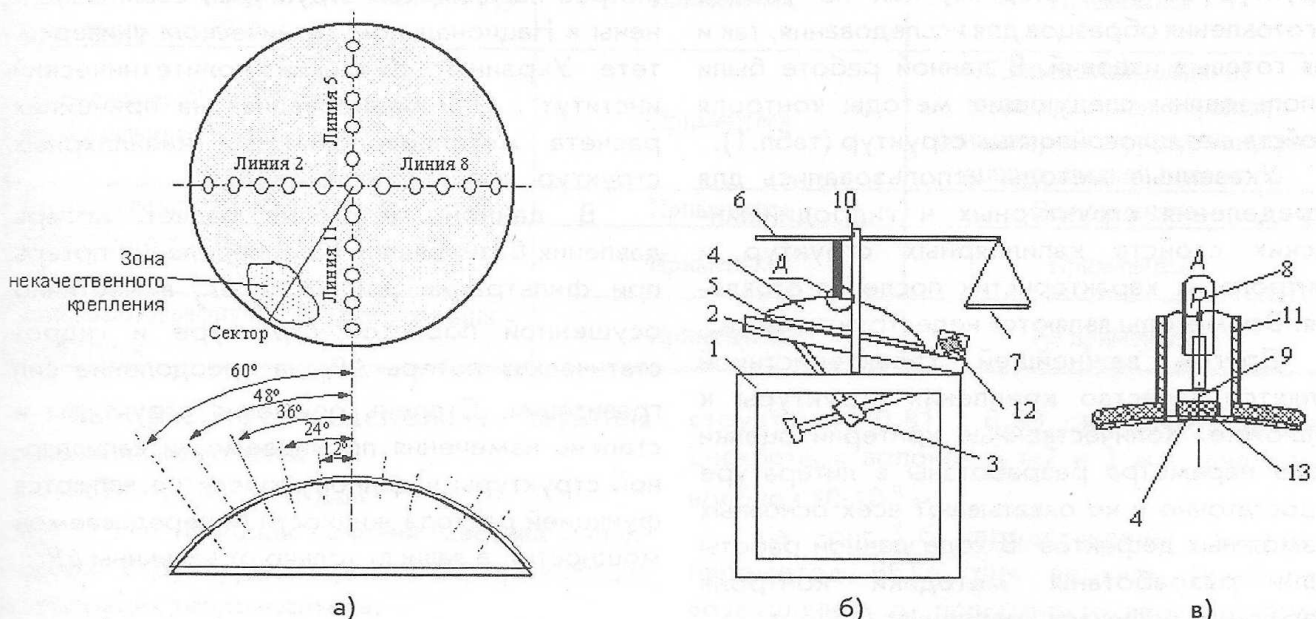


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования усилий отрыва фитилей от криволинейной поверхности. Схема расположения контрольных точек (а), схема установки (б), фрагмент сечения купола (в). Обозначения:

- 1 - основание; 2 - плита; 3 - устройство для изменения угла; 4 - испытываемый купол;
- 5 - фиксатор купола; 6 - плечо; 7 - чаша весов; 8 - штанга, передающая нагрузку; 9 - болт;
- 10 - рама; 11 - трубка; 12 - показатель угла; 13 - исследуемая область фитиля.

вершина купола, 80° - край купола). Для сравнения: величина s аналогичных плоских фитилей, но имеющих существенно меньшие исходные размеры, составляет около 1,2 МПа.

Усилия отрыва фитилей, спеченных с поверхностью фрагмента купола в условиях удельной нагрузки на структуру при спекании порядка $0,6 \text{ г/см}^2$, оказались существенно выше по сравнению с куполом, где фитиль спекался с поверхностью только под собственным весом. В последнем случае была обнаружена небольшая зона неудовлетворительного качества крепления фитиля к куполу (рис.1,а).

Данные исследований по отрыву образцов от поверхности опытного образца купола позволили откорректировать методику соединения структуры и корпуса ресивера и изготовить капиллярную структуру на поверхности куполов по предлагаемой технологии.

На рис.2 представлен внешний вид куполообразных зон испарения тепловых труб (абсорберов ресиверов), изготовленных по предложенной технологии.

3 Методы контроля характеристик капиллярных структур. Помимо исследования жидкостной проницаемости и механических свойств металловолокнистых структур [4, 5, 8], важным условием их дальнейшего использования в солнечных ресиверах является создание методик контроля основных свойств пористых структур на всех стадиях, как на уровне изготовления образцов для исследования, так и для готовых изделий. В данной работе были использованы следующие методы контроля свойств металловолокнистых структур (табл.1).

Указанные методы использовались для определения структурных и гидродинамических свойств капиллярных структур и контроля их характеристик после изготовления. Эти методы являются неdestructивными.

Другой важнейшей характеристикой является качество крепления структуры к подложке. Количественные критерии оценки этого параметра разработаны в литературе недостаточно и не охватывают всех основных возможных дефектов. В ходе данной работы были разработаны методики контроля следующих дефектов крепления:

- наличие отслоения между структурой и подложкой, когда между ними образуется щель больше некоторого критического размера;
- наличие зон неприсоединения "структу-

ра-подложка", когда между ними не существует механического и теплового контакта;

- механический и тепловой контакт структуры и подложки ослаблен (ниже критического значения).

Наиболее достоверные результаты количественного контроля этих дефектов дают методы с использованием визуального контроля, контроля зондами, рентгенодефектоскопия (неразрушающие методы), определение усилий отрыва структуры от подложки на образцах и определение плотности контактов волокон на подложке (методы разрушающего контроля).

4 Расчетная база для определения теплопередающей способности металловолокнистых фитилей солнечных ресиверов

Основным функциональным назначением ресиверов с капиллярно-пористыми покрытиями является передача теплоты падающего солнечного потока путём реализации замкнутого испарительно-конденсационного цикла теплоносителя. Передача теплоты осуществляется за счёт переноса массы циркулирующего теплоносителя, поэтому гидродинамика жидкой и паровой фаз в ресивере определяет его теплопередающую способность, которая является основной теплотехнической характеристикой ресивера.

Предварительные теоретические расчёты, которые послужили для выбора параметров капиллярной структуры, были выполнены в Национальном техническом университете Украины "Киевский политехнический институт". Они базировались на принципах расчета металловолокнистых капиллярных структур, представленных в [8].

В данной методике расчет потерь давления базировался на определении потерь при фильтрации жидкости ΔP_f в частично осушенной пористой структуре и гидростатических потерь ΔP_h на преодоление сил гравитации. Степень осушения структуры и степень изменения проницаемости капиллярной структуры в данной модели не являются функцией расхода жидкости (и передаваемой мощности), а зависят только от величины ΔP_h :

$$\Delta P_h = \rho_l \cdot g \cdot y, \tag{1}$$

где ρ_l - плотность жидкости;
 g - гравитационное ускорение;
 y - геометрическое превышение относительно свободной поверхности жидкости.

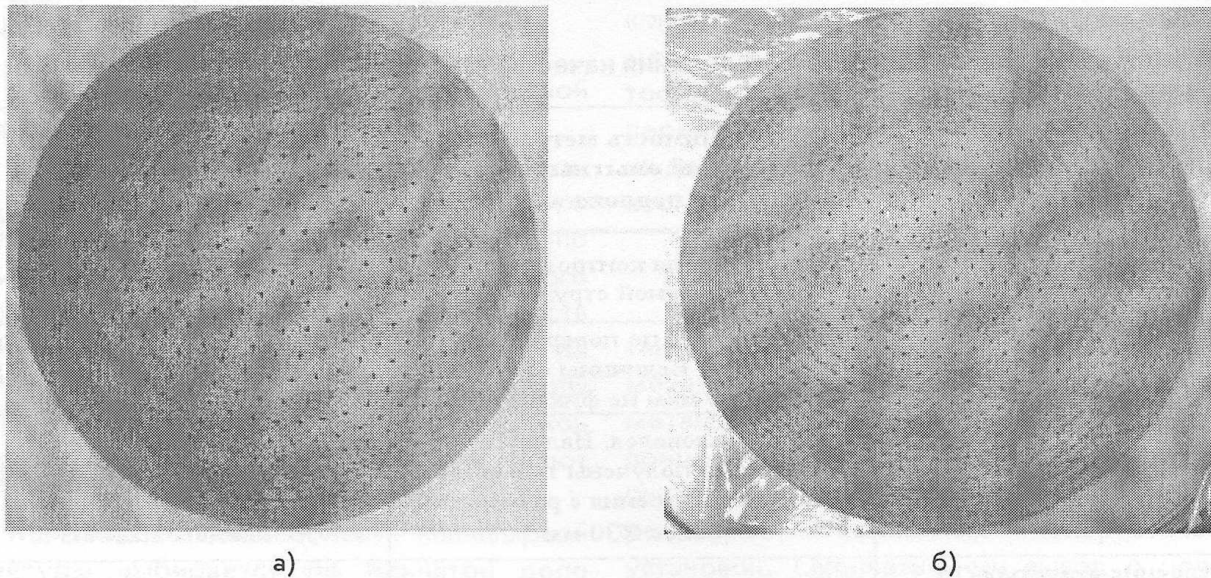


Рис. 2. Капиллярно-пористые покрытия корпусов тепловых труб радиусом R177 (а) и R244 мм (б)

Таблица 1

Перечень используемых методов контроля металловолоконных структур

Параметр или метод	Применимость метода для исследований опытных образцов на подложках	Применимость метода для исследований готовых изделий с нанесенной капиллярной структурой
Средняя пористость	Применялся	Применялся
Локальная пористость	Применялся	Применение возможно
Интегральная однофазная проницаемость	Применялся (фильтрация при постоянной и переменной линейной скорости)	Применялся только на цилиндрических образцах
Двухфазная проницаемость	Применялся	Не применялся
Локальная проницаемость	Применялся	Применение возможно
Впитывание жидкости в сухую структуру (определение эффективного диаметра $D_{эф}$ и соотношения $K/D_{эф}$)	Применялся	Применялся
“Пузырьковый” тест (определение максимального диаметра пор D_{max})	Применялся	Применялся только на цилиндрических образцах (капиллярная структура внутри цилиндрической подложки)
Распределение пор по размерам	Применялся	Не применялся
Микрофотография поверхности структуры	Применялся	Применялся
Микрофотография поперечного сечения структуры	Применялся	Не применялся

На рис.3,а представлена функция изменения комплекса

$$BETA = (FK)_y / (FK)_{y=0},$$

где F - площадь сечения массива капиллярной структуры, в которой происходит фильтрация теплоносителя;

K_f - жидкостная проницаемость капиллярной структуры.

Расчёт проведен для капиллярной структуры ресивера R177 при пористости

структуры 0,81, 0,83 и 0,86, длинах дискретных волокон $l_f = 2$ и 3 мм, диаметре волокон $30 \cdot 10^{-6}$ м.

На рис.3,б представлены значения параметра BETA для верхних (наиболее возвышенных от поверхности зеркала) точек структуры. Точка с максимальным осушением в данной модели совпадает с наиболее поднятой над поверхностью жидкости точкой капиллярной структуры.

Величина потерь при фильтрации

Таблица 2

Используемые методы для определения качества крепления структуры и подложки

Метод	Применимость метода для исследований опытных образцов на подложках	Применимость метода для исследований готовых изделий с нанесенной капиллярной структурой
Визуальный контроль и контроль зондами зазоров и отслоения	Применим для контроля на краю капиллярной структуры	Применялся
Поиск отслоения путем измерения толщины капиллярной структуры	Применим по поверхности структуры. Величины отслоения менее 100 мкм не фиксируются	Применим по поверхности. Величины отслоения менее 100 мкм не фиксируются
Использование инфракрасного сканирования поверхности	Использовался. Надежные результаты получены только для областей отслоения с размерами более Ø30 мм	Метод требует предварительной тарировки и разработки методики для каждого изделия
Отслоение структуры от подложки путем прикладывания усилия по нормали или по касательной к поверхности	Применялся на всех стадиях отработки технологии	Применялся для контроля двух пробных ресиверов R177
Использование рентгенодефектоскопии	Использовался на плоских поверхностях	Использовался на плоских поверхностях криволинейных испарителей тепловых труб
Акустические методы	Имеются данные о возможности применения, но метод не использовался	Не использовался
Определение электрического сопротивления контакта	Проведены пробы, систематически метод не использовался	Не использовался

жидкости ΔP_f в частично осушенной пористой структуре определяется на основе решения уравнения фильтрации со свойствами, зависящими от координат x, y, z (или сферических координат):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_l}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_l}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_l}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

Граничными условиями для задачи являются равенство давления на границе структуры и жидкости в нижней части ресивера, и заданная величина скорости жидкости на поверхности структуры, пропорциональная заданной плотности подводимого теплового потока q ($v_l = q/(r\rho_l)$, где r - скрытая теплота парообразования) [9].

Решение такой задачи осуществляется для трехмерных конфигураций структуры с помощью конечно-элементного пакета TAS (Thermal Harvard Inc., США), для двухмерной и псевдо трехмерной конфигурации - с помощью конечно-элементного пакета HEAT90 (НТУУ "КПИ", Украина). На рис. 3, в представлен пример расчета поля потерь давления в капиллярной жидкости для ресивера в трехмерной поставновке.

Суммарные потери давления в жидкой фазе $\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_h(y)$ определяются суммой

двух составляющих потерь давления. Сравнивая величину ΔP с величиной капиллярного давления $\Delta P_{cap} = 4 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta) / D_{eff}$ (σ - поверхностное натяжение жидкости, θ - краевой угол смачивания, D_{eff} - эффективный диаметр пор) можно определить максимальный передаваемый тепловой поток.

Дальнейшее моделирование процессов, протекающих в солнечных ресиверах, было проведено в Sandia National Laboratories (г. Альбукерк, США), результаты которого описаны в работе [10]. Это моделирование позволило более детально проанализировать влияние факторов, формирующих предельную мощность, учесть реальную функцию распределения подвода тепла к поверхности фитиля, а также учесть влияние фильтрации пара по объему осушенной структуры, связать гидродинамическую и тепловую модели капиллярной структуры.

Одной из важных особенностей модели [10] является использование интерпретации изменения жидкостной и паровой проницаемости K_l и K_v в зависимости от доли пустот в капиллярной структуре, заполненной паром α :

$$K_l(\alpha) = K_{l-pn} (1 - \alpha)^3,$$

$$K_v(\alpha) = K_{1-PI} \alpha^2,$$

где K_{1-PI} - проницаемость однофазной среды.

Вторая особенность этой модели заключается в использовании экспериментально полученных функций распределения пор по размерам с целью определения капиллярного давления. Теплопередающая способность капиллярной структуры анализируется на основе расчетных функций "объемная доля пустот, заполненных паром"= f (подводимой мощности). Эти типичные зависимости имеют вид, представленный на рис. 4, а,б.

Максимальная способность капиллярной структуры выбирается по принятой доле осушенных пор α . Критическое значение этой величины определяется на основе опытных данных по осушению и зависит от вида капиллярной структуры. Для металлических войлоков диапазон $\alpha=0,6...0,7$. Приняв эти значения, как критерий для оценки теплопередающей способности, проводится расчет теплопроводности конкретной

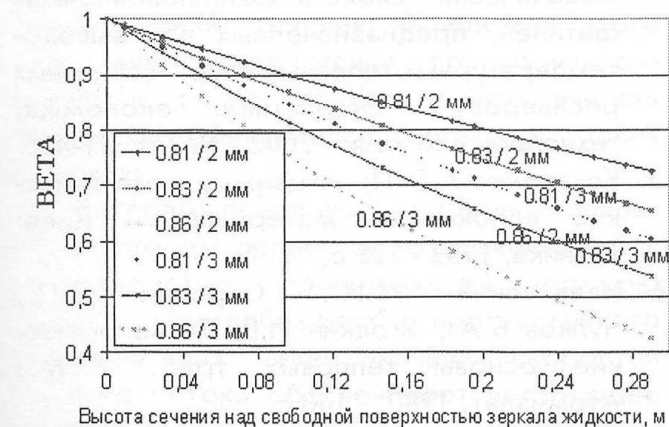
конструкции капиллярной структуры. Например, для ресивера R177 с фитилем пористостью 83% и толщиной 4 мм максимальная передаваемая мощность (при подпитке жидкости только из лужи, т.е. без рефлюкса) составляет от 47 до 57 кВт.

Выводы

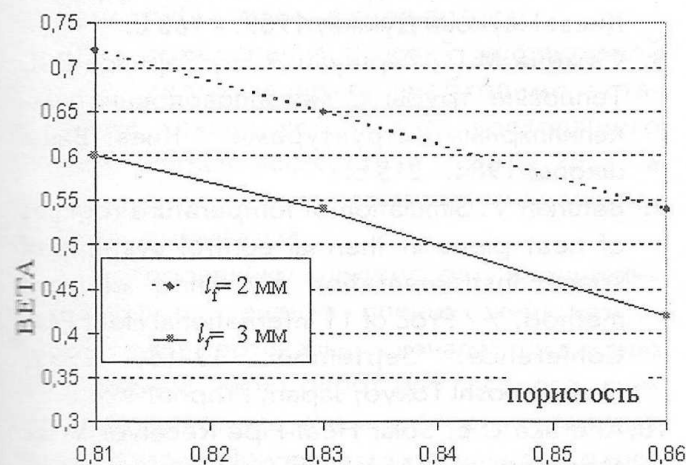
Разработанная технология изготовления, а также структурные, гидродинамические и механические свойства предложенных металловолоконных фитилей позволяют применить эти капиллярно-пористые структуры при производстве высокотемпературных ресиверов солнечных энергетических установок. Окончательный вывод о целесообразности использования разработанных конструкций абсорберов ресиверов будет сделан после их полномасштабных испытаний.

Благодарность

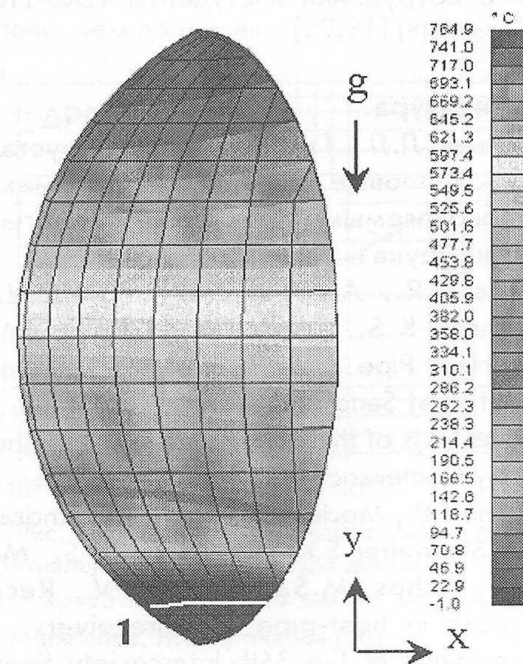
Результаты статьи получены в ходе совместного проекта № T1-0013-UA "Development of Advanced Heat Pipe Wicks for



а)



б)



в)

Рис.3. Изменение комплекса BETA как функции высоты относительно уровня жидкости (а); минимальное значение комплекса BETA как функция пористости структуры и длины волокна (б); вариант расчета величины фильтрационных потерь в ресивере R177 при пористости 0,81, толщине структуры 4 мм и длине волокна 2 мм (в): 1- положение свободной поверхности зеркала теплоносителя

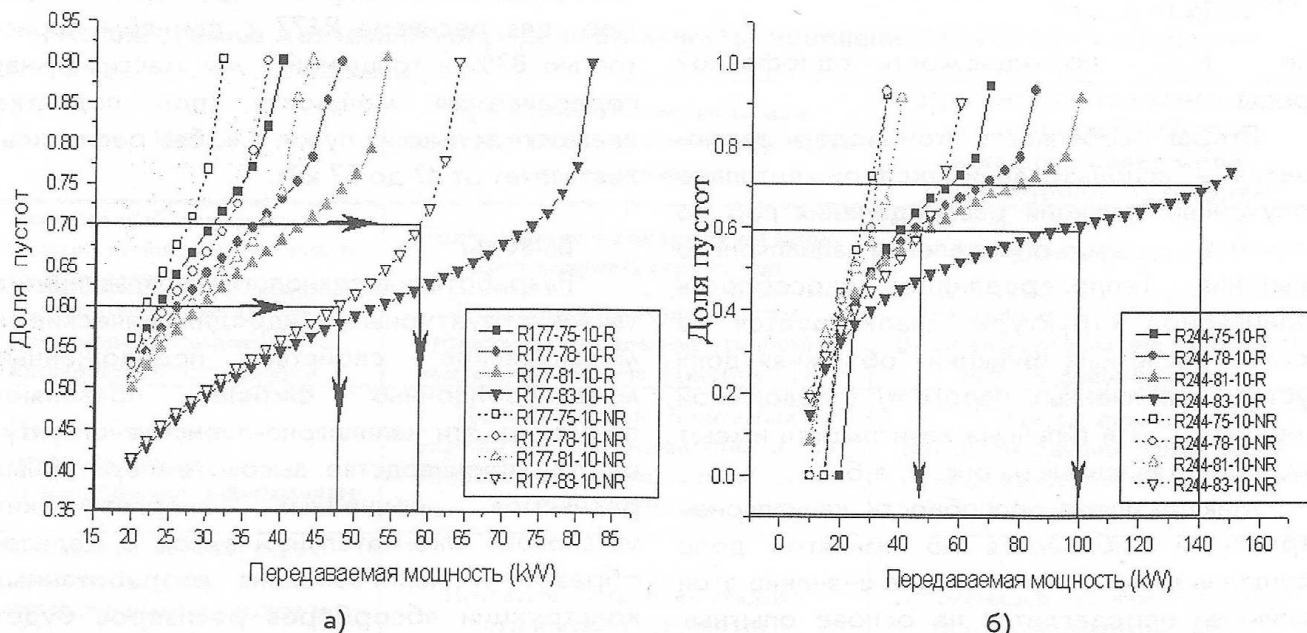


Рис. 4. Доля осушенных пор как функция подводимой мощности для ресиверов R177 (а) и R244 (б). Величина, после названия купола, показывает значение пористости, угол отклонения от вертикали; индексы R или NR указывают на наличие или отсутствие рефлюкса (системы для подвода жидкости в центральную часть фитиля). Теплоноситель - натрий, температура 750°C

High Temperature Solar Receivers" при поддержке Министерства Энергетики США в рамках программы "Инициативы по нераспространению вооружений" (IPP). Участниками проекта являются Sandia National Laboratories (США), National Renewable Energy Laboratory (США) и НТУУ "КПИ", Лаборатория тепловых труб (Украина). В выполнении данной части проекта принимали также участие Жук С.К., Нищик А.П., Савченко А.С., Шевель Е.В. и другие сотрудники и студенты ТЭФ НТУУ "КПИ".

Литература

1. Васильев Л.Л., Гракович Л.П., Хрусталёв Д.К. Тепловые трубы в системах с возобновляемыми источниками энергии. - Минск: Наука и техника, 1988.- 159 с.
2. Adkins D.R., Andraka C.E., Moreno J.B., Rawlinson K.S., Showalter S.K., and Moss T.A. Heat Pipe Solar Receiver Development Activities at Sandia National Laboratories. // Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Conference, Maui, HA. - 1999.
3. Moreno J.B., Modesto-Beato M.A., Andraka, C.E., Showalter S.K., Rawlinson K. S., Moss T.A., Mehos M.S., Baturkin V. Recent progress in heat-pipe solar receivers. // Proceedings of the 36th Intersociety Energy Engineering Conference, Savannah, GA. - 2001.
4. Батуркин В.М., Зарипов В.К., Кравец В.Ю. и др. Исследование структурных и механических свойств металловолоконных фитилей, предназначенных для высокотемпературных тепловых труб - солнечных ресиверов // Энергетика: економіка, технології, екологія. - 2002.- №2.-С.41-46.
5. Косторнов А.Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. - Киев: Техника, 1983 - 128 с.
6. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В. Технологические основы тепловых труб. - М.: Атомиздат, 1980. - 160 с.
7. Толубинский В.И., Шевчук Е.Н. Высокотемпературные тепловые трубы. - Киев: Наукова Думка, 1989. - 168 с.
8. Семена М.Г., Гершуни А.Н., Зарипов В.К. Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами. - Киев: Вища школа, 1984.- 215 с.
9. Baturkin V. Simulation of temperature regimes of heat pipes in thermal control systems of space instrumentation by finite element method. // Proc of 11 International Heat Pipe Conference, September 12-16, 1999, Musashinoshi Tokyo, Japan, Preprint Vo. 2.
10. Andraka C.E. Solar Heat-Pipe Receiver Wick Modeling. // ASME SED conference, Maui HI, April 11-16, 1999.