

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 90, № 1

Vol. 90, No. 1

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

JANUARY–FEBRUARY

2017

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2017. ТОМ 90, № 1 (ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Палкин В. А., Игошин И. С. Применимость потенциалов разделения для определения параметров эффективности каскада при обогащении трехкомпонентной смеси 3

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Филиппов А. И., Шабаров А. Б., Ахметова О. В. Температурное поле турбулентного потока в скважине с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры 12

Пицуха Е. А., Теплицкий Ю. С. О влиянии уноса частиц из неоднородного кипящего слоя на гидродинамику вихревой надслоевой зоны 23

Афанасьева С. А., Белов Н. Н., Буркин В. В., Дударев Е. Ф., Ищенко А. Н., Рогаев К. С., Табаченко А. Н., Хабибуллин М. В., Югов Н. Т. Моделирование ударно-волнового воздействия на титановый сплав 29

M. C. Ngono Mbarga, D. Bup Nde, A. Mohagir, C. Kapseu, and G. Elambo Nkeng. Moisture Sorption Isotherms and Properties of Sorbed Water of Neem (*Azadirachta Indica* A. Juss) Kernels 40

Аббасов Э. М., Агаева Н. А. Определение поля давления в пласте, деформируемом коллектором, при виброволновом воздействии на него 48

Некрасов С. А., Волков В. С. Компьютерное моделирование и оптимизация процесса оттаивания грунтов при помощи энергии СВЧ 55

Савин А. В., Моисеев А. А., Смирнов П. Г. Моделирование динамики обжига гранулы карбонатного минерала 64

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Микаилсой Ф. Д. О влиянии граничных условий при моделировании теплопереноса в почве 73

Карякин Ю. Е., Плетнев А. А., Федорович Е. Д. Численное моделирование процессов тепломассообмена при переводе отработавшего ядерного топлива с "мокрого" на "сухое" контейнерное хранение 86

Басок Б. И., Накорчевский А. И., Гончарук С. М., Кужель Л. Н. Экспериментальные исследования теплопередачи через оконные стеклопакеты с учетом действия внешних факторов 94

Васильев мл. Л. Л., Гракович Л. П., Драгун Л. А., Журавлев А. С., Олехнович В. А., Рабецкий М. И. Система охлаждения электронных компонентов 101

Дементьев В. Б., Иванова Т. Н., Долганов А. М. Исследование температуры нагрева и охлаждения массивных, тонких и клиновидных пластин из труднообрабатываемых сталей при их шлифовании 108

Просунцов П. В., Шуляковский А. В., Тараскин Н. Ю. Численное моделирование элемента тепловой защиты перспективного многоразового спускаемого аппарата капсульного типа 116

НАНОСТРУКТУРЫ

Приходько Н. Г., Смагулова Г. Т., Рахымжан Н. Б., Ким С., Лесбаев Б. Т., Нажипкызы М., Мансуров З. А. Сравнительное исследование композитных углеродных материалов на поглощающую способность солнечной энергии 123

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Горский В. В., Ковальский М. Г., Оленичева А. А. Определение кинетических констант окисления углеродных материалов на базе анализа результатов абляционных экспериментов 133

Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. О механизме взаимодействия двух капель воды, движущихся последовательно на малом расстоянии друг от друга в высокотемпературной газовой среде 142

Веселов С. Н., Волк В. И, Кашеев В. А., Подымова Т. В., Посеницкий Е. А. Математическое моделирование процесса кристаллизации в линейном кристаллизаторе непрерывного типа.....	148
--	-----

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Прохоров Е. С. Моделирование распространения газовой детонации в среде с переменным химическим составом	159
Комов А. Т., Варава А. Н., Дедов А. В., Захаренков А. В., Болтенко Э. А. Гидродинамика и теплообмен при сложном течении в кольцевом канале малого поперечного сечения.....	168
Сафронов А. А. Особенности капиллярного распада струи жидкости при числах онезорге больше единицы.....	176
Богданов В. И., Ханталин Д. С. Повышение лобовой тяги сферического газодинамического резонатора-усилителя импульса	186
Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Ершова В. А., Сандуляк А. В., Кононов М. А., Полисмакова М. Н. Об идентификации режимов потока в полишаровой среде с использованием скоростных зависимостей потерь напора	191
Nath G. and Sinha A. K. Nonsimilar Solution for Shock Waves in a Rotational Axisymmetric Perfect Gas with a Magnetic Field and Exponentially Varying Density.....	198

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

Вершинина К. Ю., Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование зажигания одиночных капель угольных суспензий и частиц угля в потоке окислителя	209
Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Инициирование процесса горения гелеобразного конденсированного вещества локальным источником ограниченной энергоемкости.....	218
Вершинина К. Ю., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование влияния концентрации компонентов органоводородного топлива на интегральные характеристики зажигания.....	230
Касымов Д. П. Экспериментальное исследование заглупления фронта горения в слой торфа различного ботанического состава.....	241

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Базюк С. С., Киселев Д. С., Кузма-Кичта Ю. А., Мокрушин А. А., Паршин Н. Я., Попов Е. Б., Солдаткин Д. М., Федик И. И. Исследование теплофизических и коррозионных характеристик оболочек эксплуатируемых и перспективных твэлов легководных реакторов при аварии с потерей теплоносителя	247
--	-----

РАЗНОЕ

Азарян Н. С., Батурицкий М. А, Будагов Ю. А., Демин Д. Л., Демьянов С. Е., Карпович В. А., Книга В. В., Кривошеев Р. М., Любецкий Н. В., Максимов С. И., Поболь И. Л., Родионова В. Н., Ширков Г. Д., Шумейко Н. М., Юревич С. В. Измерение СВЧ параметров сверхпроводящего ниобиевого резонатора	256
--	-----

ЛЮДИ НАУКИ

Леонард Леонидович Васильев (к 80-летию со дня рождения)	265
---	-----

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЛИНИЯ

О выходе в свет монографии	267
---	-----

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 01.11.2016. Формат 60×84%. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 31,85. Уч.-изд. л. 28,61. Тираж 108 экз. Заказ 219.

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

© Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси

НАНОСТРУКТУРЫ

УДК 543.272.73, 661.666.14

*Н. Г. Приходько^{1,2}, Г. Т. Смагулова¹, Н. Б. Рахымжан¹, С. Ким¹,
Б. Т. Лесбаев¹, М. Нажипкызы¹, З. А. Мансуров¹*

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СПОСОБНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Представлены результаты по исследованию эффективности поглощения солнечной энергии различными углеродными материалами (углеродные нанотрубки в виде "леса", сажа, карбонизованные абрикосовые косточки и рисовая шелуха), а также композитами на их основе с включением наночастиц оксидов металлов. Анализ эффективности поглощения солнечной энергии различными углеродными материалами показал преимущество углеродного материала из карбонизованных абрикосовых косточек. Представлены результаты его сравнительного исследования на поглощающую способность по сравнению с покрытием промышленного образца солнечного коллектора.

Ключевые слова: углеродный композитный материал, сажа, углеродные нанотрубки, карбонизованные абрикосовые косточки, карбонизованная рисовая шелуха, оксиды металлов, электроспиннинг, солнечный коллектор, эффективность поглощения солнечной энергии.

Введение. Задача изготовления солнечных коллекторов с повышенной способностью поглощения солнечной энергии имеет большое прикладное значение, поскольку при одних и тех же значениях эффективной площади поглощения солнечного коллектора теплосъем с единицы площади поглощения повышается. Учитывая тот факт, что коллектор является основным компонентом солнечного водонагревателя и его стоимость составляет большую часть стоимости всей системы, становится очевидным вопрос повышения его эффективности. Разрабатываются разные методы повышения эффективности поглощения коллектором солнечной энергии. Например, известны коллекторы с селективным покрытием — сильно поглощающие, но слабо излучающие в определенной области спектра, которым соответствуют некоторые полупроводники [1–3]. Однако применяемые в настоящее время полупроводники обладают низкой механической прочностью, низкой теплопроводностью и высокой стоимостью, что делает их малоприменимыми для изготовления всего приемника солнечного излучения. Для компенсации перечисленных отрицательных свойств полупроводников их наносят тонким слоем на металл, который обладает прочностью и хорошей теплопроводностью, но малой поглощательной способностью [2–4]. В итоге получают комбинированный нагреватель, который также имеет ряд недостатков: сложность и дороговизна покрытий по сравнению с простой окраской, хрупкость, плохо воспроизводимые параметры, интерференция волн в тонких пленках, многократное отражение на шероховатостях поверхности металла, "старение" покрытия и нецелесообразность использования для приемников, работающих при температурах ниже 60 °С.

Применение композитных углеродных материалов на базе углеродных нанотрубок является новым направлением в плане повышения эффективности поглощения солнечной энергии коллекторами. Известно, что углеродные нанотрубки ведут себя подобно абсолютно черному телу, поглощающему в широком спектральном диапазоне более 98% энергии падающего солнечного света [5–7]. Углеродные нанотрубки имеют высокую прочность, гибкость, высокую теплопроводность, а полученные при определенной технологии,

¹Институт проблем горения. Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172; ²Алматинский университет энергетики и связи. Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126; э-почта: nik99951@mail.ru. Поступила 09.04.2016.

способны также создавать протяженную бесконечную ленту субмикронной толщины, которую можно наматывать на любую конфигурацию солнечного приемника, изготовленного из любого материала [8, 9].

В данной работе получены и исследованы на поглощающую способность солнечной энергии различные углеродные материалы: углеродные нанотрубки в виде "леса", сажа, карбонизованные абрикосовые косточки (АК) и рисовая шелуха (РШ), а также композиты на их основе с включением наночастиц оксидов металлов. Для синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) и композитных углеродных материалов применялись следующие методы: получение композитных углеродных волокон методом электроспиннинга с добавлением в исходный раствор частиц сажи, оксидов металлов, карбонизованных абрикосовых косточек и рисовой шелухи, синтез методом парофазного осаждения на каталитическую подложку "леса" тянущихся углеродных нанотрубок. На основе сопоставления эффективности поглощения солнечной энергии различными углеродными материалами, нанесенными на модель солнечного коллектора, был определен углеродный материал, обладающий наибольшей поглощающей способностью, и проведено его сравнительное модельное исследование на поглощающую способность с покрытием промышленного образца (производство Китая) солнечного коллектора.

Экспериментальная часть. Экспериментальные исследования по оценке эффективности поглощения солнечной энергии полученными образцами углеродных материалов проводились на модели опытного образца солнечного коллектора. Модель состояла из двух стеклянных трубок (рис. 1). Трубка с нанесенным на поверхность поглощающим материалом помещалась внутрь трубки большего размера и герметизировалась. Это исключало конвективные потери тепла в процессе эксперимента. Трубки с разными покрытиями помещались в устройство и наполовину диаметра утапливались в теплоизоляционный материал (рис. 2). Во внутреннюю трубку наливалась дистиллированная вода в объеме 25 см^3 . Солнечному облучению открывалась поверхность высотой 10 см, покрытая опытным материалом. Нижняя и верхняя части стеклянной трубки, не покрытые исследуемым материалом, для исключения теплопотерь дополнительно покрывались теплоизоляционным материалом и закрывались ширмами, как это показано на рис. 2. Трубка закрывалась резиновой пробкой, через которую проходила хромель-алюмелевая термопара. Термопара доходила до середины высоты покрытой поверхности и не соприкасалась со стенкой трубки. Температура воды и интенсивность солнечного излучения измерялись через каждые 2 мин. Поглощательная способность солнечного излучения моделью солнечного коллектора оценивалась в течение 30 мин исходя из конечной температуры нагрева дистиллированной воды объемом 25 см^3 .

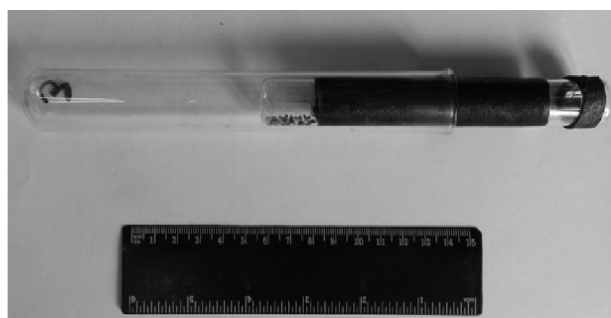


Рис. 1. Фотография общего вид модели солнечного коллектора в полусобранном виде

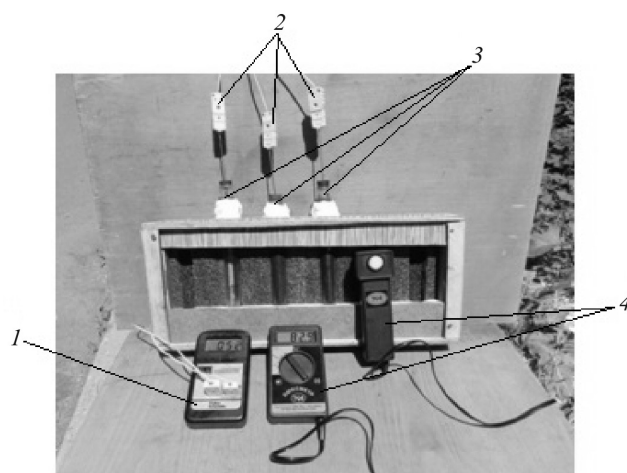


Рис. 2. Фотография модели солнечных коллекторов, помещенных в устройство с теплоизоляционным материалом, и измерительные приборы: 1 — прибор для контроля температуры; 2 — термопары; 3 — модели солнечного коллектора с разными покрытиями; 4 — прибор для контроля интенсивности солнечного излучения

Эксперимент осуществляли на открытом воздухе в солнечную погоду при стабильной инсоляции солнечного излучения. Интенсивность солнечного излучения (Вт/м^2) измеряли прибором PL-110SM (Solar Radiation Measuring Instrument) или фиксировали освещенность (лк) люксметром ТКА-ЛЮКС с переводом в интенсивность солнечного излучения (Вт/м^2). Исследования проводили путем сравнительной оценки поглощательной способности солнечной энергии различными углеродными материалами по величине поглощенного тепла объемом воды. Количество тепловой энергии $Q_{\text{в}}$, которое поглощается водой в модели солнечного коллектора за 30 мин эксперимента, определялось по формуле

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} M_{\text{в}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \text{ кДж} . \quad (1)$$

Количество тепловой энергии $Q_{\text{с}}$, которое поглощается стеклом внутренней трубки коллектора за 30 мин эксперимента, рассчитывалось по выражению

$$Q_{\text{с}} = c_{\text{с}} M_{\text{с}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \text{ кДж} . \quad (2)$$

Общее количество тепла, поглощенное исследуемым покрытием за 30 мин эксперимента, равнялось

$$\Sigma Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{с}}, \text{ кДж} . \quad (3)$$

Расчет удельной величины теплопоглощения единицей площади исследуемого покрытия за 30 мин эксперимента проводился по формуле

$$q = \Sigma Q / S, \text{ кДж/см}^2, \quad (4)$$

где $S = \pi d_c H_c / 2$ — тепловоспринимающая площадь исследуемого материала, принимаемая равной половине общей площади внутренней трубки коллектора, поскольку она утоплена наполовину диаметра в теплоизоляционный материал. Коэффициент эффективности теплопоглощения исследуемой поверхности η рассчитывался по следующему соотношению:

$$\eta = q / q_{\text{мак}} \cdot 100, \% , \quad (5)$$

где максимальная возможная величина удельного теплопоглощения за 30 мин эксперимента $q_{\text{мак}}$ принималась по климатологическому справочнику по средней величине значений интенсивности солнечной радиации. Для сравнительной оценки эффективности теплопоглощения различных покрытий при различной интенсивности солнечного излучения был введен удельный коэффициент эффективности теплопоглощения, получаемый путем отношения коэффициента эффективности теплопоглощения η к максимально возможной величине удельного теплопоглощения $q_{\text{мак}}$ за временной период:

$$\eta_{\text{уд}} = \eta / q_{\text{мак}} . \quad (6)$$

Результаты и обсуждение. Для получения композитных материалов, основой которых являются ультратонкие волокна с содержанием различных добавок (наночастицы оксидов металлов, сажа, карбонизованные АК, РШ и др.), равномерно распределенных в волокнах, применялся метод электроспиннинга. Метод электроспиннинга позволяет получать композитные материалы путем добавки в исходный полимерный раствор сажи, наночастиц оксидов металлов, порошков карбонизованных АК и РШ.

Были синтезированы и исследованы на поглощающую способность солнечной радиации композитные волокна на основе 3% дихлорэтанового раствора полиметилметакрилата (ПММА) с добавкой 1 г сажи, полученной при неполном сгорании пропан-бутановой смеси. Этот композитный материал являлся базовым для сравнения поглощающей способности последующих композитных волокон, получаемых с добавкой в этот же исходный состав (3% раствор ПММА + 1 г сажи) наночастиц оксидов металлов, порошков карбонизованных АК и РШ в объеме 3 мл. Для установления структуры и морфологии полученных волокон их исследовали на сканирующем электронном микроскопе (Quanta 3D 200i Dualsystem, FEI). На рис. 3 приведена типичная фотография композитного волокна, полученного методом электроспиннинга на основе ПММА и сажи. Фотография сделана с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

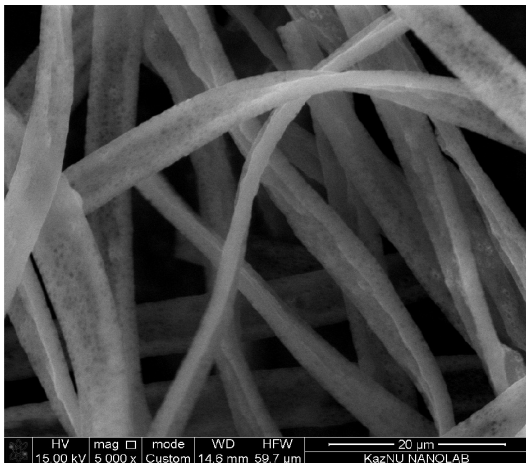


Рис. 3. СЭМ-фотография композитного волокна на основе ПММА и сажи

Полученные протяженные волокна на основе ПММА и сажи имеют диаметры 5–6 мкм (рис. 3). Сажевые частицы находятся внутри волокон и имеют размер от 180 до 365 нм (черные точки на волокне). При этом сажевые частицы располагаются практически равномерно по всей внутренней поверхности волокон, что обеспечивает эффективную поглотительную способность всей поверхности композитного материала. Ультратонкие волокна являются хорошим связующим и обеспечивают равномерное распределение дозированного количества нанодисперсных частиц по объему волокон и, следовательно, по поверхности солнечного коллектора. Полученный композитный материал наносили на внешнюю поверхность внутренней трубки модели солнечного коллектора на высоту 10 см. Синтезированные композитные волокна постепенно наворачивали на поверхность трубки, предварительно вытягивая в пленку примерно равной толщины, как показано на рис. 4. После нанесения волокон на стеклянную трубку их опрыскивали этанолом из пульверизатора. Это приводило к уплотнению покрытия, что создавало ровную однородную поверхность с хорошей адгезией к стеклянной трубке, вид которой приведен на рис. 4, б.

Результаты исследования влияния композитных материалов, полученных методом электроспиннинга на основе ультратонких волокон с добавлением сажи и наночастиц оксидов металлов, на эффективность поглощения солнечной радиации приведены в табл. 1. На основе анализа полученных результатов установлено, что синтезированные композитные материалы имеют разную поглотительную способность в зависимости от вида оксида металла. При этом наибольшую поглотительную способность показал материал с добавками оксида кобальта. Было установлено, что добавка сажи повышает эффективность поглощения солнечной радиации по сравнению с материалом без добавки сажи, что видно на примере материала на основе магнетита (табл. 1).

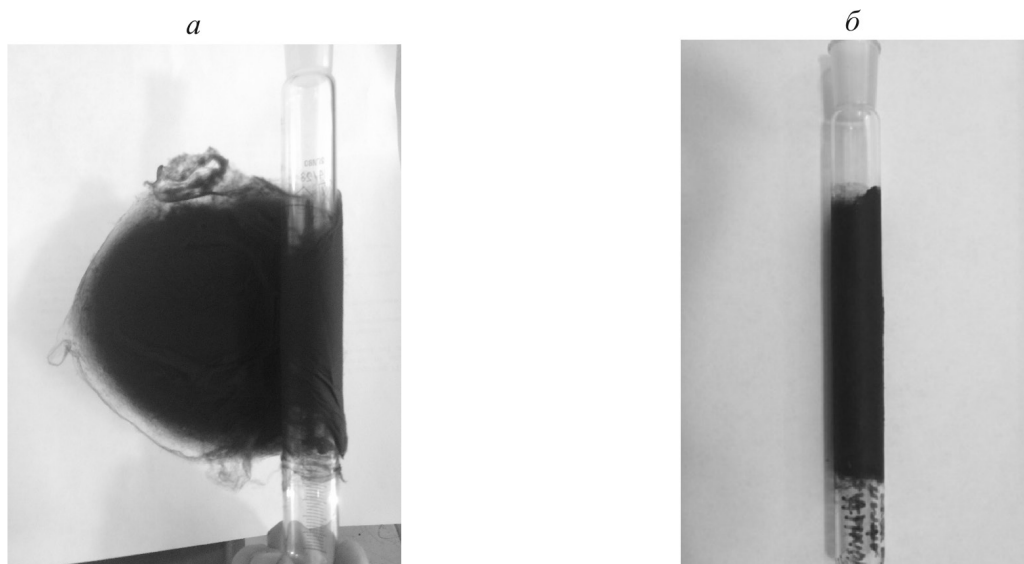


Рис. 4. Фотографии поверхности трубки солнечного коллектора до нанесения (а) и после нанесения ультратонких композитных волокон и уплотнения этанолом (б)

Таблица 1. Эффективность поглощения солнечной радиации композитными материалами, полученными методом электроспиннинга на основе ультратонких волокон с добавлением сажи и наночастиц оксидов металлов

Вид покрытия	Без покрытия	ПММА + сажа + Fe ₂ O ₃ (магнетит)	ПММА + сажа + NiO	ПММА + Fe ₂ O ₃ (магнетит)	ПММА + сажа + Co ₃ O ₄	ПММА + сажа
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	108.28	123.59	92.67	113.29	124.76	118.36
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	164.06	161.18	145.12	165.26	159.97	161.93
Эффективность η , %	66.00	76.68	63.85	68.55	78.22	73.09
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$	40.23	47.57	44.0	41.48	49.2	45.14

В табл. 2 представлены данные по исследованию композитных материалов, полученных методом электроспиннинга на основе ультратонких волокон с добавлением порошков карбонизованных АК, РШ и сажи. Анализ по табл. 2 значений эффективности поглощения солнечной энергии композитными материалами, нанесенными на модель солнечного коллектора, показывает их более высокую эффективность по сравнению с результатами покрытий на основе композитных материалов, приведенных в табл. 1. При этом установлено, что композитный материал на основе порошка карбонизованных АК с добавлением сажи имеет самую высокую поглощательную способность солнечной радиации (табл. 2).

УНТ в виде "леса", синтезированные методом парофазового осаждения, получены из США от профессора А. А. Захидова (Нанотехнологический институт при Техасском университете в Далласе). Образцы УНТ исследовали на Раман-спектрографе методом Рамановской спектроскопии или спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и на сканирующем электронном микроскопе. Результаты идентификации полученных УНТ представлены на рис. 5. Анализ фотографий, полученных на сканирующем электронном микроскопе, показал, что высота синтезированного "леса" УНТ составляет в среднем 300–350 мкм, а размер УНТ изменяется в пределах от 18 до 30 нм (рис. 5). УНТ в виде "леса" наматывались на стеклянные трубки с разным количеством слоев и исследовались на эффективность поглощения солнечной радиации. Фотографии тянущихся УНТ при наматывании на стеклянную трубку и общего вида трубок с разным количеством намотанных слоев УНТ приведены на рис. 6. Результаты исследования эффективности поглощения солнечного излучения углеродным материалом на основе "леса" тянущихся УНТ представлены в табл. 3. Анализ полученных результатов (табл. 3) по эффективности поглощения солнечной энергии УНТ, нанесенными на модель солнечного коллектора, показал, что их эффективность выше, чем эффективность композитных материалов, представленных в табл. 1. Как видно из табл. 3, повышение количества слоев в пределах от 10 до 14 практически не оказывает влияния на эффективность поглощения солнечной радиации и вполне достаточным является покрытие из 10 слоев УНТ.

Таблица 2. Эффективность поглощения солнечной радиации композитными материалами, полученными методом электроспиннинга с добавлением порошков карбонизованных абрикосовых косточек, рисовой шелухи и сажи

Вид покрытия	ПММА + АК	ПММА + сажа + АК	ПММА + сажа + РШ
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	126.37	147.79	131.00
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	145.12	154.38	154.38
Эффективность η , %	87.08	95.73	84.86
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$	60.01	62.01	54.97

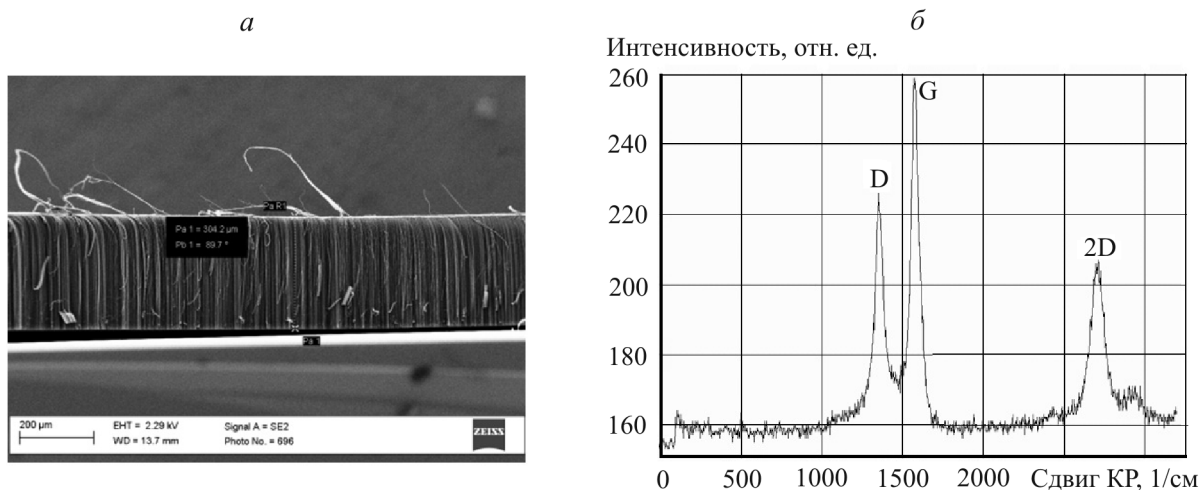


Рис. 5. Снимок СЭМ (а) и Раман-спектр (б) "леса" тянущихся УНТ

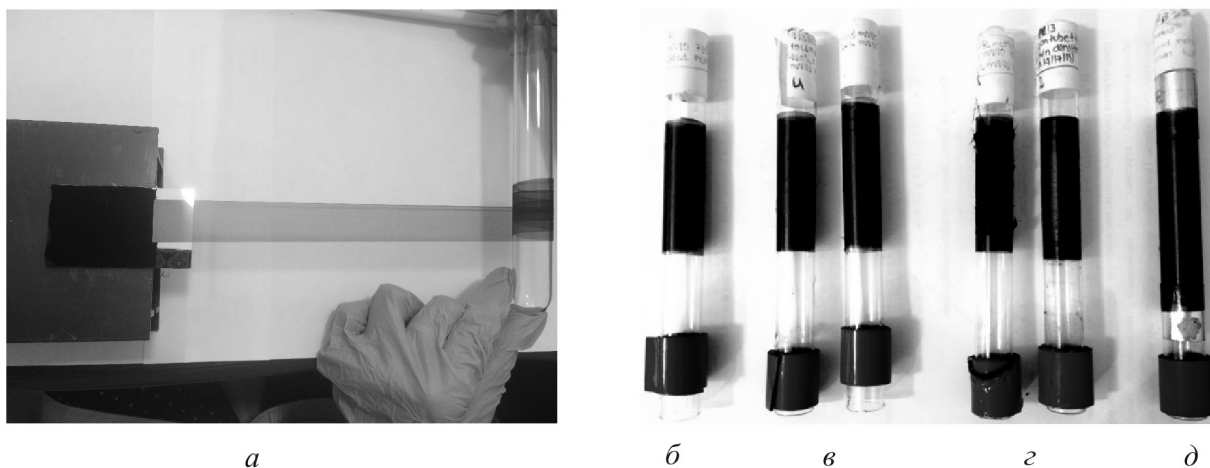


Рис. 6. Фотография тянущихся УНТ при наматывании на стеклянную трубку (а) и общий вид стеклянных трубок с разным количеством намотанных слоев УНТ: б — 10 слоев УНТ, высота намотки $H = 5$ см; в — 12 слоев, высота намотки $H = 5$ см; г — 14 слоев, высота намотки $H = 5$ см; д — 10 слоев УНТ, высота намотки $H = 7$ см

Таблица 3. Эффективность поглощения солнечной радиации покрытием модели солнечного коллектора материалом на основе углеродных нанотрубок

Вид покрытия	УНТ (10 слоев, $H = 7$ см)	УНТ (12 слоев, $H = 5$ см)	УНТ (14 слоев, $H = 5$ см)
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	146.22	153.53	148.26
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	161.91	168.21	161.38
Эффективность η , %	90.31	91.27	91.87
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}}$ · 10 ⁻²	55.78	54.26	56.93

Однако сравнение результатов по эффективности поглощения солнечной энергии УНТ (табл. 3) и композитным материалом на основе карбонизованных абрикосовых косточек (табл. 2) показало, что эффективность поглощения материалом на основе абрикосовых косточек выше, чем УНТ. С целью проверки данного факта была проведена серия экспериментов по сравнительной оценке поглощающей способности названных материалов при одних и тех же условиях. Результаты сравнения эффективности поглощения солнечной радиации названными материалами приведены в табл. 4. Сравнение эффективности поглощения солнечной радиации УНТ и композитными материалами на основе карбонизованных АК и РШ показывает, что композитный материал на основе абрикосовых косточек имеет бóльшую эффективность по поглощению солнечной радиации.

Далее были проведены сравнительные эксперименты по оценке эффективности поглощения солнечной энергии покрытиями на основе чистого порошка карбонизованных АК, РШ и УНТ. В качестве связующего и клеящего материала для нанесения порошка карбонизованных АК или РШ на стеклянную трубку использовалось жидкое стекло в количестве 1.5 мл на 1 г исходного порошка. Состав равномерно наносили на стеклянную трубку, высушивали и подвергали исследованию. Результаты сравнительного исследования эффективности поглощения солнечной энергии покрытиями на основе чистого порошка карбонизованных АК, РШ и УНТ приведены в табл. 5, а на рис. 7 представлена характерная зависимость изменения температуры воды от времени инсоляции для покрытий из УНТ и карбонизованных АК и РШ. Экспериментально установлено, что удельная эффективность покрытия на основе порошка карбонизованных АК выше, чем других материалов, приведенных в табл. 5, что также подтверждается изменением температуры воды в зависимости от времени нагрева (рис. 7).

Были проведены исследования по оценке эффективности теплопоглощения материала на основе порошка карбонизованных абрикосовых косточек (фракция — 160 + 80 мкм) с добавлением оксида металла в следующем составе: 1.5 мл жидкого стекла, 1 г порошка АК, 0.1 г оксида металла. В качестве оксидов металлов применяли оксиды алюминия и меди. Вначале указанную смесь перемешивали, а затем наносили на стеклянную трубку модели солнечного коллектора. Результаты исследования поглощающей способности материала, полученного на основе смешения компонентов, приведены в табл. 6. Анализ результатов показал (табл. 6), что внесение оксидов металлов в исходный порошок не приводит к повышению эффективности поглощения солнечной энергии по сравнению с материалом из чистого порошка.

Таблица 4. Сравнительная оценка эффективности поглощения солнечной радиации материалом на основе УНТ и композитного материала на основе АК и РШ

Вид покрытия	УНТ (10 слоев, $H = 7$ см)	ПММА + сажа + АК	ПММА + сажа + РШ
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	139.23/146.22	147.79/157.06	131.00/141.88
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	154.38/161.91	154.38/161.91	154.38/161.91
Эффективность η , %	90.19/90.31	95.73/97.0	84.86/87.63
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$	58.42/55.78	62.01/59.91	54.97/54.12

Таблица 5. Сравнительная оценка эффективности поглощения солнечной радиации покрытий на основе УНТ и покрытий на основе чистого порошка карбонизованных АК и РШ

Вид покрытия	УНТ (14 слоев, $H = 5$ см)	АК	РШ
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	148.26	149.87	122.56
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	161.38	161.38	161.38
Эффективность η , %	91.87	92.87	75.94
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$	56.93	57.55	47.06

Таблица 6. Сравнительная оценка эффективности поглощения солнечной радиации материалом на основе чистого порошка карбонизованных АК с добавлением наночастиц оксидов металлов

Вид покрытия	АК + Al ₂ O ₃	АК	АК + CuO
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	139.29	155.99	138.25
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	156.86	156.86	156.86
Эффективность η , %	88.8	99.99	88.14
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}}$ · 10 ⁻²	56.61	63.74	56.19

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать предварительный вывод, что покрытие на основе карбонизованных абрикосовых косточек может являться материалом для использования в качестве слоя, поглощающего солнечную энергию в солнечных коллекторах. Для проверки данного предположения были проведены исследования по сравнительной оценке поглощающей способности модели солнечного коллектора с покрытием из порошка карбонизованных абрикосовых косточек с моделью солнечного коллектора с промышленным покрытием (производство Китая). Параметры поглощающей поверхности моделей коллекторов: длина — 32.5 см, диаметр — 4.73 см. Внутрь коллекторов наливалась дистиллированная вода в объеме 450 мл. Трубки с водой помещались в трубки большего диаметра и герметизировались. Это исключало конвективные потери в процессе эксперимента. Эксперимент проводили в течение 30 минут при регистрации температуры и интенсивности солнечной инсоляции через каждые 2 минуты. Результаты по сравнительному исследованию эффективности поглощения солнечной энергии покрытием из карбонизованных абрикосовых косточек с покрытием промышленного производства приведены в табл. 7 и на рис. 8.

Анализ результатов, приведенных в табл. 7, показал, что, несмотря на то, что в модели солнечного коллектора с покрытием из порошка карбонизованных абрикосовых косточек отсутствует весь набор покрытий, который характерен при промышленном производстве солнечных коллекторов (антиотбивающий, теплопринимающий и инфра-поглощающий слои), его теплопоглощающая способность выше. Это подтверждает предварительный вывод о возможности использования покрытия из порошка карбонизованных абрикосовых косточек для солнечных коллекторов при соответствующей доработке.

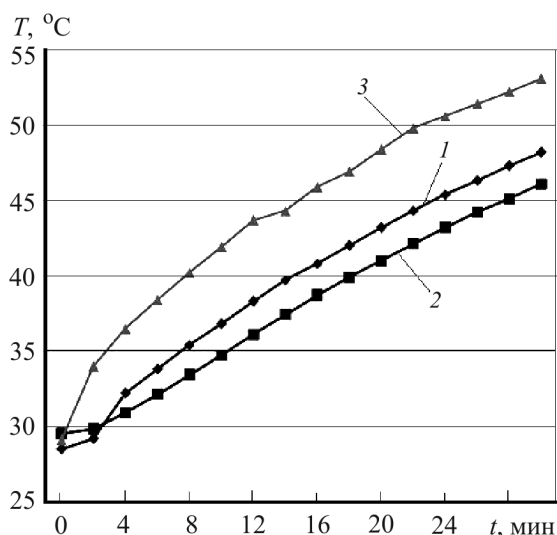


Рис. 7. График изменения температуры воды для различных покрытий в зависимости от времени при максимальном теплопоглощении $q_{\text{макс}} = 161.38$ Дж/см²: 1 — для покрытия из УНТ (14 слоев); 2 — для покрытия из карбонизованной РШ; 3 — для покрытия из карбонизованных АК

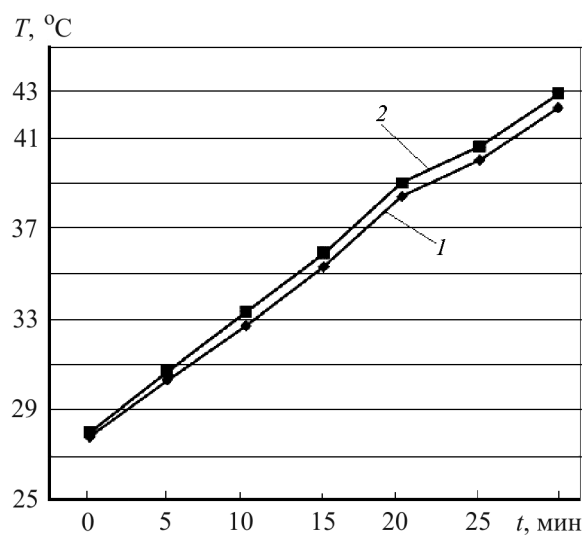


Рис. 8. График изменения температуры воды для различных покрытий в зависимости от времени при максимальном теплопоглощении $q_{\text{макс}} = 150.74$ Дж/см²: 1 — для покрытия промышленного образца; 2 — для покрытия из порошка карбонизованных АК

Таблица 7. Сравнительная оценка эффективности поглощения солнечной радиации покрытием на основе чистого порошка карбонизованных АК и покрытием промышленного производства

Вид покрытия	Покрытие промышленного производства (Китай)	Покрытие из порошка АК
Теплопоглощение покрытия q , Дж/см ²	122.49/103.06	125.06/108.26
Теплопоглощение максимальное $q_{\text{макс}}$, Дж/см ²	150.74/134.24	150.74/134.24
Эффективность η , %	81.26/76.78	82.96/80.06
Удельная эффективность $\eta_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$	53.91/57.19	55.04/59.91

Таблица 8. Элементный состав образцов абрикосовых косточек

Состав	C, мас. %	H, мас. %	N, мас. %	O ₂ , мас. %	Коксовый остаток, мас. %	Пористость, см ³ /г	Удельная поверхность, м ² /г
АК исходные	67.98	6.4	0.9	2.87	21.85	0.21	240
АК после карбонизации при $T = 800$ °С	92.85	3.03	1.6	1.05	1.47	2.1	830

Такой характер поведения порошка карбонизованных АК можно предварительно объяснить его составом, приведенным в табл. 8, и видом пористой структуры после карбонизации, представленной на рис. 9 [10, 11]. Исходные частицы абрикосовых косточек имеют неразвитую удельную поверхность, очень плотную структуру с малой пористостью и размерами пор от 780 до 3000 нм (табл. 8). После карбонизации при температуре 800 °С удельная поверхность абрикосовых косточек увеличивается в 3.5 раза, пористость повышается в 10 раз, появляются в большом количестве поры с размерами от 200 до 1300 нм (табл. 8, рис. 9). Полученный порошок карбонизованных АК при содержании в нем до 93% углерода является хорошим поглощающим материалом для солнечной энергии, а развитая пористая структура обеспечивает хорошие теплоизолирующие свойства.

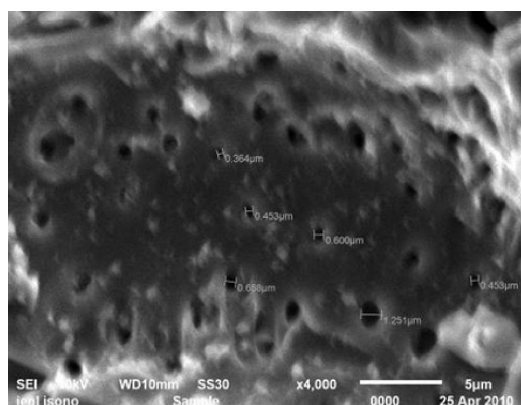


Рис. 9. Электронный микроснимок поверхности частицы абрикосовой косточки после карбонизации

Заключение. На основе анализа результатов по оценке теплопоглощающей способности солнечной энергии различными углеродными материалами установлено, что наибольшей поглощающей способностью солнечной радиации по сравнению со всеми исследованными материалами и композитами на их основе обладают покрытия из порошка карбонизованных абрикосовых косточек. Сравнительное испытание на поглощающую способность солнечной энергии покрытия из порошка карбонизованных абрикосовых косточек с покрытием промышленного производства (Китай) в одних и тех же условиях показало преимущество покрытия из порошка карбонизованных абрикосовых косточек.

Обозначения

$c_{\text{в}}, c_{\text{с}}$ — теплоемкости воды и стекла, кДж/(кг · К); $d_{\text{с}}$ — диаметр внутренней стеклянной трубки с покрытием, см; $H_{\text{с}}$ — высота покрытия стеклянной трубки исследуемым материалом, см; $M_{\text{в}}, M_{\text{с}}$ — массы нагреваемой воды и стеклянной трубки, кг; $Q_{\text{в}}, Q_{\text{с}}$ — поглощенное водой и стеклом количество тепловой энергии, кДж; q — удельная величина теплопоглощения, кДж/см²; S — площадь тепловоспринимающей поверхности модели солнечного коллектора, см²; $T_{\text{н}}, T_{\text{к}}$ — начальная и конечная температуры воды, К; η — коэффициент эффективности теплопоглощения покрытием; $\eta_{\text{уд}}$ — удельный коэффициент эффективности теплопоглощения. Индексы: в — вода; с — стекло; н — начальная; к — конечная; макс — максимальный; уд — удельный.

Литература

1. **Katzen D., Levy E., Mastai Y.** Thin films of silica–carbon nanocomposites for selective solar absorbers. *Appl. Surf. Sci.* 2005. Vol. 248, No. 1. Pp. 514–517.
2. **Kumar S. K., Murugesan S., Suresh S., Raj S. P.** Nanostructured CuO thin films prepared through sputtering for solar selective absorbers. *J. Solar Energy*. 2013. Vol. 2013. ID 147270.
3. **Amri A., Jiang Z. T., Pryor T., Yin C.-Y., Djordjevic S.** Developments in the synthesis of flat plate solar selective absorber materials via sol–gel methods: A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2014. Vol. 36. Pp. 316–328.
4. **Бланк А. Я., Касумов Ф. К., Шаршанов А. Я., Шиляев А. А.** Полное поглощение инфракрасного излучения в тонких слоях металлической черни. *Физика низких температур*. 1992. Т. 18, № 9. С. 1048–1050.
5. **Mizuno K., Ishii J., Kishida H., Hayamizu Y., Yasuda S., Futaba D. N., Yumura M., Hata K.** A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2009. Vol. 106. Pp. 6044–6047.
6. **Srinivasan C.** The blackest black material from carbon nanotubes. *Curr. Sci.* 2008. Vol. 94. Pp. 974–975.
7. **Zhang M., Fang S., Zakhidov A., Lee S., Aliev A., Williams C., Atkinson K., Baughman R.** Strong, transparent, multifunctional, carbon nanotube sheets. *Science*. 2005. Vol. 309. Pp. 1215–1219.
8. **Kuznetsov A. A., Fonseca A. F., Baughman R. H., Zakhidov A. A.** Structural model for dry-drawing of sheets and yarns from carbon nanotube forests. *ACS Nano*. 2011. Vol. 5, No. 2. Pp. 985–993.
9. **Aliev A. E., Guthy C., Zhang M., Fang Sh., Zakhidov A. A., Fischer J. E., Baughman R. H.** Thermal transport in MWCNT sheets and yarns. *Carbon*. 2007. Vol. 45. Pp. 2880–2888.
10. **Kerimkulova A. R., Mansurova B. B., Gilmanov M. K., Mansurov Z. A.** Nanoporous carbon sorbent for molecular sieve chromatography of lipoprotein complex. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2011. Vol. 85, No. 6. Pp. 1004–1007.
11. **Azat S.** Synthesis of carbonized nano mesoporous sorbents based on vegetable raw materials. *Nanosci. Nanoeng.* 2013. Vol. 1, No. 1. Pp. 41–44.