

ВЕСТНИК

ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Выпуск 1(6)

Москва 2012



Теоретический и научно-практический журнал. Основан в 2005 году
Учредитель и издатель: Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии

Редакционная коллегия:

Д.С. Стребков (председатель, главный научный редактор)
А.В. Тихомиров (зам. председателя, зам. главного научного редактора)
А.Н. Васильев (зам. председателя, зам. главного научного редактора)
Н.Ф. Молоснов (зам. председателя, зам. главного научного редактора)
Л.П. Кормановский,
Ю.М. Антонов,
В.М. Евдокимов,
Е.М. Клычев,
А.Б. Коршунов,
Б.П. Коршунов,
В.Р. Краусп,
А.К. Лямцов,
А.И. Некрасов,
Л.Д. Сагинов,
Р.С. Суюнчалиев,
Е.В. Халин,
Ю.А. Цой,
Ю.М. Щекочихин,
Т.А. Гудкова (ответственный секретарь, редактор)

Адрес редакции:
109456, г. Москва,
1-й Вешняковский проезд, 2.
Телефон: (499) 171-22-91
Факс: (499) 170-51-01
E-mail: vestnikviesh@gmail.com

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-46497 от 08.09.2011 г.
Выходит 4 раза в год.
Научный редактор выпуска
Н.Ф. Молоснов

Подписано в печать 21.03.2012 г.
Формат 60×84/8.
Объем 10,0 печ.л.
Тираж 100 экз.
Печать офсетная.
Заказ № 42.

Отпечатано в ФГУП «Типография»
Россельхозакадемии.
115598, г. Москва, ул. Ягодная, д. 12

ISSN 0131-5277

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА Содержание номера

<i>Стребков Д.С.</i> К 95-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Н.С. Лидоренко.....	2
<i>Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М.</i> Фоточувствительность интегральной полупроводниковой структуры с «вертикальными» р-п переходами.....	5
<i>Майоров В.А.</i> Исследование линейчатых модулей солнечных батарей с линзами Френкеля.....	13
<i>Стребков Д.С., Персиц И.С., Данилов В.Г., Полисан А.А.</i> Исследование свойств радиационно-модифицированной клеящей пленки для фотоэлектрических модулей.....	17
<i>Стребков Д.С., Некрасов А.И., Трубников В.З., Руденко В.Л.</i> Перспективы использования атмосферного электричества.....	21
<i>Стребков Д.С., Юферев Л.Ю., Роцин О.А., Михалев А.А.</i> Резонансные системы светодиодного освещения.....	26
<i>Трушевский С.Н.</i> Анализ низкотемпературных источников теплоты Средней полосы России для тепловых насосов.....	31
<i>Чижиков А.Г., Голубкович А.В.</i> Расчет теплообмена при быстром пиролизе растительных материалов.....	39
<i>Стребков Д.С., Егоров Ю.М., Росс М.Ю., Щекочихин Ю.М.</i> Основные направления биотехнологического развития возобновляемой энергетики для производства альтернативных видов топлива из растительного сырья.....	43
<i>Стребков Д.С., Фильков М.Н., Росс М.Ю., Щекочихин Ю.М.</i> Перспективы применения низкотемпературной плазмы дугового разряда для переработки отходов сельского хозяйства.....	51
<i>Стребков Д.С., Егоров Ю.М., Росс М.Ю., Щекочихин Ю.М., Чирков В.Г.</i> Создание устройств сложения мощностей генераторов на магнетронах для применения в технологиях АПК.....	54
<i>Никитин Б.А., Гусаров В.А.</i> Алгоритмы решения многостепенных задач в области фотоэлектричества и ветроэнергетики.....	62
<i>Борисов Ю.С., Некрасов А.И., Некрасов А.А., Ефимов А.В.</i> Обоснование критериев контроля сопротивления изоляции электродвигателей.....	67
<i>Мамхегов А.М.</i> Экспериментальное определение температуры токоведущих элементов коммутационного аппарата.....	75
<i>Камайданов Е.Н.</i> Использование биоэнергетического потенциала бесподстилочного навоза и отходов растениеводства для устойчивого функционирования малых и средних животноводческих ферм.....	78

К 95-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РАН Н.С. ЛИДОРЕНКО

Академик Россельхозакадемии Д.С. Стребков
(ГНУ ВИЭСХ)

Рассмотрены результаты исследований и разработок в области прямого преобразования энергии, выполненные главным конструктором и Генеральным директором НПО «Квант» членом-корреспондентом РАН Николаем Степановичем Лидоренко.

Ключевые слова: прямое преобразование энергии в электрическую, солнечная энергетика, матричные солнечные элементы, химические источники тока, термоэлектрические генераторы.

The results of research and development in the field of direct energy conversion, made by the chief designer and general director of NPO «Kwant» a corresponding member of Russian Academy of Sciences, Nikolai Stepanovich Lidorenko are considered

Keywords: direct energy conversion, solar energy, matrix solar cells, chemical current sources, thermoelectric generators

Я пришел на работу во ВНИИ источников тока (ВНИИТ) в сентябре 1960 г. по объявлению: «Требуются инженеры, знающие английский язык». В школе и в институте я учил немецкий, познание английского в моих планах было первоочередной задачей и насущной необходимостью, поэтому я не сомневался в выборе места работы. Через год в Бюллетене научно-технической информации ВНИИТ была опубликована моя первая научная работа – аналитический обзор зарубежной, в основном американской, печати «Системы преобразования энергии для космических полётов».

На работу меня принимала заместитель директора ВНИИТ, доброжелательная и высокообразованная Лидия Фёдоровна Пенькова, кандидат технических наук. С директором ВНИИТ Николаем Степановичем Лидоренко мы встречались на научных совещаниях, торжественных заседаниях, собраниях партхозактива. С интересом слушали его замечательные, часто импровизированные доклады по развитию науки и техники в области прямого преобразования энергии.

Во всех научных подразделениях ВНИИТ и НПО «Квант», в первую очередь в отделении, где создавались первые солнечные батареи, работало много молодежи и была настоящая атмосфера научного

творчества. Особо хотелось отметить стремление молодых учёных повышать свою квалификацию и поддержку этого стремления со стороны дирекции. Три больших курса по физике полупроводников, термоэлектрическим и фотоэлектрическим явлениям было прочитано для нас ведущими профессорами ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ФИАН им. Лебедева.

Один из трехэтажных корпусов ВНИИТ был выделен для организации вечернего отделения электрофизического факультета Всесоюзного заочного политехнического института (ВЗПИ) (сейчас Открытый университет), на котором обучалось более 100 сотрудников ВНИИТ. Выпускающей кафедрой была кафедра «Основы радиотехники и телевидения» (ОРТ), которая готовила инженеров электронной техники по специальности «Электронные приборы». Все студенты и большинство преподавателей на 3 – 5 курсах были сотрудниками ВНИИТ. Курсовые и дипломные проекты разрабатывались на актуальные темы научных исследований в лабораториях ВНИИТ. Таким образом, была решена проблема подготовки специалистов по новым методам прямого преобразования солнечной, тепловой и других видов энергии в электрическую, которых не готовили ни в одном вузе страны. Я работал на кафедре ОРТ с 1967 по 1987 г., читал лек-

лекции и проводил практические занятия по спецкурсам «Фотоэлектрические преобразователи», «Термоэлектрические преобразователи», «Солнечные электростанции», руководил дипломными проектами 60 выпускников ВЗПИ.

В 1967 г. после окончания вечернего инженерного отделения мехмата МГУ им. М.В. Ломоносова – это было в моих планах второй важнейшей задачей – я предложил технологии и конструкции матричных высоковольтных фотопреобразователей, современное название «Матричные солнечные элементы» (МСЭ), на которые ВНИИТ во главе с Н.С. Лидоренко получил 14 патентов в США, Великобритании, Японии, Германии, Франции и других странах. Отличительной чертой Н.С. Лидоренко было умение быстро оценивать перспективы развития новых направлений и технологий.

После защиты моей кандидатской диссертации в 1971 г. под руководством доктора техн. наук, профессора А.П. Ландсмана по его представлению Николай Степанович подписал приказ о моем назначении начальником сектора и затем лаборатории, отдела, заместителем Главного конструктора. По существу с 1972 по 1987 г., до моего ухода из НПО «Квант» Н.С. Лидоренко был научным руководителем исследований МСЭ в области наземной фотоэлектрической энергетики.

Среди других замечательных российских ученых НПО «Квант», руководителей работ я хотел бы отметить доктора техн. наук, профессора, Лауреата Ленинской премии Станислава Васильевича Рябикова, заместителя Генерального директора НПО «Квант» и доктора физ.-мат. наук, профессора Владимира Михайловича Евдокимова – начальника теоретического подразделения НПО «Квант» (рис. 1).

Из научных событий моей работы под руководством Н.С. Лидоренко я хотел вспомнить следующий эпизод. В 1974 г. Николай Степанович обсуждал со мной проект своей статьи по фотоэлектрическому преобразованию солнечной энергии. Я сказал Николаю Степановичу, что в статье есть много спорных тезисов и что её надо пере-

делать. Он попросил меня внести изменения. Я включил в статью обнаруженное нами явление нестабильности фотоэффекта и исчезающих барьеров в кремнии, свойство МСЭ преобразовывать гигантские потоки излучения при сохранении КПД и линейной зависимости тока от освещенности, возможность управления с помощью внешних электрических полей спектральной характеристикой и создания высоковольтных фотоэлектрических генераторов с плотностью микроэлементов 250 см^{-2} и напряжением до 1 млн. В на 1 м^2 площади генератора. Статья Н.С. Лидоренко, Д.С. Стребкова «Аномальный фотоэлектрический эффект» была опубликована в Докладах АН СССР (1974. Том 219. № 2. С. 325 – 328).



Рис. 1. Руководители работ в области создания матричных солнечных элементов в 1972–1987 годах:

Слева направо: **Стребков Д.С.** – заместитель Главного конструктора, начальник экспериментально-технологического подразделения НПО «Квант», академик РАСХН, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации; **Лидоренко Н.С.** – Генеральный директор, Главный конструктор НПО «Квант», Лауреат Ленинской и Государственной премии, Герой Социалистического Труда, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор; **Рябиков С.В.** – заместитель Генерального директора НПО «Квант», академик РАЕН, доктор технических наук, профессор, Лауреат Ленинской премии; **Евдокимов В.М.** – начальник теоретического подразделения НПО «Квант», академик РАЕН, доктор физико-математических наук, профессор (Фотография сделана д.т.н., профессором Чувпило А.В. в кабинете Н.С. Лидоренко 26 ноября 2008 г.).

За годы своего руководства ВНИИТ и НПО «Квант» до 1986 г. Н.С. Лидоренко создал отрасль безмашинной энергетики на основе методов прямого преобразования различных видов энергии в электрическую. Были созданы новые направления безмашинной энергетики: химические, тепловые, термоэлектрические, фотоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи, топливные элементы и др. Было организовано промышленное производство безмашинных генераторов энергии, которые до этого не выпускались в СССР. Уровень разработок был очень высокий. Например, в области МСЭ СССР и сейчас Россия производит МСЭ с КПД и по технологии, которые значительно превышают параметры аналогичных изделий США и других стран.

Николай Степанович воспитал целую плеяду первоклассных учёных, которые помнят и ценят своего учителя и черты его натуры: благожелательность, простоту и открытость для общения, колоссальную работоспособность, смелость и новаторство в научных разработках, нацеленность на промышленное внедрение и использование новых технологий для народного хозяйства и нужд обороны страны.

После ухода Николая Степановича с поста Генерального директора НПО «Квант» в 1986 г. и моего перехода директором в ВИЭСХ в 1987 г. мы продолжали встречаться по несколько раз в год в НПО «Квант» и в ВИЭСХе. Н.С. Лидоренко и С.В. Рябиков работали в диссертационном докторском Совете ВИЭСХ по специальности 05.14.08 «Энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии». Об-

суждались планы новых работ, новые научные идеи, перспективы развития новых видов техники. Последняя встреча состоялась 26 ноября 2008 г. в кабинете Н.С. Лидоренко в НПП «Квант» (рис. 1).

Большой трагедией для Н.С. Лидоренко и для нас, его учеников, стало разрушение СССР и, как следствие, – созданной под его руководством отрасли безмашинной энергетики. Одной из причин этой трагедии явился уход многих крупных учёных из НПО «Квант». Новые руководители НПО «Квант» были хорошими организаторами, но не обладали уровнем мышления научного лидера, которому свойственна генерация крупных научных направлений и проектов, благожелательное отношение к полуфантастическим идеям, поддержка и привлечение талантливых учёных, отсутствие неприязни и мстительности к научным оппонентам.

Чем больше времени проходит после ухода из жизни Н.С. Лидоренко, тем ярче и грандиознее представляются освоенные им вершины в науке и технике, тем больше начинаешь осознавать роль личности в создании и развитии новых знаний и в становлении промышленности, основанной на инновационных технологиях.

Николай Степанович верил в будущее России, в возрождение её науки и промышленности, в восстановление НПП «Квант» как лидера отрасли безмашинной энергетики. Эта вера помогла и нам выжить в трудные перестроечные годы. Возрожденный и сильный НПП «Квант» будет лучшим памятником Главному конструктору и замечательному учёному Николаю Степановичу Лидоренко.

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ С «ВЕРТИКАЛЬНЫМИ» P-N ПЕРЕХОДАМИ

Канд. физ.-мат. наук Ю.Д. Арбузов, доктор физ.-мат. наук В.М. Евдокимов
(ГНУ ВИЭСХ, НТЦ ВИЭН)

Предложена полупроводниковая структура и конструкция нового класса фотоприемников и фотопреобразователей, создаваемых на едином кристалле методами мезотехнологии по типу интегральных электронных схем. Исследованы зависимости фотоэлектрических характеристик от геометрических и диффузионных параметров структуры и конфигурации p-n перехода. Определены перспективы управления спектральной чувствительностью приемников излучений и повышения КПД преобразователей энергии.

Ключевые слова: полупроводник, мезоструктура, мезотехнология, вертикальный p-n переход, фотоприемник, спектральная чувствительность, КПД, фотопреобразователь, интегральная схема.

Общая постановка задачи и методы решения

Фундаментальной проблемой, сдерживающей широкое применение фотоэлектрических преобразователей энергии, является ограничение КПД преобразования, обусловленное различными видами электрических потерь в обычных массивных фотопреобразователях (ФП). Перспективы развития этого направления приводят к необходимости использования ФП матричного типа с минимальными размерами элементов, включая микронные и субмикронные, и неоднородной полупроводниковой структурой. Для решения этой проблемы предлагается разработка нового класса фотоприемников и ФП, создаваемых на едином кристалле методами мезотехнологии по типу интегральных электронных схем. Принципиально это позволяет, при повышении надежности и идентичности элементов системы в процессе ее изготовления, снизить потери на рекомбинацию в объеме, на поверхностях сопряжения элементов и в p-n переходах, устранить омические потери на растекание тока в тонких поверхностных слоях, присущие обычным планарным ФП.

В данной работе рассмотрен один из перспективных вариантов предлагаемых мезосистем фотоприемников и ФП со сложной конфигурацией p-n переходов, включающей встроенные так называемые «вертикальные» переходы, освещение которых проводится параллельно

The semiconductor structure and design of a new class of photoreceivers and the photoconverters created on a uniform crystal by methods mesotechnology as integrated electronic schemes is offered. Dependences of photoelectric characteristics from geometrical and diffusion parameters of structure and a configuration of p-n junction are investigated. Perspectives of control by spectral sensitivity of radiations receivers and increases of efficiency of energy converters are determined.

Keywords: semiconductor, mesostructure, mesotechnology, vertical p-n junction, photoreceiver, spectral sensitivity, efficiency, photoconverter, integral scheme.

плоскости перехода. Решается задача определения спектральной фоточувствительности системы и соответствующего коэффициента собирания фотогенерированных носителей заряда к p-n переходу.

Конструкция элемента мезосистемы представлена на рис. 1, где ℓ , d , w и h – размеры элемента, контакта на освещаемой поверхности и П-образного p-n перехода ($h \times w$).

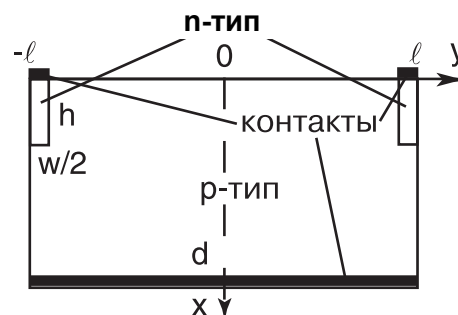


Рис. 1. Элемент интегральной структуры с точечными и вертикальными переходами

Уравнение для избыточной концентрации неосновных носителей заряда в базовой области p-типа (электронов) $\Delta n(x, y)$ при монохроматическом освещении имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial y^2} - \frac{\Delta n}{L^2} + \frac{\alpha \Phi}{D} \exp(-\alpha x) = 0, \quad (1)$$

где L и D – соответственно диффузионная длина и коэффициент диффузии носителей; Φ – плот-

ность потока квантов на поверхность $x = 0$; α – коэффициент их поглощения.

Граничные условия в области $0 \leq x \leq h$; $0 \leq y \leq \ell - w/2$, включающей p-n переход при $y = \ell - w/2$, в режиме короткого замыкания ФП имеют вид:

$$\begin{aligned} D \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \Big|_{x=0} &= S \cdot \Delta n \Big|_{x=0}; \\ D \frac{\partial \Delta n}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0; \quad \Delta n \Big|_{y=\ell-w/2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где S – скорость рекомбинации на освещаемой поверхности.

В области $d \geq x \geq h$; $0 \leq y \leq \ell$:

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial \Delta n}{\partial y} \Big|_{y=\ell} = 0. \quad (3)$$

Аналогично представляется граничное условие на поверхности $x = d$.

Данная система соответствует задаче математической физики для неоднородных структур с разрывом граничных условий на поверхности элемента $y = \ell$ при $x = h$. Решение представленной задачи относится к так называемым проблемам Гилберта [1].

В данной работе создана специальная компьютерная программа решения подобных задач, которая позволяет находить пространственные распределения концентрации и потоков носителей заряда и определять спектральную чувствительность рассматриваемых сложных фотоэлектрических структур.

Разработанный метод численного решения задач переноса носителей заряда в полупроводниковых структурах с разрывными граничными условиями позволяет проводить с высокой точностью расчет характеристик при различных конструктивных параметрах полупроводниковой структуры, электрофизических параметрах носителей заряда, параметрах их поверхностной и объемной рекомбинации. Тем самым устанавливаются предельные возможности интегральных фотоэлектрических структур в повышении эффективности фотопреобразования и регулировании спектральной чувствительности и создаются предпосылки оптимизации параметров практических устройств.

Важной задачей данной работы явилось также определение возможностей получения в ряде случаев аналитических решений, которые позволяют проводить исследования в широких диапазонах изменения параметров структуры.

Спектральная зависимость фоточувствительности интегральной структуры

На рис. 2 представлены рассчитанные для кремниевых ФП с “точечными” p-n переходами на освещаемой поверхности (точнее, с малой шириной переходов w при их глубине $h = 0$) спектральные зависимости коэффициента собирания носителей заряда Q , равного отношению фототока J_Φ к падающему потоку квантов,

$$Q = J_\Phi / q\Phi\ell. \quad (4)$$

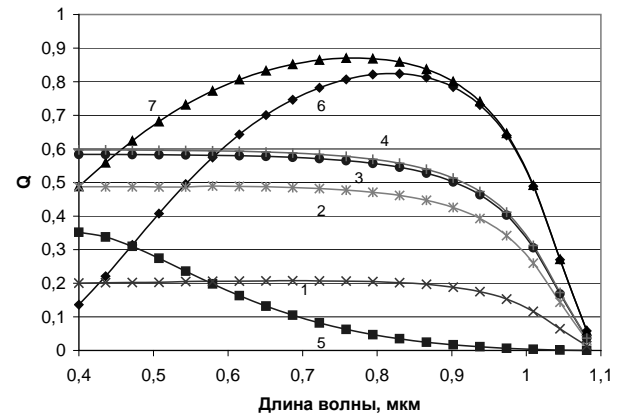


Рис. 2. Спектральная чувствительность структур с точечными переходами

Результаты представлены для ряда значений скорости поверхностной рекомбинации S , см/с: 1 – 10^4 , 2 – 10^3 , 3 – 10^2 , 4 – 0 при $w = 4$ мкм, $L = 158$ мкм и $d = 300$ мкм. Важнейшей особенностью данной мезоструктуры является то, что коэффициент собирания фактически имеет П-образную форму в широкой спектральной области, что контрастирует с обычным ФП, содержащим поверхностный легированный слой толщиной 1 мкм с поверхностной рекомбинацией в нем 10^6 см/с и базу (представленные, соответственно, кривыми 5 и 6, и суммарным коэффициентом собирания – кривой 7). Однако структуры с “точечными” p-n переходами сильно уступают обычным ФП по максимуму спектрального коэффициента собирания и по интегральной эффективности собирания даже при отсутствии рекомбинации на освещаемой поверхности.

Зависимость фоточувствительности интегральной структуры от глубины вертикального p-n перехода

Принципиально новое качество приобретают мезоструктуры с введением вертикальных p-n переходов. На рис. 3 представлены зависимости спектрального коэффициента собирания носителей заряда в кремниевой структуре с

П-образным p-n переходом ($h \times w$) от глубины вертикального p-n перехода h для длины волны, примерно соответствующей максимуму чувствительности обычного кремниевого ФП ($\alpha = 1/30 \text{ мкм}^{-1}$). Результаты получены при $w = 4 \text{ мкм}$, $\ell = 50 \text{ мкм}$, $d = 500 \text{ мкм}$ и отсутствии поверхностной рекомбинации ($S = 0$) для ряда значений L , мкм: 1 – 300, 2 – 225, 3 – 158 и при наличии рекомбинации (S , см/с = $10^3 - 4$, $10^4 - 5$, $10^6 - 6$) для $L = 158 \text{ мкм}$. Данные показывают резкий рост коэффициента сбора с увеличением глубины вертикального перехода от $h = 0$ до $h \sim 30-40 \text{ мкм}$ с последующим насыщением до значений, близких к единице. Качественно такой же вид имеют зависимости при тех же параметрах для структуры, содержащей только вертикальный p-n переход ($w = 0$). Как видно, уже при достижении $h \approx 50 \text{ мкм}$ коэффициент сбора носителей в данной мезоструктуре при $S = 0$ сравнивается с максимумом в обычном кремниевом ФП.

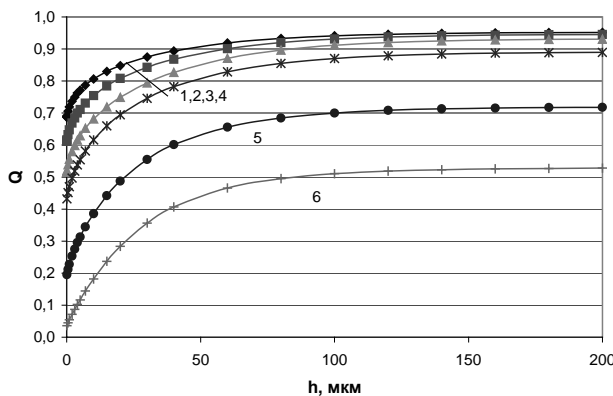


Рис. 3. Фоточувствительность структур с точечными и вертикальными переходами

Спектральные коэффициенты сбора носителей в данных мезоструктурах при $h = 50 \text{ мкм}$ представлены на рис. 4 (для $L = 158 \text{ мкм}$). При $S = 0$ (кривая 1) они практически постоянны в области собственного поглощения полупроводника, а с ростом скорости рекомбинации (S , см/с = $10^3 - 2$, $10^4 - 3$, $10^6 - 4$) резко падают в коротковолновой области.

Приведенные результаты демонстрируют целесообразность, количественные показатели и предельные возможности использования сложных конфигураций p-n переходов в мезоструктурах, включающих вертикальные переходы, для направленного изменения показателей чувствительности и, соответственно, эффективности фотоприемников и ФП.

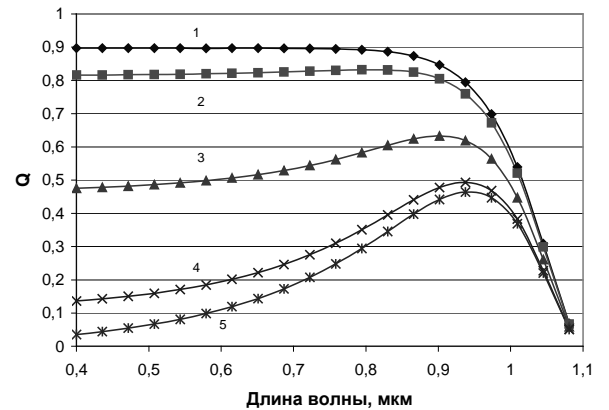


Рис. 4. Спектральная чувствительность структур с точечными и вертикальными переходами

Аналитические методы исследования

Аналитические решения уравнений (1) – (3) представлены для структур, содержащих только вертикальные p-n переходы ($w = 0$), и основываются на разложении концентрации $\Delta n(x, y)$ по собственным функциям от координаты y .

Решение в области $0 \leq x \leq h$

Концентрация избыточных носителей представляется разложением по собственным функциям в интервале $-l \leq y \leq l$, удовлетворяющим граничным условиям (2):

$$\Delta n(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} X_n(x) \cdot \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2l} y\right]; n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Общее решение для функции $X_n(x)$ имеет вид:

$$X_n(x) = A_n \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + B_n \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) + C_n \exp(-\alpha x), \quad (6)$$

где

$$\frac{1}{L_n^2} = \left[\frac{(2n+1)\pi}{2l}\right]^2 + \frac{1}{L^2}; \quad C_n \left(\alpha^2 - \frac{1}{L_n^2}\right) = \frac{\alpha}{D} (-1)^{n+1} \frac{4}{(2n+1)\pi} \Phi; \quad (7)$$

$$A_n = -\frac{\frac{SL_n}{D} - 1}{\frac{SL_n}{D} + 1} B_n - C_n \frac{\alpha L_n + \frac{SL_n}{D}}{\frac{SL_n}{D} + 1}. \quad (8)$$

Решение в области $x \geq h$

Концентрация $\Delta n(x, y)$ представляется разложением по собственным функциям в интервале $-l \leq y \leq l$, удовлетворяющим граничным условиям (3):

$$\Delta n(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{X}_m(x) \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{l} y\right); m = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Решение для функции $\tilde{X}_m(x)$ при $d \rightarrow \infty$ имеет вид:

$$\tilde{X}_m(x) = \tilde{A}_m \exp\left(-\frac{x}{L_m}\right) + \tilde{C}_m \exp(-\alpha x); \quad (10)$$

$$\frac{1}{\tilde{L}_m^2} = \left(\frac{m\pi}{\ell}\right)^2 + \frac{1}{L^2}; \quad \tilde{C}_0 = -\frac{\alpha\Phi}{D\left(\alpha^2 - \frac{1}{L^2}\right)}; \quad (11)$$

$$\tilde{C}_m = 0; \quad m = 1, 2, \dots$$

Условие непрерывности решения на границе $x = h$ и уравнения для X_n, \tilde{X}_m .

На границе между рассмотренными областями по x должны выполняться условия:

$$\Delta n|_{x=h-} = \Delta n|_{x=h+}; \quad \frac{\partial \Delta n}{\partial x}|_{x=h-} = \frac{\partial \Delta n}{\partial x}|_{x=h+}; \quad (12)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} X_n(h) \cdot \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2\ell} y\right] = \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{X}_m(h) \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{\ell} y\right). \quad (13)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} X'_n(h) \cdot \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2\ell} y\right] = \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{X}'_m(h) \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{\ell} y\right). \quad (14)$$

Умножая эти равенства на $\cos[(2n+1)\pi y/2\ell]$ и интегрируя по y в области $(0, \ell)$, получаем систему уравнений:

$$X_n(h) = \frac{2}{\ell} \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{X}_m(h) \cdot I_{nm}, \quad (15)$$

$$X'_n(h) = \frac{2}{\ell} \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{X}'_m(h) \cdot I_{nm}, \quad (16)$$

где

$$I_{nm} = \int_0^{\ell} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2\ell} y\right] \cos\left(\frac{m\pi}{\ell} y\right) dy = (-1)^{n+m} \frac{2\ell}{\pi} \cdot \frac{2n+1}{(2n+1)^2 - 4m^2}. \quad (17)$$

Величины I_{nm} обладают свойствами ортонормированности:

$$\sum_{n=0}^{\infty} I_{nm} \cdot I_{n'm'} \cdot a_m = \left(\frac{\ell}{2}\right)^2 \delta_{mm'}; \quad (18)$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} I_{nm} \cdot I_{n'm} \cdot a_m = \left(\frac{\ell}{2}\right)^2 \delta_{nn'}$$

$$a_m = \begin{cases} 1/2; & m = 0; \\ 1; & m = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (19)$$

Общий вид решения для $\Delta n(x, y)$ во всей базовой p -области ФП, для фототока через p -переход и спектрального коэффициента собирания носителей.

Таким образом, полученное общее решение представляется уравнениями (15), (16). С учетом соотношения (8) это дает систему линейных уравнений для параметров A_n, B_n, \tilde{A}_n :

$$\frac{\ell}{2} \tilde{C}_n (1 - \alpha \tilde{L}_n) \exp(-\alpha h) = \sum_{m=0}^{\infty} \left(A_m \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right) \left(1 - \frac{\tilde{L}_n}{L_m}\right) + B_m \exp\left(\frac{h}{L_m}\right) \left(1 + \frac{\tilde{L}_n}{L_m}\right) + C_m \exp(-\alpha h) (1 - \alpha \tilde{L}_n) \right) I_{mn} a_n. \quad (20)$$

$$\tilde{A}_n \exp\left(-\frac{h}{\tilde{L}_n}\right) + \tilde{C}_n \exp(-\alpha h) = \sum_{m=0}^{\infty} \left(A_m \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right) + B_m \exp\left(\frac{h}{L_m}\right) + C_m \exp(-\alpha h) \right) I_{mn} \cdot a_n. \quad (21)$$

Плотность фототока в точке x на p -переходе определяется выражением:

$$j_{\Phi}(x) = qD \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\pi}{2\ell} (-1)^{m+1} (2m+1) \times \left\{ A_m \exp\left(-\frac{x}{L_m}\right) + B_m \exp\left(\frac{x}{L_m}\right) + C_m \exp(-\alpha x) \right\}, \quad (22)$$

так что значение полного фототока J_{Φ} , А/см, приходящегося на единицу толщины ФП в направлении, перпендикулярном световому потоку равно:

$$J_{\Phi} = qD \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\pi}{2\ell} (-1)^{n+1} (2n+1) \cdot L_m \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right)\right) \times \left\{ \left(1 - \frac{SL_m - 1}{D} \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right)\right) B_m \exp\left(\frac{h}{L_m}\right) - C_m \left(\frac{\alpha L_m + \frac{SL_m}{D}}{\frac{SL_m}{D} + 1} - \frac{1 - \exp(-\alpha h)}{\alpha L_m \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right)\right)}\right) \right\}. \quad (23)$$

Система уравнений (8), (20) для параметров A_n, B_n является бесконечномерной. Тем не менее, она позволяет найти аналитическое решение в ряде предельных случаях.

Структура с большими расстояниями между контактами ℓ по сравнению с диффузионной длиной L

Подобная структура при $L/\ell \ll 1$ представляет практический интерес, в первую оче-

$$B_m \exp\left(\frac{h}{L_m}\right) \frac{L}{L_m} \left(1 + \frac{L_m}{L} + \frac{SL_m - 1}{\frac{D}{SL_m + 1}} \exp\left(-\frac{2h}{L_m}\right) \left(1 - \frac{L_m}{L}\right) \right) = \frac{\alpha \Phi}{D} \frac{4(-1)^m}{\pi(2m+1)} \times$$

$$\times \left(\frac{L^2 \exp(-\alpha h)}{\alpha L + 1} - \frac{L_m^2}{\alpha^2 L_m^2 - 1} \left(\frac{\alpha L_m + \frac{SL_m}{D}}{\frac{SL_m}{D} + 1} \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right) \left(1 - \frac{L}{L_m}\right) - \exp(-\alpha h)(1 - \alpha L) \right) \right) \quad (24)$$

Поскольку при $L \ll \ell$ основной вклад в сумму (23) дают большие значения m , эту сумму можно заменить интегралом. Окончательное решение осуществляется подстановкой в это выражение значений B_m из (24) и C_m . При этом, как видно из (24), сходимость ряда (23) довольно хорошая и определяется поведением величины L_m^2 при $m \rightarrow \infty$: $L_m^2 \rightarrow (\ell/m\pi)^2$.

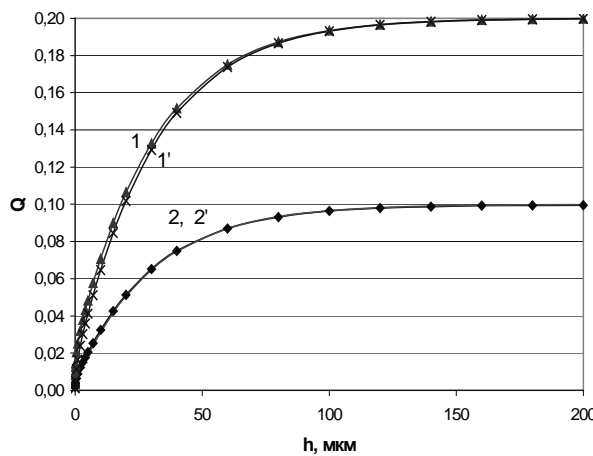


Рис. 5. Аналитический вид фоточувствительности структур с вертикальными переходами

На рис. 5 представлены рассчитанные с использованием теоретического выражения (24) зависимости спектрального ($\alpha = 1/30 \text{ мкм}^{-1}$) коэффициента сбора носителей от глубины вертикального р-п перехода h при $\ell = 50 \text{ мкм}$, $d = 500 \text{ мкм}$ и $S = 0$ для двух относительно малых значений диффузионной длины: $L = 10 \text{ мкм}$ (кривая 1) и $L = 5 \text{ мкм}$ (кривая 2), в сравнении с соответствующими результатами численного расчета (кривые 1' и 2'). Сравнение показывает

удовлетворительное согласие результатов, особенно в областях $h \rightarrow 0$ и $h \rightarrow \infty$.

Структура с малыми расстояниями между контактами ℓ

Практический интерес представляет также структура с очень густой контактной сеткой на освещаемой поверхности, в первую очередь, для ФП, с целью избежания больших сопротивлений растекания тока к контактам. При $\ell \rightarrow 0$ ($\alpha \ell \ll 1$, $\ell \ll L$, $\ell \ll h$) в линейном приближении по ℓ и пренебрежении величинами $\sim \exp(-h\pi/2\ell)$ по сравнению с единицей уравнение (20) превращается в следующее:

$$\frac{\ell}{2} \tilde{C}_n (1 - \alpha \tilde{L}_n) \exp(-\alpha h) =$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} B_m \exp\left(\frac{h}{L_m}\right) \left(1 + (2m+1) \frac{\tilde{L}_n \pi}{2\ell} \right) \cdot I_{mn} a_n. \quad (25)$$

Поскольку $I_{mn} \sim \ell$, то в первом приближении по ℓ величина $B_m \exp(h/L_m)$ является линейной по ℓ : $B_m \exp(h/L_m) = b_m \ell$. При $n=0$ это уравнение дает:

$$\sum_{m=0}^{\infty} b_m (-1)^m = \frac{\alpha L \Phi}{D(\alpha L + 1)} \exp(-\alpha h). \quad (26)$$

Таким образом, в линейном приближении по ℓ фототок получает выражение:

$$J_{\Phi} = -q\ell\Phi \left[1 - \frac{1}{\alpha L + 1} \exp(-\alpha h) \right] = -q\ell\Phi Q \quad (27)$$

и коэффициент сбора носителей Q оказывается не зависящим от ℓ .

С увеличением h величина Q монотонно растет до насыщающего значения, равного единице. Величина Q также монотонно растет с увеличением α до единицы при $\alpha \rightarrow \infty$. При получении этого выражения было пренебрежено членами, включающими скорость поверхностной рекомбинации S , поскольку формально они квадратичные по ℓ .

Зависимость фототока от h при $h \rightarrow 0$

При $h \rightarrow 0$ фототок обращается в нуль и в линейном приближении (при $S = 0$) равен

$$J_{\Phi} = -qD \frac{\pi}{2\ell} \int_0^{\infty} dm \cdot (2m+1) \cdot h \times \left\{ 2(-1)^m B_m - (-1)^m C_m (\alpha L_m - 1) \right\}, \quad (28)$$

причем из выражения (24) следует, что при $m \rightarrow \infty$ имеем: $B_m \sim 1/(2m+1)$, так что интеграл расходится при $m \rightarrow \infty$, и фототок оказывается бесконечным. В действительности, это означает, что при $h \rightarrow 0$ фототок не является аналитической функцией от h . В то же время члены в (28), содержащие C_m , имеют порядок $1/(2m+1)^3$ и в интеграл дают конечный вклад.

Таким образом, необходимо от линейного приближения по h обратиться к общему выражению (23) и поскольку при $h \rightarrow 0$ интеграл определяется, в основном, членом, содержащий B_m и асимптотической областью $m \rightarrow \infty$, т.е. $L_m \rightarrow 0$, то выражения для B_m и фототока (при $S = 0$) превращаются в следующие:

$$(-1)^m B_m \exp\left(\frac{h}{L_m}\right) = \frac{L_m \Phi}{D} \cdot \frac{4}{\pi(2m+1)} \cdot \frac{\alpha L}{\alpha L + 1}; \quad (29)$$

$$J_{\Phi} = -q \frac{2}{\ell} \cdot \frac{\alpha L \Phi}{\alpha L + 1} \int_0^{\infty} dm \cdot L_m^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right) \right). \quad (30)$$

Делая замену переменной под интегралом, выражаем его как:

$$I = \int_0^{\infty} dm \cdot L_m^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{L_m}\right) \right) = \int_{x_0}^{\infty} \frac{dx \cdot \ell^2}{\pi^2 (x^2 + a^2)} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\pi h}{\ell} \sqrt{x^2 + a^2}\right) \right), \quad (31)$$

$x = m + 1/2$; $a = \ell/\pi L$; $x_0 = 1/2$. Разбивая этот интеграл на два по областям $(0, \infty)$ и $(0, x_0)$, первый

интеграл при замене: $u^2 = x^2 + a^2$ получает выражение:

$$\int_a^{\infty} \frac{\ell^2 du}{\pi^2 u \sqrt{u^2 - a^2}} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\pi h}{\ell} u\right) \right) = \frac{\ell^2}{\pi^2} (F(0) - F(h)). \quad (32)$$

Функция $F(h)$,

$$F(h) = \int_a^{\infty} \frac{du}{u \sqrt{u^2 - a^2}} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi h}{\ell} u\right); \quad (33)$$

$$F(0) = \frac{\pi^2 L}{2\ell}; \quad F(\infty) = 0,$$

может быть найдена посредством дифференцирования этого выражения по h , что дает:

$$\frac{dF(h)}{dh} = -\frac{2\pi}{\ell} \int_a^{\infty} \frac{du}{\sqrt{u^2 - a^2}} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi h}{\ell} u\right) = -\frac{2\pi}{\ell} K_0\left(a \frac{2\pi h}{\ell}\right) = -\frac{2\pi}{\ell} K_0\left(\frac{2h}{L}\right), \quad (34)$$

где $K_0(z)$ – функция Бесселя от мнимого аргумента.

Интегрируя данное уравнение и используя выражения (33), получаем:

$$F(h) = \frac{\pi L}{\ell} \cdot \int_{2h/L}^{\infty} dz \cdot K_0(z). \quad (35)$$

Таким образом, коэффициент собирания при $h \rightarrow 0$ приобретает выражение:

$$Q = \frac{2}{\pi^2} \cdot \frac{\alpha L}{\alpha L + 1} \times \left[\frac{\pi L}{\ell} \cdot \int_0^{2h/L} dz \cdot K_0(z) - \int_0^{1/2} dx \cdot \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{2\pi h}{\ell} \sqrt{x^2 + a^2}\right) \right)}{x^2 + a^2} \right]. \quad (36)$$

Второй интеграл в этом выражении стремится к нулю пропорционально h . В то же время при малых аргументах $z \sim h/L$ первые два члена разложения $K_0(z)$ имеют вид:

$$K_0(z) = -\ln \frac{z}{2} - C, \quad (37)$$

где $C = 0,577216$ – постоянная Эйлера, так что с точностью до линейного по h члена

$$F(h) - F(0) = -\frac{2\pi h}{\ell} \cdot \left(\ln \frac{L}{h} - 1 + C \right) \quad (38)$$

и основная асимптотическая зависимость $Q(h)$ дается выражением:

$$Q(h) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\alpha L}{\alpha L + 1} \cdot \frac{L}{\ell} \times \left(\int_0^{2h/L} dz \cdot K_0(z) - \frac{2h}{L} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{1/4 + a^2} + 1/2}{a} \right) \right) = \frac{4\alpha L}{\alpha L + 1} \cdot \frac{h}{\pi \ell} \cdot \left(\ln \frac{L}{h} - \ln \left(\sqrt{\frac{\pi^2 L^2}{4\ell^2} + 1} + \frac{\pi L}{2\ell} \right) \right); \quad h \rightarrow 0 \quad (39)$$

т.е. является неаналитической функцией h , имеющей бесконечную производную $dQ(h)/dh$ при $h = 0$. Остальные опущенные члены в общем выражении для $Q(h)$ являются аналитическими по h и обращаются в нуль при $h = 0$.

Полученное асимптотическое выражение для $Q(h)$ соответствует отсутствию поверхностной рекомбинации ($S = 0$) и использованию условия $\ell \gg \pi L$. Оно показывает резкий рост коэффициента сбора при увеличении размера вертикального р-п перехода в рассматриваемой мезоструктуре. Это находится в точном или достаточно близком соответствии с результатами, полученными численным решением задачи и представленными на рис. 4 для различных соотношений параметров ℓ и L . Поэтому для качественной оценки формулу (39) можно использовать как общую. При $\ell \gg \pi L$ коэффициент сбора падает обратно пропорционально расстоянию между контактами ℓ и растет с увеличением диффузионной длины L . При условии $\ell \ll L$ коэффициент сбора падает с увеличением ℓ слабее, чем обратно пропорционально, и стремится к насыщению с увеличением L .

Фототок и коэффициент сбора носителей при $h \rightarrow \infty$

Естественно, что с ростом величины h , т.е. с ростом площади р-п перехода в матричной структуре, фототок монотонно увеличивается, достигая насыщающего значения в пределе $h \rightarrow \infty$. Общее решение для концентрации носи-

телей заряда в рассматриваемой модели (6), с учетом требования его ограниченности при $x = h \rightarrow \infty$, дает значение $B_n = 0$. Это же следует и из приближенного выражения (24). При этом плотность фототока равна:

$$j_\Phi(x) = -q \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2\alpha\Phi}{\ell \cdot \left(\alpha^2 - \frac{1}{L_n^2} \right)} \times \left(\frac{\alpha L_n + \frac{S L_n}{D}}{\frac{S L_n}{D} + 1} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) - \exp(-\alpha x) \right) \quad (40)$$

и, как видно, монотонно падает с ростом координаты x , причем наибольшее значение (при $x = 0$) растет с увеличением коэффициента поглощения α , от 0 при $\alpha \rightarrow 0$ до максимума при $\alpha \rightarrow \infty$ и падает с увеличением скорости поверхностной рекомбинации S (до 0 при $S \rightarrow \infty$).

Таким образом, насыщающее значение коэффициента сбора носителей к р-п переходу $Q(h)$ в пределе $h \rightarrow \infty$ получает выражение:

$$Q(\infty) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2L_n^2}{\ell^2 \cdot (\alpha L_n + 1)} \cdot \frac{\alpha L_n + 1 + \frac{S L_n}{D}}{\frac{S L_n}{D} + 1} \quad (41)$$

При $S = 0$ (и любом α) или при $\alpha = 0$ (и любом S) $Q(\infty)$ имеет максимальное значение:

$$Q_{\max} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 \left((2n+1)^2 + \frac{4\ell^2}{\pi^2 L^2} \right)} = \frac{L}{\ell} \operatorname{th} \frac{\ell}{L}, \quad (42)$$

которое падает с ростом ℓ и растет с увеличением L до $Q_{\max} = 1$ при $L \rightarrow \infty$.

С увеличением S коэффициент сбора $Q(\infty)$ падает, что находится в соответствии с данными численного решения на рис. 3 и 4. Одновременно при $S \neq 0$ $Q(\infty)$ монотонно падает с ростом α . При $S = \infty$ это падение дается зависимостью:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2L_n^2}{\ell^2(\alpha L_n + 1)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{\ell^2 \left(\alpha + \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2\ell} \right]^2 + \frac{1}{L^2}} \right) \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2\ell} \right]^2 + \frac{1}{L^2}}}. \quad (43)$$

В асимптотическом пределе $\alpha \rightarrow \infty$ основной вклад в данную сумму дают большие значения n , поэтому сумму можно заменить интегралом:

$$Q = \int_0^{\infty} \frac{8}{\pi^2 \left(\alpha \left(\frac{2\ell}{\pi} \right) + \sqrt{(2n+1)^2 + \left(\frac{2\ell}{\pi L} \right)^2} \right) \cdot \sqrt{(2n+1)^2 + \left(\frac{2\ell}{\pi L} \right)^2}} dn \quad (44)$$

Делая замену переменной: $(2n+1)^2 + (2\ell/\pi L)^2 = x^2$, при больших n и x , получаем:

$$Q = \int_{x_0}^{\infty} \frac{4}{\pi^2 \left(\alpha \left(\frac{2\ell}{\pi} \right) + x \right) \cdot x} dx; \quad x_0^2 = 1 + \left(\frac{2\ell}{\pi L} \right)^2; \quad \alpha \ell \gg x_0, \quad (45)$$

что дает следующую асимптотическую зависимость Q при $\alpha \rightarrow \infty$:

$$Q = \frac{4}{\pi^2 \left(\alpha \frac{2\ell}{\pi} \right)} \ln \frac{x}{\alpha \frac{2\ell}{\pi} + x} \Bigg|_{x_0}^{\infty} = \frac{2}{\pi \alpha \ell} \cdot \ln \frac{2\alpha \ell}{\pi \sqrt{1 + \left(\frac{2\ell}{\pi L} \right)^2}}, \quad (46)$$

которая слабее, чем обратно пропорциональная.

Заключение

Мезоструктуры с вертикальными р-п переходами обладают необычными зависимостями фотоэлектрических характеристик от геометрических и диффузионных параметров полупроводниковой структуры и конфигурации р-п перехода, что позволяет управлять спектральной чувствительностью приемников излучения и повышать КПД фотоэлектрических преобразователей энергии.

Спектральные коэффициенты сбора носителей в кремниевых структурах с "точечными" р-п переходами имеют П-образную форму в широкой спектральной области, что является их преимуществом при использовании как фотоприемников. Однако по интегральной эффективности сбора эти структуры сильно уступают обычным ФП и не являются перспективными для повышения КПД фотопреобразования.

Создание и использование мезоструктур с вертикальными р-п переходами имеет большие перспективы повышения фоточувствительности фотоприемников и ФП. В то же время в данных структурах сильно возрастает влияние скорости рекомбинации носителей заряда на освещаемой поверхности, что резко обостряет зависимость эффективности предложенного нового типа фотоэлектрических структур от решения проблемы получения высококачественных поверхностей полупроводников.

Литература

1. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1972.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ЛИНЗАМИ ФРЕНЕЛЯ

Канд. техн. наук В.А Майоров (ГНУ ВИЭСХ)

Рассмотрены концентраторы на основе линз Френеля. Проведено математическое моделирование для создания алгоритма расчёта конструкции концентратора с равномерной освещённостью с заданными энергетическими параметрами. Выведены универсальные аналитические выражения, определяющие геометрическую концентрацию, распределение освещённости по ширине освещаемой поверхности в зависимости от параметрического угла. На основании предложенной конструкции линзы Френеля и методики расчета параметров модулей с равномерным распределением освещённости на приемнике концентрированного излучения можно определять концентрацию, габаритные размеры, рабочий профиль линзы Френеля, параметрический угол, выбирать тип и размеры фотоприемника.

Ключевые слова: линза Френеля, фотоприемник, параметрический угол, рабочий профиль, ход лучей, полоса освещённости приемника.

Работы по созданию солнечных фотоэлектрических электростанций на основе концентрических плоских пластмассовых линз Френеля показали, что на приемнике можно получать необходимое распределение энергии за счёт изготовления соответствующего рабочего профиля линзы; охлаждение солнечных элементов может осуществляться пассивными воздушными радиаторами до концентрации 25 крат [1].

Линзы Френеля (ЛФ) нашли применение в фотоэлектрических модулях в США с концентрациями от 15 до 250 крат. Недостатками данного типа концентратора являются: относительно высокая точность слежения, большие пространственные объёмы модулей, необходимость интенсивного охлаждения солнечных элементов при концентрациях выше 25 крат.

Концентрические линзы Френеля, имеющие фокус на оси симметрии, имеют сильно выраженную неравномерную концентрацию от периферии к центру фокального пятна освещённости.

В силу ряда особенностей линзы Френеля (ЛФ) вызывают интерес у исследователей и проектировщиков модульных солнечных электростанций с фотоэлектрическими преобразователями энергии. При слежении за Солнцем таких модулей характерны угловые дефокусиров-

In the given work the concentrators are researched on the basis of lenses Frenel. Mathematical modelling with uniform illumination and with the established parameters of power has been made for creation of algorithm of calculation of a design of the concentrator. Universal analytical expressions are received. Expressions allow to determine geometrical concentration, distribution of illumination on width of a shined surface depending on a parametrical corner. On the basis of the offered design of lens Frenel and on the basis of the method of calculation of parameters of modules with uniform illumination on the receiver of the concentrated radiation it is possible to determine concentration, overall dimensions, a working structure of lens Frenel, a parametrical corner, to choose type and the sizes of a photodetector.

Keywords: lens Frenel, a photodetector, a parametrical corner, a working structure, a course of beams, a strip of illumination of the receiver.

ки, которые определяются углом между направлением прямых солнечных лучей и нормалью к несущей плоскости линз. Здесь имеется определенная аналогия с модулями солнечных электростанций, использующих параболоцилиндрические зеркальные концентраторы, поле концентраторов в которых формируется по законам зеркального отражения.

Целью настоящей работы является разработка и исследование модулей солнечных батарей (СБ) с использованием конструкций линз Френеля, имеющих равномерное распределение освещённости на приемнике концентрированного излучения с учетом углов дефокусировки.

На рис. 1 представлена схема конструкции солнечного модуля с линзой Френеля с равномерным распределением концентрированного излучения на линейчатом приемнике. Конструкция составлена из последовательного набора секторов концентрической ЛФ, дающей равномерное распределение концентрированного излучения на кольцевом приемнике, разрезанной по радиусу на определенное количество идентичных частей, и представляет собой плоскую ЛФ прямоугольной формы, дающей равномерное распределение концентрированного излучения на линейчатом приемнике.

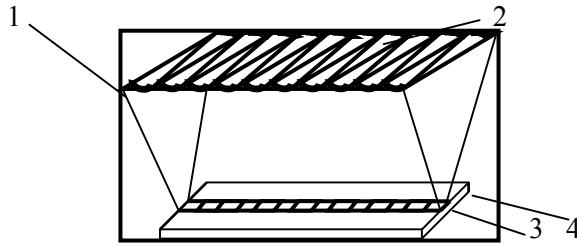


Рис. 1. Схема конструкции солнечного модуля с линзой Френеля с равномерным распределением концентрированного излучения на линейчатом приемнике:

1 - прямоугольная линза Френеля; 2 - секторы концентрической ЛФ; 3 - фотоэлектрические преобразователи; 4 - устройство охлаждения

Линза Френеля состоит из двух зон рабочего профиля, который формируется таким образом, чтобы обеспечить поступление преломленных лучей на фотоприемник и равномерное распределение концентрации освещенности по всей поверхности ФЭП.

Излучение, проходящее сквозь ЛФ, преломляется на рабочих поверхностях, чередующихся под разным наклоном через интервал Δr , накладываясь на приемник с шириной кольцеобразного концентрированного светового пятна Δr с внутренним радиусом r_0 , равным:

$$r_0 = n_0 \cdot \Delta r \text{ или } r_0 = 0,5(N-1) \cdot \Delta r, \quad (1)$$

где среднее значение $n_0 = 0,5(N-1)$.

Радиус ЛФ соответственно равен величине:

$$R = N \cdot \Delta r. \quad (2)$$

Ход лучей в концентрической конструкции ЛФ без учета неосвещенной части δ_n величины Δr рассмотрен в работе [2].

С учетом δ_n ширина полосы освещенности шириной Δr_n в фокальном пятне, концентрируемой от n -й рабочей поверхности ЛФ, равна:

$$\Delta r_n = \Delta r - \delta_n, \quad (3)$$

где δ_n – неосвещенная часть величины Δr , зависящая от параметров n -й рабочей поверхности ЛФ, равная соотношению:

$$\delta_n = h_n \operatorname{tg} \beta_n. \quad (4)$$

Площадь n -й рабочей поверхности ЛФ шириной Δr равна:

$$\Delta S_{pn} = \pi \Delta r^2 (1 + 2n). \quad (5)$$

Площадь полосы освещенности шириной Δr_n в фокальном пятне, концентрируемой от n -й рабочей поверхности ЛФ, равна:

$$\Delta S_{n_o} = \pi \Delta r^2 \left(1 - \frac{\delta_n}{\Delta r}\right) (1 + 2n_o \pm \frac{\delta_n}{\Delta r}). \quad (6)$$

Концентрация освещенности K_n от n -й рабочей поверхности в фокальном пятне равна:

$$K_n = \frac{\Delta S_{pn}}{\Delta S_{n_o}} = \frac{(1 + 2n)}{\left(1 - \frac{\delta_n}{\Delta r}\right) (1 + 2n_o \pm \frac{\delta_n}{\Delta r})}. \quad (7)$$

Суммарная концентрация K освещенности рабочей поверхности в фокальном пятне равна:

$$K = \sum_{n=0}^N K_n = \sum_{n=0}^N \frac{(1 + 2n)}{\left(1 - \frac{\delta_n}{\Delta r}\right) (1 + 2n_o \pm \frac{\delta_n}{\Delta r})}. \quad (8)$$

На основании приведенных формул произведен расчет зависимости геометрической концентрации модуля от площади приемника (рис. 2), которая зависит от величины изменения радиуса (ширины) приемника Δr . Радиус линзы Френеля $R=15$ см; величина изменения ширины радиуса приемника Δr в пределах: 0,2 – 2,0 см.



Рис. 2. Зависимость геометрической концентрации модуля от ширины фотоприемника

При уменьшении ширины радиуса Δr (уменьшении площади приемника) происходит увеличение геометрической концентрации модуля.

Таким образом, можно задавать геометрическую концентрацию модуля, не изменяя габаритных размеров линзы Френеля.

На рис. 3 приведены зависимости распределения концентрации освещенности по радиусу приемника, имеющего различные величины Δr . Радиус линзы Френеля $R=15$ см; величина изменения радиуса (ширины) приемника Δr равна 1,0 см.

Из приведенных характеристик видно, что распределение концентрации освещенности по радиусу (ширине) изменяется незначительно в начале и конце приемника, что не влияет на энергетические характеристики модуля.

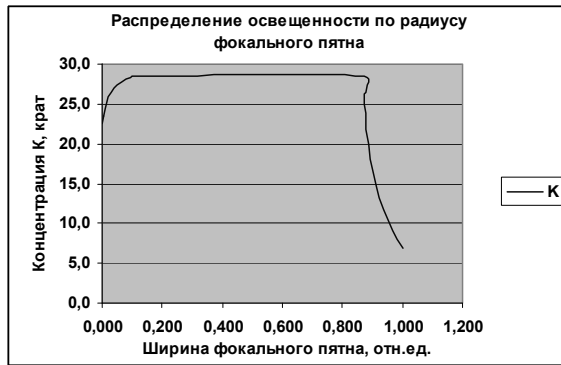


Рис. 3. Зависимости распределения концентрации освещенности по радиусу (ширине) приемника Δr

Ход лучей в линзе Френеля с учетом параметрического угла γ в радиальном направлении показан на рис. 4.

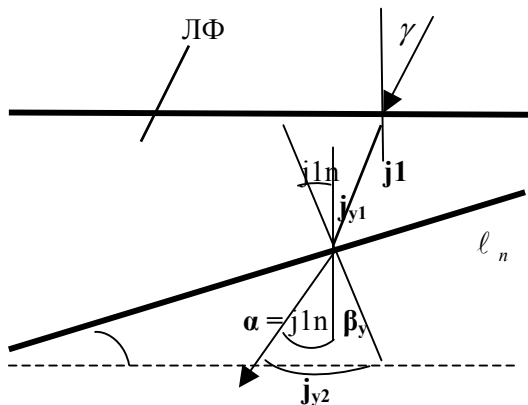


Рис. 4. Ход лучей в линзе Френеля с учетом параметрического угла γ

Основные расчетные соотношения хода лучей от линзы Френеля до приемника с учетом параметрического угла γ :

$$\beta_y = j_{y2} - j_{1n}, \quad (9)$$

где β_y – угол между лучом, перпендикулярным наружной плоскости ЛФ, и преломленным лучом, попадающим на приемник; j_{y2} – угол между преломленным рабочей плоскостью ЛФ лучом, попадающим на приемник, и прямой, перпендикулярной к рабочей плоскости, расположенной на радиусе R_n ;

$$j_{y1} = j_{1n} + j_1, \quad (10)$$

где j_1 – угол между лучом, преломленным наружной плоскостью ЛФ, и прямой, перпендикулярной к наружной плоскости; j_{y1} – угол между лучом, преломленным наружной плоскостью ЛФ, и прямой, перпендикулярной к рабочей плоскости, расположенной на радиусе R_n [3];

$$\sin j_{\gamma 1} = \frac{\sin \gamma}{n_{12}}, \quad (11)$$

где γ – параметрический угол, (угол отклонения от нормального падения солнечного излучения на наружную поверхность ЛФ, при котором не изменяются энергетические параметры модуля).

$$\operatorname{tg} \beta_{\gamma} = \frac{d \cdot (n - n_{\gamma 0})}{H}, \quad (12)$$

где $n_{\gamma 0}$ – смещенный параметр величины относительно $n_0 = 0,5(N - 1)$.

Величина смещения n -й составляющей светового пятна Δ_n равна:

$$\Delta_n = H \cdot (\operatorname{tg} \beta_{\gamma} - \operatorname{tg} \beta_n). \quad (13)$$

Величина смещения ширины n -й составляющей светового пятна δ_n равна:

$$\delta_n = [(\operatorname{tg} \beta_N - \operatorname{tg} \beta_n) - (\operatorname{tg} \beta_{\gamma N} - \operatorname{tg} \beta_{\gamma n})]. \quad (14)$$

Величина ширины светового пятна Δr_{γ} :

$$\Delta r_{\gamma} = \Delta r + \delta_{n_0}. \quad (15)$$

Величина ширины светового пятна с максимальным значением концентрации светового пятна Δr_{κ} равна:

$$\Delta r_{\kappa} = \Delta r - \delta_{n_0}. \quad (16)$$

Ширина приемника d должна соответствовать значению $d \geq \Delta r_{\gamma}$.

Максимальная величина смещения светового пятна Δ равна:

$$\Delta = 0,5 \cdot (d - \Delta r). \quad (17)$$

Концентрации освещенности на приемнике K_n от каждой рабочей плоскости ЛФ:

$$K_n = \frac{2n - 1}{N}. \quad (18)$$

Концентрации освещенности на приемнике $K_{\gamma n}$ от каждой рабочей плоскости ЛФ с учетом взаимных перекрытий:

$$K_{\gamma n} = K_{N-n} + K_n. \quad (19)$$

Распределение концентрации освещенности K_{δ} в интервалах значений величин смещения ширины n -й составляющей светового пятна δ_n :

$$K_{\delta} = \sum_{N}^{n=0} K_{\gamma n} = K_{\gamma n} \cdot [n_0 - |n - n_0|]. \quad (20)$$

Распределение концентрации освещенности K по радиусу приемника рассчитывается с учетом величины ширины светового пятна Δr_{κ} с максимальным значением концентрации светового пятна.

На основании приведенных формул произведен расчет величины смещения полосы ос-

вещности приемника – Δ_N в зависимости от изменения параметрического угла γ (рис. 5).

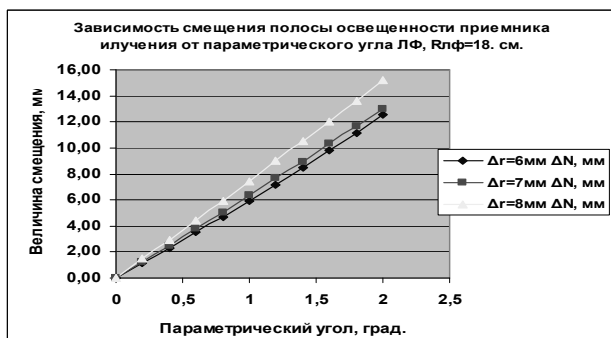


Рис. 5. Величины смещения полосы освещенности приемника Δ_N , в зависимости от изменения параметрического угла γ .

Радиус линзы Френеля R=18 см. Значения полос освещенности Δr - 6; 7; 8 мм

Из приведенных характеристик видно, что при увеличении параметрического угла γ увеличивается величина смещения полосы освещенности приемника – ΔR тем больше, чем больше величина освещаемой поверхности приемника Δr .

На основании приведенных формул произведен расчет величины смещения полосы освещенности приемника – Δ_N и Δ в зависимости от изменения ширины полосы освещенности – Δr поверхности приемника илучения (рис. 6).

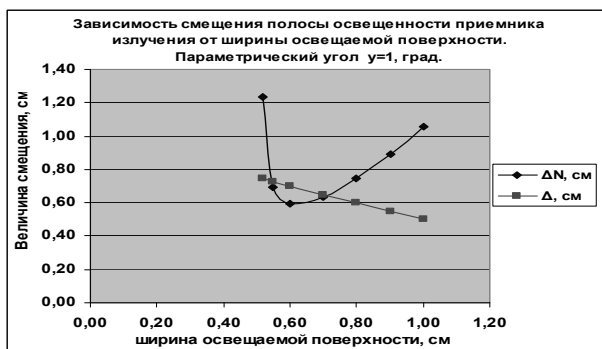


Рис. 6. Величина смещения полосы освещенности приемника – Δ_N и Δ , в зависимости от изменения ширины полосы освещенности – Δr поверхности приемника илучения.

Радиус линзы Френеля R=18 см; параметрический угол $\gamma=1^\circ$

Из приведенных характеристик видно, что при изменении ширины освещаемой поверхности приемника Δr величина смещения полосы освещенности приемника – ΔR имеет минимум,

характеризующийся конструктивными параметрами модуля, заложенными в вышеприведенные расчетные формулы.

На основании приведенных формул произведен расчет зависимости распределения концентрации освещенности по радиусу (ширине) приемника, показанный на рис. 7.

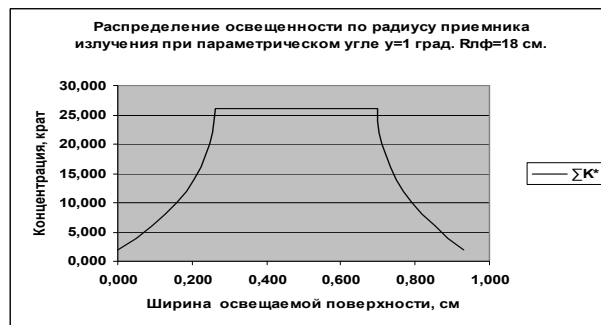


Рис. 7. Распределение освещенности по ширине освещаемой поверхности приемника илучения при параметрическом угле $\gamma=1^\circ$.

Радиус линзы Френеля R=18 см; параметрический угол $\gamma=1^\circ$

На основании приведенной характеристики видно, что при изменении угла отклонения от нормального падения солнечного илучения на наружную поверхность ЛФ на параметрический угол $\gamma=1^\circ$ (при котором не изменяются энергетические параметры модуля), ширина освещаемой поверхности приемника Δr_γ увеличивается от 0,7 до 0,935 см.

Выводы

На основании предложенной конструкции линзы Френеля и методики расчета параметров модулей с равномерным распределением освещенности на приемнике концентрированного илучения можно определять концентрацию, габаритные размеры, рабочий профиль линзы Френеля, параметрический угол, выбирать тип и размеры фотоприемника.

Литература

1. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного илучения. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007.
2. Майоров В.А., Стребков Д.С. Исследование работы модулей солнечных батарей с линзами Френеля // Труды 7-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». Часть 4. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. С. 109-114.
3. Тамир Т. Интегральная оптика. М.: Мир, 1978.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛЕЯЩЕЙ ПЛЕНКИ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Академик Россельхозакадемии Д.С. Стребков,
канд. техн. наук И.С. Персиц (ГНУ ВИЭСХ), канд. хим. наук В.Г. Данилов
(ОАО «НПО Пластик»), доктор техн. наук А.А. Полисан (МИСиС)

Приведено краткое обобщение результатов разработки радиационно-модифицированной клеящей пленки для фотоэлектрических модулей. Обсуждаются результаты фото-термостабильности материала и длительного опыта его эксплуатации.

Ключевые слова: *Материал-заполнитель для фотоэлектрических модулей; капсулирующий материал на основе этилен-винилацетата; деградация, стабильность, ускоренные климатические испытания.*

Известно, что качество материалов-заполнителей является решающим фактором, определяющим длительную работоспособность фотоэлектрических модулей. Наиболее распространенным в современной мировой практике производства фотоэлектрических модулей является заполнитель на основе сополимера этилена с винилацетатом перекисной сшивки, проводимой для придания необходимой теплостойкости готовому изделию. Свойства различных модификаций таких заполнителей, отличающихся скоростью сшивки и составом стабилизирующего комплекса, подробно исследованы рядом авторов [1, 2]. Сравнительный анализ результатов этих исследований позволяет говорить о целом ряде недостатков, присущих всем изученным модификациям пленок:

1. Недостаточная стабильность оптических характеристик при длительной эксплуатации и в условиях воздействия концентрированных потоков солнечного излучения;
2. Коррозионная активность;
3. Ограниченный срок хранения пленок и нестабильность свойств в пределах срока хранения за счет диффузии перекиси и компонентов стабилизирующей системы из массы пленки;
4. Принципиальные ограничения по производительности процесса ламинирования в связи с необходимостью осуществления перекисной сшивки материала-заполнителя в процессе формирования модуля;
5. Интенсивное выделение летучих в процессе термовакуумного ламинирования, осложняющих условия работы вакуумного оборудо-

This paper briefly summarizes the results from e-beams modification EVA-encapsulant development. The results of the photo-thermal reliability studies and long-term field experience are discussed.

Keywords: *PV cell encapsulation; EVA (Ethylene Vinyl Acetate) encapsulant; degradation; stability; accelerated exposure tests.*

вания (активные перекисные радикалы, окислы углерода, уксусная кислота и др.).

С целью улучшения технологических и эксплуатационных характеристик клеящей пленки нами был использован альтернативный метод создания пространственно-сшитой структуры. Известно, что для модификации свойств ряда полимеров успешно применяется обработка материала ионизирующими излучениями, в частности потоком ускоренных электронов [3, 4].

Основной сложностью разработки клеящей пленки с заранее созданной пространственной структурой была оптимизация степени сшивки, обеспечивающей необходимую теплостойкость материала и, в то же время, сохраняющей содержание плавкой фазы, достаточное для обеспечения текучести в процессе термовакуумного ламинирования и удовлетворительной адгезии к основным конструктивным элементам фотоэлектрического модуля.

Нами было исследовано влияние облучения электронами с энергией $E=1,3$ МэВ на оптические, прочностные и адгезионные характеристики нестабилизированных пленок из сополимера ЭВА марки 11708-210 (11708-1250).

Изменение спектрального коэффициента пропускания в процессе облучения дозами до 50 Мрад показано в табл. 1. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в интервале длин волн, соответствующем диапазону спектральной чувствительности кремниевых фотопреобразователей, облучение ускоренными электронами в исследованном диапазоне поглощенных доз не приводит к снижению оптической прозрачности образцов.

Таблица 1. Влияние облучения ускоренными электронами на оптическую прозрачность пленок из сополимера ЭВА толщиной 50 мкм

Длина волны, нм	Спектральный коэффициент светопропускания T, %				
	Доза облучения, Мрад				
	0	5	10	25	50
240	0	0	0	0	0
260	22,5	22,5	14,0	13,5	3,5
280	28,0	28,0	21,5	24,0	12,0
300	48,0	48,0	44,0	42,0	29,0
320	61,5	61,5	62,5	61,0	54,5
350	69,0	69,0	72,0	73,5	74,5
400	78,5	78,5	82,0	83,5	86,5
450	80,5	80,5	84,0	85,0	88,0
500	82,0	82,0	85,0	86,0	88,5
550	82,5	82,5	85,0	86,0	88,5
600	83,0	83,0	86,5	87,5	90,0
650	83,5	83,5	87,0	88,5	90,0
700	85,0	85,0	88,0	89,0	90,0
800	85,0	85,0	88,5	89,5	91,0
900	86,0	86,0	89,0	90,0	91,0
1000	86,5	87,0	89,0	90,0	92,0

Результаты определения прочностных характеристик пленок ЭВА после облучения, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о преимущественном протекании процесса радиационного структурирования по этиленовым звеньям вплоть до дозы 25 Мрад.

Таблица 2. Влияние облучения ускоренными электронами на прочностные и адгезионные характеристики пленок ЭВА

Доза облучения, Мрад	Условная прочность при растяжении, кг/см ²	Относительное удлинение при разрыве, %	Среднее усилие расслаивания образца шириной 1,5 см (Ф-4МБх.а. – ЭВА – Ф-4МБх.а.) [*] , кг
0	45,0	690	3,25
5	141,4	606	3,25
10	151,0	552	3,3
25	176,3	342	3,3
50	65,4	170	2,1

* Ф-4МБх.а. – пленка из сополимера тетрафторэтилена с гексафторпропиленом, активированная натрий-антраценовым комплексом.

Облучение дозой 50 Мрад приводит к резкому падению предела прочности при растяжении, что свидетельствует о преобладающем протекании в этом диапазоне доз деструктивных процессов. Результаты определения усилия рас-

слаивания образцов согласуются с предполагаемым механизмом преимущественной деструкции сополимера при дозах свыше 25 Мрад, протекающей по винилацетатным звеньям, ответственным за адгезионную прочность.

Изучение дозовой зависимости гелевой фракции в облученных образцах показало, что достижение степени структурирования 40-45% (по пара-ксилолу) в нестабилизированных образцах происходит уже после облучения дозой 10 Мрад. Присутствие свето- и термостабилизаторов в составе пленок существенно снижает эффективность радиационного сшивания. Так для достижения аналогичного эффекта структурирования на образцах со стабилизирующей системой:

Диацетам-5 – 0,1 масс. доли,

Бензон ОА – 0,3 «-»-,

Фосфит НФ – 0,2 «-»-

требуется облучение дозой 25 Мрад.

Исследование облученных образцов при температуре 90 °С без нагрузки показало, что оптимальной является степень структурирования 15–20% по пара-ксилолу (56–60% по тетрагидрофурану), которая обеспечивает сочетание достаточной теплостойкости с адгезионной прочностью на уровне перекисно-сшитых пленок.

Подробные независимые исследования радиационно-модифицированной пленки на основе стабилизированной композиции из сополимера ЭВА (пленка «Радэва-2А») в сравнении со стандартными перекисно-сшиваемыми рецептурами EVA 9918 (медленной сшивки) и EVA 15295 (быстрой сшивки) фирмы STR были проведены в ходе совместных работ с NREL (Национальная Лаборатория по возобновляемым видам энергии, США) в 1998 – 2000 годах [5, 6].

Образцы пленок были подвергнуты ускоренным испытаниям, включающим длительное воздействие повышенной температуры (85 °С) в темноте и экспозицию в имитаторе полного солнечного спектра (FS-SS) с концентрацией в УФ-области спектра (300 – 400 нм) от 6,5 до 9. Образцы для испытаний представляли собой ламинаты из двух борсиликатных стекол с клеящим слоем пленок EVA различных составов.

Структурные изменения в пленках в процессе испытаний исследовались как с помощью оптических характеристик (интегральные и спектральные коэффициенты светопропускания на спектрофотометре «Cary-5G»), индекс желтизны на «Hunter Lab Ultra Scan» спектрофотометре, флуоресцентно-эмиссионный анализ на спектрофотометре «SPEX FL 112»), а также при помощи анализа содержания гелевой фракции.

Сравнительными исследованиями было показано, что скорость окрашивания (потемнения) пленок четко зависит от рецептуры, способа сшивки, условий и длительности испытаний. Из данных на рис. 1 видно, что по стойкости к окрашиванию радиационно-модифицированная пленка «Радэва-2А» превосходит стандартную рецептуру медленной сшивки EVA A9918. В первоначальный период экспозиции под воздействием имитатора солнечного излучения (до 1000 часов испытаний) скорость и интенсивность окрашивания пленки «Радэва-2А» выше, чем для пленки быстрой сшивки EVA 1595, однако при длительной экспозиции (свыше 1000 часов) «Радэва-2А» проявляет существенно большую стабильность оптических свойств.

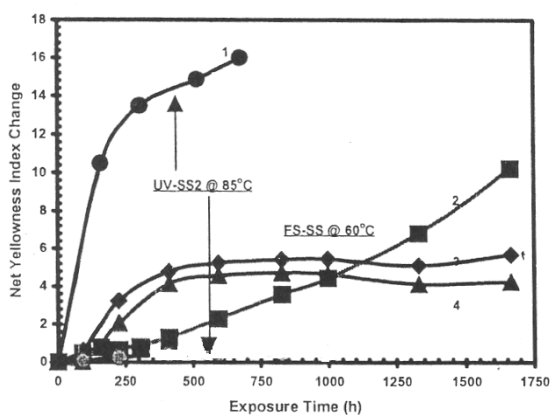


Рис. 1. Изменение индекса желтизны пленок EVA различных составов в процессе ускоренных испытаний под имитатором полного солнечного спектра:

1 - EVA A9918; 2 – EVA 15295; 3, 4 – Радэва-2А

Результаты флуоресцентно-эмиссионного анализа образцов пленок, экспонированных под имитатором солнечного излучения (рис. 2), свидетельствуют о появлении (после 136 часов облучения), последующем росте (после 271 часа облучения) и быстром снижении интенсивности эмиссионных пиков при дальнейшем облучении, связанном с процессами фотоокислительного «отбеливания» – разрушения хромофорных группировок, генерированных в процессе радиационной сшивки.

Эти результаты полностью согласуются с данными исследования спектрального коэффициента светопропускания ламинатов в процессе облучения, свидетельствующими об интенсивном протекании процессов фотоотбеливания (повышение светопропускания в коротковолновой области спектра) и стабильности прозрачности в области максимальной спектральной чувствительности фотопреобразователей.

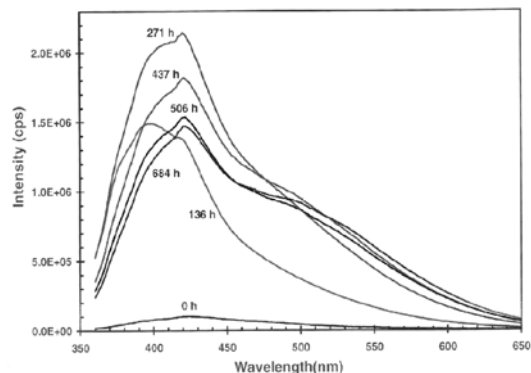


Рис. 2. Изменение интенсивности эмиссионных пиков УФ-генерируемых хромофорных групп в процессе ускоренных испытаний под имитатором полного солнечного излучения

Для образцов пленки «Радэва-2А», подвергнутых длительному воздействию повышенной температуры (85 °С) в темноте, заметно существенное повышение концентрации хромофоров, свидетельствующее об интенсивном протекании термоокислительных процессов, тогда как в этих же условиях концентрация хромофорных группировок в пленке EVA 15295 практически не изменяется (рис. 4).

Содержание гель-фракции, характеризующее степень структурирования материала, как в процессе теплового старения, так и под действием имитатора солнечного излучения для образцов пленки EVA 15295 не изменяется (табл. 3). При этом, для пленки «Радэва-2А», подвергавшейся термостарению в темноте, содержание гель-фракции снизилось, в то время как светостарение привело к существенному повышению содержания гель-фракции. Это повышение может быть объяснено фотохимическими реакциями, которые инициировали фоторазложение УФ-абсорбера и ускорили свободно-радикальные процессы сшивки.

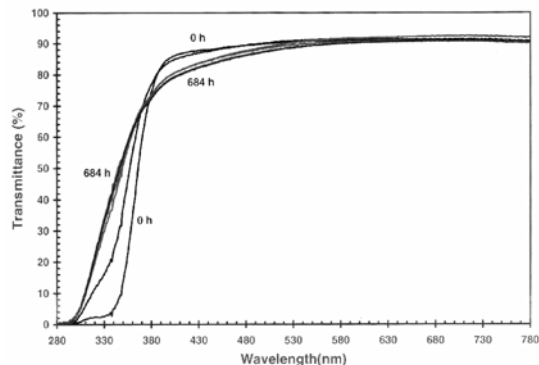


Рис. 3. Изменение спектрального коэффициента светопропускания ламината с пленкой «Радэва-2А» в процессе ускоренных испытаний под имитатором полного солнечного излучения

Предлагаемый механизм структурных изменений был также подтвержден количественным анализом потерь УФ-абсорбера в процессе светостарения образцов. После 1000 часов светостарения снижение интенсивности пика поглощения составляет 30% и 12% соответственно для пленки «Радэва-2А» и для EVA 15295. Таким образом, потери УФ-абсорбера для радиационно-модифицированной пленки существенно выше, чем для перекисно-сшиваемой.

Тщательный анализ спектров поглощения показал, что потемнение образцов в процессе термостарения можно объяснить общим ростом поглощения в области 280 – 400 нм, связанным с появлением коротких полисопряженных цепей.

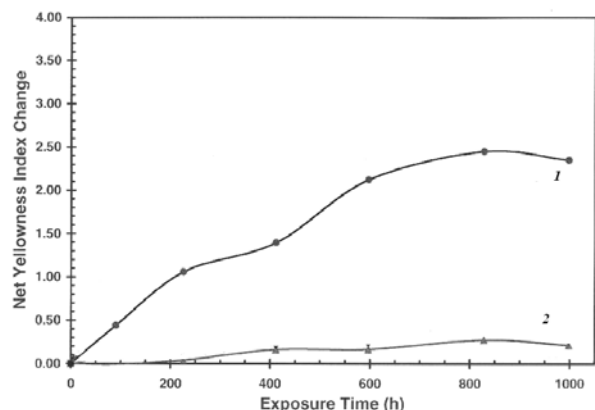


Рис. 4. Изменение индекса желтизны ламинатов под воздействием повышенной температуры (85 °C) в темноте:
1 – «Радэва-2А»; 2 - EVA 15295

Таблица 3. Изменение содержания гель-фракции образцов в процессе ускоренного старения

Время экспозиции, часы	Содержание гель-фракции, %			
	EVA 15295		«Радэва-2А»	
	Имитатор FS-SS	Термостарение при 85 °C	Имитатор FS-SS	Термостарение при 85 °C
0 (исх.)	91,37	91,37	67,91	67,91
200	90,06	90,53	69,97	69,24
400	90,03		68,16	
600	90,21		66,27	62,22
800	91,05	90,51	74,50	62,63
1000	90,18	92,08	74,06	61,94

Выводы

Обобщая результаты испытаний, можно говорить о том, что радиационно-модифицированная пленка превосходит перекисно-сшитую с точки зрения длительной светостойкости и несколько уступает по термостабильности.

Принимая во внимание то, что основным требованием к фотоэлектрическим модулям является постоянство выходных электрических параметров, обусловленное стабильностью оптических свойств заполнителя в условиях длительного светостарения, радиационно-модифицированная пленка на основании результатов проведенных исследований была внедрена в производство на шести российских предприятиях. Пятнадцатилетний опыт работы с пленкой Радэва-2А подтвердил ее высокую технологичность и стабильность в эксплуатации.

Литература

1. Czanderna A.W. Overview of possible causes of EVA degradation in PV modules//in: L. Mrig PV Module Reliability Workshop/SERI, 1990, p.159.

2. Pern F.J. and Czanderna A.W. Characterization of ethylene vinyl acetate (EVA) encapsulant: Effects of thermal processing and weathering degradation on its discoloration//Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 25 (1992) 3.
3. Махлис Ф.А. Радиационная физика и химия полимеров. М.: Атомиздат, 1972.
4. Данилов В.Г. Радиационно-модифицированные изделия из полимеров и технология их изготовления // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия: «Техническая физика и автоматизация». М., 2004. Вып. 58. С. 35.
5. Report on the Work for ECD/Russian Sovlux EVA Study (Final Report) // NCPV, NREL. # D089.0173. CRADA Technical Monitor: Bolko Von Roedern; prepared: John Pern, Ph.D.
6. Pern F.J. and Glick S.H. Photothermal Stability of Various Module Encapsulants and The Effects of Superstrate and Substrate Materials Studied for PVMat Sources // 16th NCPV Program Review Meeting, April, 2000 / NERL, Golden, Co.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Академик Россельхозакадемии Д.С. Стребков,
доктор техн. наук А.И. Некрасов, В.З. Трубников, канд. техн. наук В.А. Руденко
(ГНУ ВИЭСХ)

Выполнен анализ методов формирования проводящих каналов, необходимых для использования атмосферного электричества. Дано обоснование возможности применения активных молниеприемников для сбора атмосферного электричества.

Дано описание действующей установки для сбора и преобразования энергии электрического поля, содержащей сферическую электрическую емкость, имитирующую заряженное грозное облако, активный молниеприемник, коническую однослойную катушку, соединенную с накопительным конденсатором, преобразователем и нагрузкой.

Рассмотрены результаты предварительных испытаний, возможности и перспективы использования атмосферного электричества.

Ключевые слова: атмосферное электричество, энергия электрического поля, активный молниеприемник, стримерная эмиссия, коронный разряд, проводящий канал, приёмник электрических зарядов, преобразователь.

Атмосферное электричество, проявляющееся в виде молний и грома, издавна интересовало человека, который постоянно искал ответы на причины его появления, способы защиты от его последствий, а также возможности ее использования. Научное изучение и исследование атмосферного электричества (АЭ) проводятся уже более двухсот лет, а их начало принадлежит Б. Франклину (США) и М. Ломоносову (Россия). Эти исследования тесно связаны с изучением атмосферы земли, погоды и климатических процессов.

Непосредственное изучение этих проблем проводят институт прикладной физики (ИП-ФРАА), Нижегородский радиофизический институт (НИРФИ), Институт физики Земли (ИФЗ РАН), ЭНИН им. Г.М. Кржижановского и др. [1].

В целях обоснования общей концепции решения проблемы использования атмосферного электричества настоящий обзорный материал направлен на систематизацию и обновление информации по всем направлениям исследований об атмосферном электричестве. Например о природе и местах его образования, видах его проявления, влиянии на погодные и климатические явления; о величинах и характере концентрации зарядов рас-

The analysis of the methods of the shaping conducting channel required for use atmospheric electricity is fulfilled in the article. The description of the installation for collection and transformations to energy of the electric field is given. The installation contains the spherical electric capacity imitating charged storm cloud, active lightning receiver cone-shaped one layer spool united with by capacitor converter and load. The results of the spot tests, possibility and prospects of the use atmospheric electricity are represented.

Key words: atmospheric electricity, the energy of the electric field, an active lightning, streamer emission, corona discharge, a conducting channel, the receiver of electric charges, the transducer.

пределения напряженности электрического поля в грозных облаках; видах и параметрах, сопровождающих разряды молний; способах защиты линий электропередачи, производственных объектов, персонала от поражения грозными высоковольтными разрядами молний.

Атмосферное электричество (АЭ) является возобновляемым источником энергии (ВИЭ) и может дополнять солнечную фотоэлектрическую энергетику. Установка для сбора и преобразования АЭ (УСПАЭ) должна находиться в постоянном ждущем режиме, автоматически активизироваться и переходить на рабочий режим при увеличении напряженности электрического поля в предгрозовой период. Она должна работать без постоянного присутствия оператора и иметь высокий уровень безопасности и эксплуатационной надежности, а также, как мобильный вариант, при необходимости иметь возможность перемещения для приема энергии грозных разрядов или съема негрозового атмосферного электричества [2].

В решении проблемы практического использования энергии, вырабатываемой природным атмосферным электрическим генератором (АЭГ), стоят следующие основные задачи:

- обнаружение грозových облаков, обладающих необходимым для практического использования электрическим зарядом, а также определение вероятности их появления в заданном районе в течение года;

- оценка энергетического потенциала грозových облаков;

- создание электропроводящего канала для передачи накопленного объема электричества от заряженных облаков к пункту сбора электрической энергии;

- сбор, накопление, преобразование АЭ в пригодный для практического применения формат электрической энергии и питание электрической нагрузки;

- обеспечение защиты всех элементов системы от перенапряжений и возможных пробоев, а также техники электробезопасности обслуживающего персонала и потребителей.

Анализ отечественной и зарубежной литературы и патентной документации свидетельствует о росте повышения интереса к вопросам поиска решений и создания высокоэффективных установок для получения электроэнергии из атмосферного электричества. Однако, несмотря на многочисленные исследования и проводимые опыты, многие вопросы защиты, а тем более использования АЭ, остаются открытыми.

Анализ также показывает, что наряду с разработкой технологий и моделей утилизации атмосферного электричества целесообразным является создание демонстрационных макетов отдельных элементов системы (приборов и устройств), осуществляющих обнаружение и оценку, сбор, передачу, прием, накопление, преобразование и потребление полученной электроэнергии. Земля и ее атмосфера являются генератором электричества, постоянно “работающим” и заряжающим огромный конденсатор.

Упрощенная схема глобальной электрической цепи (ГЭЦ) представляется как замкнутая система, физически реализующаяся токовым контуром, состоящим из проводящих слоев нижней атмосферы и земной коры с грозowymi зонами, генераторами электродвижущих сил и токов заряда, с зонами негрозовой атмосферы в виде обратных токов, при этом полный заряд Земли не равен нулю. Эта схема включает в себя также грозовые тропосферные генераторы, осуществляющие зарядку сферического конденсатора, обкладками которого являются Земля и ионосфера.

ГЭЦ содержит всю совокупность глобальных, региональных и локальных генераторов атмосферного электричества. Между ионосфе-

рой и землей поддерживается разность потенциалов на уровне 350 кВ.

Основными ионизирующими воздух факторами являются космические лучи, ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, а также вращение Земли. На Земле происходит одновременно 1500-2000 гроз с общей мощностью 1-10 ГВт. Средняя величина заряда облака составляет 30 Кл. Среднее время грозового состояния атмосферы в средней полосе России 40-60 часов в год, а в южной зоне достигает 80-100 часов. Напряженность электрического поля у поверхности земли составляет примерно 100 В/м, а во время грозы увеличивается до 40-100 кВ/м. Согласно классическим представлениям стационарное состояние ГЭЦ формируется одновременным действием 1500-1800 грозовых генераторов с токовым выходом по 0,5-1 А и общим током 800-1500 А. Величина сопротивления 1 м² столба атмосферы в слое обмена составляет 1,3·10¹⁷ Ом. Потенциал ионосферы составляет 180-400 кВ и изменяется в соответствии с солнечной и геомагнитной активностью, а также в результате мощных атмосферных явлений [3].

Оценим мощность генератора тока в предположении, что собирающим электродом выступает электропроводящая сфера радиуса R , размещенная на высоте h над землей. Из литературы [4] известны аппроксимации закона убывания напряженности приземного электрического поля в зависимости от высоты. Для арктических и океанических регионов профиль напряженности имеет вид [5]

$$E(h) = E_0 \exp(-a_1 h), \quad (1)$$

где E_0 – поле на поверхности земли, h – высота, км, a_1 – скорость убывания поля, лежащая в пределах 0,25 – 0,4 км⁻¹. Для континентальных районов возможны другие аппроксимации.

Гальванически соединенная с Землей сфера, расположенная на высоте h над землей, будет создавать в окружающем пространстве напряженность поля

$$E = U / R, \quad U = \int_0^h E_0 \exp(-a_1 z) dz, \quad (2)$$

приводя к току ионов на сферу j в виде следующей зависимости

$$j = e \mu E n_0 \pi R^2, \quad (3)$$

где e – средний заряд ионов; μ – подвижность ионов; n_0 – концентрация ионов вблизи проводящей сферы.

Для типовых значений при $h=100$ м $n_0 \approx (1.8 - 2.5) \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $\mu \approx 10^{-4} \text{ м/Вс}$ [5] для легких и однозарядных $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кул}$ оценка мощности тока имеет вид $P = U \cdot j \approx (2,9 - 4) \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$.

Для реализации режима электрического взаимодействия с наэлектризованной атмосферой разработано согласующее устройство, принципиальная схема которого – на рис. 1.

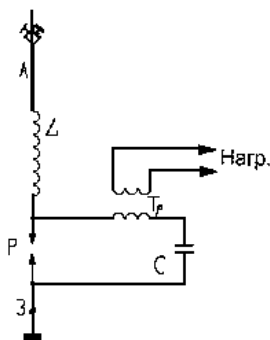


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки для получения электрической энергии из атмосферы:

А – активный молниеприемник АМП типа Форенд; **L** – резонансная катушка; **P** – разрядник; **C** – накопительная емкость; **З** – земля

Установка работает следующим образом. Электрические заряды атмосферного электричества через активный молниеприемник *A* и резонансную катушку *L* накапливаются в накопительной емкости *C*, имеющей малый ток утечки. При достижении на конденсаторе *C* напряжения пробоя разрядника *P* последний срабатывает, выполняя роль спускового механизма. При этом импульс тока разряда инициирует волну электрического возмущения в катушке *L*, нижний конец которой замыкается на землю. В результате прохождения импульса тока разряда на верхнем потенциальном выводе катушки *L* появляется высокий потенциал, который складывается с собственным потенциалом активного молниеприемника Форенд, и, суммируясь с ним, оказывает дополнительное воздействие на процесс генерации восходящего лидера для инициирования негрозового разряда объемного электрического заряда облака на активный молниеприемник Форенд [5].

Смонтированная лабораторная установка представлена на рис. 2. Установка содержит металлическую сферу *1*, имитирующую заряженное облако, активный молниеприемник *2*, резонансную коническую катушку *3*, соединенную с кон-

денсатором и (через разрядник *P*) с землей. Катушка имеет индуктивность 27 мГн, намотана проводом ПВВ-1. Сечение медной проводящей жилы 1 мм². При проведении исследований и измерений в вертикальном положении катушка устанавливается на шести фарфоровых изоляторах, а при работе конической катушки в горизонтальном положении для неё используется специальный ложемент из деревянного бруса, позволяющий расположить ось катушки параллельно горизонтальной поверхности пола лаборатории.

Разрядник имеет регулируемый (по нониусу) зазор в пределах 0 – 3 мм с погрешностью 0,1 мм. При испытаниях реализовывался режим инициируемого разряда путем подачи положительного потенциала на металлическую сферу *1* от источника постоянного напряжения (ИПН) величиной 10 кВ.

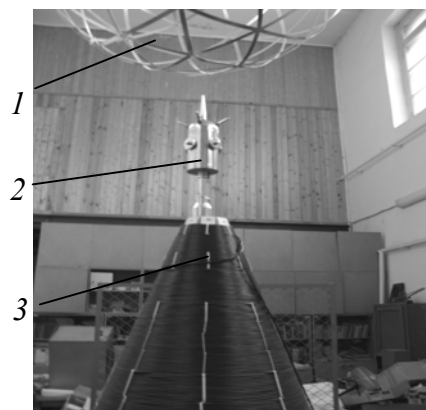


Рис. 2. Установка для моделирования разряда заряженной сферы на активный молниеприемник и коническую резонансную катушку



Рис. 3. Разрядник с регулируемым зазором

На рис. 3 представлен разрядник с регулируемым зазором. Экспериментальная установка работала в режиме искусственной подпитки высоковольтного накопительного конденсатора *C* от источника постоянного напряжения, так как оборудование размещено в зале, где отсутствует необходимый фон атмосферного электричества.

На рис. 4 представлена собранная схема блока искусственной подпитки высоковольтного накопительного конденсатора C .

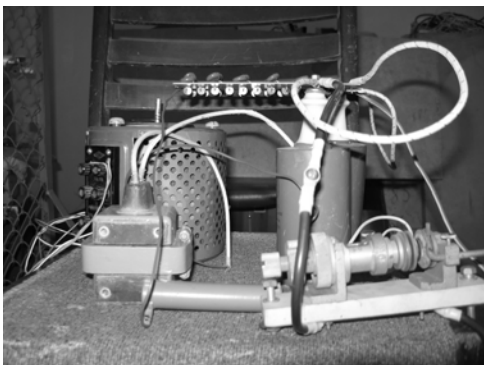


Рис. 4. Блок искусственной подпитки накопительного конденсатора

Эксперименты поставлены с использованием конической и однослойной цилиндрической (рис. 5) катушек.



Рис. 5. Однослойная цилиндрическая катушка. Возбуждение от генератора гармонических колебаний (измерение электрических параметров катушки). Рабочий момент

Катушки индуктивности, используемые в режиме трансформаторов Тесла, перед проведением экспериментов обследовались на предмет определения величин их электрических параметров, при этом получены следующие значения параметров.

Однослойная цилиндрическая катушка:

- индуктивность, L , 11,2 (мГн);
- добротность, Q – 50;
- резонансная частота – 220 (кГц).

Однослойная коническая катушка:

- индуктивность L , 27 (мГн);
- добротность Q , 60;
- резонансная частота 310 (кГц).

Добротности катушек измерялись по ширине полосы пропускания при расстройке до уровня 0,7 от максимального напряжения при возбуждении в режиме трансформатора Тесла на первой резонансной частоте.

Перед началом проведения экспериментов по имитации разрядов была произведена проверка катушек на электрическую прочность изоляции обмоток от межвиткового пробоя и пробоя по поверхности направляющих брусов каркаса. Для этого цилиндрическая и коническая катушки включались в режиме трансформатора Тесла и с помощью искрового промежутка с рабочим напряжением 40 кВ (в режиме ударного возбуждения) приводились в режим генерации высоких потенциалов с частотой повторения ударов не ниже 5 Гц.

Питание цепей накачки цилиндрической и конической катушек напряжением 40 кВ обеспечивало при проведении испытаний «раскачку» потенциала высоковольтного вывода катушек до 300–350 кВ. Величина потенциала оценивалась по длине пробиваемого промежутка воздуха между высоковольтным выводом и землей в системе электродов «острие – плоскость». Пробои между витками и на поверхности деревянных брусков не наблюдались.

Эксперименты по сбору энергии имитируемого электрического поля производились следующим образом. К накопительному конденсатору C через балластное сопротивление R своей отрицательной клеммой подключается источник постоянного напряжения, а положительная клемма источника заземляется. На проводящую сферу, которая выполняет роль грозового облака, расположенную над металлическим стержнем при работе без молниеприемника или над активным молниеприемником, соединенным с высоковольтным выводом катушки Тесла, от другого источника питания подается высокое напряжение положительной полярности по отношению к земле. По достижении на накопительной емкости, а следовательно, и на разряднике, напряжения пробоя, импульс тока проходит через катушку накачки трансформатора Тесла. Высоковольтная катушка Тесла возбуждается в режиме ударного возбуждения и на своем высоковольтном выводе генерирует высокий потенциал, который формирует лидерный стример на стержне или молниеприемнике в направлении проводящей сферы. Если высоковольтный вывод трансформатора Тесла соеди-

нен с активным молниеприемником, то высоковольтный потенциал катушки Тесла инициирует срабатывание молниеприемника. При этом к энергии трансформатора Тесла, переданной ему накопительным конденсатором C , добавляется энергия, накопленная в статическом режиме в активном молниеприемнике, что способствует формированию лидирующего стримера и созданию проводящего канала от приемного электрода (стержня или молниеприемника) к заряженной проводящей сфере, имитирующей грозное облако. Длина искры в этом режиме достигала 1 метра и более. С катушки связи, размещенной в области пучности тока катушки Тесла, снималось напряжение по форме, представляющее собой дуг экспоненциально затухающих синусоидальных колебаний. Частота колебаний лежала в области (250–350) кГц, длительность цуга составила от 200 до 500 мксек. Оценка энергии, запасенной в одном цуге, показала значение около 0,1 Дж. Частота повторения цугов доводилась до 50 Гц.

Выводы

В рамках выполненной работы сделан анализ методов формирования проводящих каналов, необходимых для использования атмосферного электричества. Дано обоснование возможности применения различных типов активных молниеприемников (АМП) в качестве приемников атмосферного электричества, работа которых основана на использовании принципа стримерной эмиссии. При возрастании электрической напряженности активизируется электрическая схема блока головки, которая накапливает энергию, генерирует высокочастотные импульсы и создает на штыре головки коронный разряд, который формирует восходящую ветвь проводящего канала для сбора атмосферного электричества.

Активный молниеприемник расширяет зону сбора атмосферного электричества, увеличивает длину проводящего канала, не подвергается атмосферным воздействиям, прост в монтаже и обслуживании. При этом не требуется

применение каких-либо источников питания схемы, значительно снижается расход металла, упрощается конструкция и повышается надежность системы.

Целесообразным является формирование восходящего стримера и проводящего канала, не сопровождающихся молниевым разрядом, и создание “безмолниевое” негрозового режима работы установок для сбора стекающих зарядов атмосферного электричества, то есть сбора энергии электрического поля атмосферы земли. Для обнаружения и оценки количества объемного атмосферного электричества целесообразно проведение мониторинга предгрозовой обстановки с использованием портативных программно-технических комплексов.

Разработана и изготовлена действующая лабораторная установка для сбора и преобразования энергии электрического поля. Лабораторная установка состоит из металлической сферической электрической емкости, активного молниеприемника АМП, конической однослойной катушки, соединенной с конденсатором и через разрядник с землей.

Проведены предварительные исследования и испытания изготовленных образцов установок, которые показали их работоспособность и возможность проведения дальнейшей работы по использованию атмосферного электричества.

Литература

1. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеоздат, 1978. С. 223.
2. Вестник КРАУНЦ (Камчатская региональная ассоциация “Учебно-научный центр” науки о земле). 2007. №2. Выпуск №10. С. 182-184.
3. Российская конференция по атмосферному электричеству. Сборник трудов. Нижний Новгород, 2007. - 300 с.
4. Атмосфера: Справочник (справочные данные, модели). Ленинград: Гидрометеоздат, 1991.
5. Корявин А.Р., Волкова О.В. К вопросу об эффективности действия активных молниеотводов // Электротехника. 2004. №2. С. 2-6.

РЕЗОНАНСНЫЕ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Академик Россельхозакадемии Д.С. Стребков, канд. техн. наук Л.Ю. Юферев, канд. техн. наук. О.А. Роцин, асп. А.А. Михалев (ГНУ ВИЭСХ)

Разработана экономичная пожаробезопасная резонансная система электроосвещения с использованием сверхярких диодов и люминесцентных ламп. Однопроводная резонансная высокочастотная электрическая система используется в качестве источника энергии. Однопроводниковая кабельная линия с одной тонкой жилой позволяет сократить расход цветных металлов, увеличить КПД электропередачи, уменьшить капитальные затраты на осветительные сети, исключить возможность короткого замыкания в линиях и хищение кабелей и проводов. Резонансная система питания может найти применение для электрического освещения помещений, зданий, улиц, площадей, парков, уличной рекламы и регулируемых перекрестков. Разработано электрооборудование с резонансной системой питания по однопроводниковой линии на повышенной частоте светильников на светодиодах и с люминесцентными лампами.

Ключевые слова: резонансная система, однопроводниковая резонансная линия электропередачи, светодиодная лампа.

С 1992 года в ВИЭСХе ведутся разработки по изучению и созданию системы передачи электрической энергии по однопроводниковой резонансной кабельной и воздушной линиям на повышенной частоте.

Резонансная однопроводная система светодиодного освещения с питанием от солнечной батареи может применяться при строительстве новых и реконструкции действующих линий уличного освещения.

Освещение крупных зданий и сооружений, а также освещение улиц, парков, площадей и др. связано с проблемой создания низковольтных линий электропередачи большой протяженности с малыми потерями электроэнергии.

В настоящее время системы передачи электроэнергии на большое расстояние используют в подавляющем большинстве трехфазные цепи. Трехфазные цепи электропередачи в свою очередь состоят из повышающей трансформаторной подстанции, трехфазной линии электропередачи и понижающей трансформаторной подстанции. Это особенно невыгодно

The economic fire-safety resonant system of an electric lighting with use of bright diodes is considered. Single-wire resonant high-frequency electrical power system is used as power source for lighting. Use of a wire or a cable with one thin vein allows to reduce the charge of nonferrous metals, to reduce capital expenses for lighting networks, to exclude the short circuit in lines and plunder of cables and wires. The resonant power supply system can find application for energy saving fire-safety illumination of inhabited and industrial buildings, and also for illumination of rural settlements, a part of roads and streets.

In the near future to illumination of poultry-farming premises begin to apply fixtures on the basis of light-emitting diodes, in connection with their raised power efficiency and durability. For a food of these fixtures it is possible to use resonant system of power supply. It simplifies realization of adjustment of illumination and reduces the nonferrous metal expense in wires.

Keywords: resonant system, Single-wire resonant power system, Bright diodes lamp.

при передаче небольшой мощности. Одним из способов уменьшения стоимости линий электропередачи является резонансная система электропередачи.

Стандартная линия уличного освещения нуждается в установке промежуточных подстанций или подключении к фидерам через каждые 2 км и питается от четырехжильного провода. Применение резонансной системы электроснабжения позволяет передавать электроэнергию по однопроводной тонкой кабельной линии с питанием от одного передающего блока (фидера) на любую длину улицы.

Известные решения по созданию автономных уличных светильников с солнечными батареями требуют регулярного обслуживания и замены аккумуляторных батарей. Это, в свою очередь, сильно повышает стоимость эксплуатации системы уличного освещения. Поэтому предлагается создать систему уличного освещения с одной крупной солнечной электрогенерирующей станцией и единой системой электропередачи ко всем светильникам. При этом в обслу-

живании будет нуждаться только одна солнечная станция.

В связи с тем, что солнечные электрогенерирующие станции вырабатывают напряжение постоянного тока, электроэнергия, накапливаемая в аккумуляторных батареях, нуждается в дальнейшем преобразовании по частоте и напряжению. Из-за того что большинство уличных светильников работают от напряжения 220 В, передача электроэнергии на большое расстояние будет осуществляться со значительными потерями. Для уменьшения потерь при преобразовании и передаче электроэнергии предлагается применить резонансную систему передачи электроэнергии.

Впервые резонансная система передачи электроэнергии была предложена Н. Тесла. Разработанная нами резонансная система уличного освещения состоит из резонансного передающего блока, кабельной однопроводной линии, комплекта уличных светильников на светодиодах и обратных преобразователей. На рис. 1 представлена схема, которая иллюстрирует принцип работы разработанной системы уличного освещения, ее внешний вид – на рис. 3.

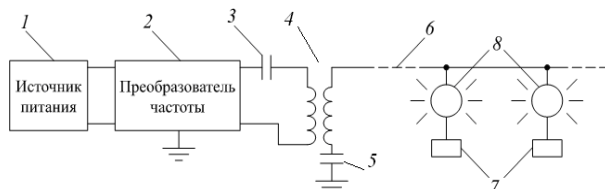


Рис. 1. Схема резонансной системы уличного освещения

Система освещения работает следующим образом: напряжение сети или любого другого источника электрической энергии 1 с напряжением 2...600, подводимое к преобразователю частоты 2, преобразуется в напряжение высокой частоты и подается на резонансный трансформатор Тесла 4, с высоковольтного вывода которого снимается высоковольтное, высокочастотное напряжение и подается на резонансную линию электропередачи 6. Второй вывод трансформатора через конденсатор 5 соединяется с землей. Светильники 8 подсоединены параллельно, одним выводом к высоковольтной линии, второй вывод каждого светильника соединен с естественной емкостью 7 в виде изолированного проводящего тела. Фонари состоят из

обратного преобразователя, лампы и собственной изолированной емкости.

Разработанная система передачи электроэнергии позволяет значительно сократить время строительства систем освещения, в несколько раз снизить расход цветных металлов и редкоземельных элементов, принципиально упростить обслуживание системы освещения, исключить утилизацию отработанных ламп и повысить надежность системы освещения в целом, что делает данную технологию социально значимой и повышает общую безопасность объектов с присутствием большого количества людей. Применение проводов с небольшим содержанием цветного металла резко сократит их хищение.



Рис. 2. Стационарный концентратор с солнечной батареей для автономного питания резонансной системы освещения



Рис. 3. Резонансная система уличного освещения

Исключаются короткие замыкания и опасность возникновения пожаров. В случае неисправности линии электропередачи или короткого замыкания в нагрузке система передачи электроэнергии выходит из резонанса и потребление электроэнергии от первичного источника питания сокращается в десятки раз.

Исключаются обрывы проводов от различных природных катаклизмов – ураганов, оледенений проводов, так как реализуется подземная прокладка кабелей. По этой же причине практически исключается отвод земель под линии электропередачи и обеспечивается их полная экологическая безопасность.

Минимизируется дефицит используемых материалов. Резонансная технология передачи электроэнергии не избирательна к проводящему материалу – в качестве проводника тока может служить и медный, и алюминиевый, и стальной провод, а также неметаллические проводники типа оптического световода с проводящим покрытием из углепластиковых покрытий.

Резонансная система электроосвещения была реализована в нескольких проектах по оснащению птицефабрик, а также по уличному освещению. По теме работы было защищено две кандидатские диссертации, опубликовано более 30 статей, получено 6 патентов, 7 медалей (серебряная ВВЦ 1999 г., золотая ВВЦ 2005 г., серебряная ВВЦ 2005 г., две медали выставки «Изделия и технологии двойного назначения» 2007 г., золотая выставки «День российского поля – 2007», золотая выставки «Золотая осень - 2010») и один диплом за лучшую завершённую разработку 2009 года.

На основе апробации данной системы в ряде птицефабрик установлено, что затраты на электроэнергию за 10 лет снизятся на 1,6 млн. рублей в каждом цехе для содержания птицы.

В настоящее время птичники при клеточном содержании кур освещают облучательными установками с лампами накаливания, которые позволяют плавно регулировать уровень освещения, имитируя закат и восход. Однако эти лампы имеют низкие светоотдачу (до 10 лм/Вт) и срок службы (до 1000 ч), из-за чего необходима полная замена ламп через каждые 3 мес. При клеточном содержании птицы осветительные установки, как правило, располагают напротив верхнего яруса клеток, из-за этого освещённость верхнего яруса в 5 раз выше, чем нижнего.

При напольном содержании птицы, как правило, для освещения применяют ртутные лампы низкого давления ЛД-40, срок их службы достигает 10 тыс. ч. Как правило, такие лампы применяют с индуктивной пуско-регулирующей аппаратурой. Из-за значительного потребляемо-

го тока в системах освещения с такими устройствами необходимо использовать провода с большой площадью сечения и равномерное распределение устройств по трем фазам питающей сети. Такие системы не позволяют плавно регулировать уровень освещённости, из-за чего при включении ламп у птицы возникает стрессовое состояние. Новейшие разработки систем включения ламп низкого давления с возможностью плавного регулирования уровня освещённости на большинстве птицефабрик применяют редко из-за их высокой стоимости и сложности в обслуживании.

Появление и развитие светодиодов (СД) в оптоэлектронной промышленности, повышение их световой отдачи до 140 лм/Вт при малом энергопотреблении (единицы Вт) позволяет предполагать, что в ближайшие 10 лет СД могут стать одними из основных источников освещения в птицеводческих и животноводческих помещениях. Светодиодные лампы позволяют плавно регулировать уровень освещённости, имеют улучшенную цветопередачу, не зависящую от уровня освещённости, и большой срок службы (до 100 тыс. ч), при котором период замены ламп может составлять около 200 мес.

Поскольку длина цеха для содержания птицы составляет около 100 м, системы освещения на светодиодах требуют установки трансформаторов питания через каждые 5...15 м или прокладки проводов большого сечения, или установки источника питания в каждый светильник. В связи с этим возникает необходимость поиска другого решения с возможностью плавного регулирования освещения. Одним из вариантов такого решения может стать резонансная система питания точечных светодиодных светильников [1].

Для электрического освещения животноводческих и птицеводческих помещений с напольным содержанием в ВИЭСХе разработано электрооборудование на основе светодиодных светильников [2]. В состав этого оборудования входят светодиодные светильники мощностью 4,5...8 Вт, резонансный преобразователь напряжения мощностью 1,5 кВт и блок управления с плавным включением и выключением светильников по заданной программе. Уровень освещённости регулируется изменением частоты. Светильники собраны в герметичных пластико-

вых корпусах в виде линеек на основе светодиодов CREE CLP6 [3]. Преобразователь напряжения с резонансным трансформатором, блок управления и автоматические выключатели устанавливаются в щите. Для электрической безопасности линии электропередачи между преобразователем напряжения и светильниками изготавливаются на основе экранированного кабеля РК.



Рис. 4. Резонансная система освещения цеха для содержания птицы (птицефабрика «Птичное», 2009 г.)

В ходе апробации данной системы в птичнике размером 18×98 м ГУП ППЗ «Птичное» Россельхозакадемии установлено следующее (рис. 4). Клетки размером 1×2 м при 2-х ярусном расположении освещаются двумя лампами накаливания с разных сторон мощностью по 60 Вт (итого 120 Вт). Таким образом, для освещения одной клетки расходуется 40 Вт, при этом 30 % ламп заменяют ежемесячно. В то же время на такую же клетку достаточно двух светодиодных ламп мощностью по 1 Вт и еще одну лампу мощностью 1 Вт для освещения прохода обслуживающего персонала. Таким образом, для освещения одной клетки при 2-х ярусной конструкции расходуется 2,5 Вт. Предлагаемая система обеспечивает равномерное освещение внутри клетки независимо от яруса ее расположения. Резонансная система электрического освещения на основе светодиодных ламп позволяет изготавливать устройства регулируемого освещения внутри любой клетки в пределах 2–20 лк при неизменном спектре излучения (в то время как при изменении яркости ламп накаливания спектр излучения меняется). Срок службы

светодиодных ламп составляет около 50 тыс. ч (при уменьшении светового потока на 20 %).

Потребление электроэнергии новой системой освещения в 8 раз меньше. Стоимость ее без монтажных работ составляет примерно 140 тыс. руб. При 8-ми часовом световом дне за 10 лет эксплуатации расходы на электроэнергию с каждого цеха для выращивания птицы уменьшаются на 1067 тыс. руб., на покупку неисправных ламп – на 87 тыс. руб., на замену ламп – 231 тыс. руб. За 10 лет эксплуатации экономится 175 тыс. кВт·ч электроэнергии, экономия денежных средств составит 1385 тыс. руб. (расчеты выполнены при годовой инфляции 15 %).

Расчеты экономической эффективности показывают, что, несмотря на высокие первоначальные затраты на установку нового оборудования, срок его окупаемости при 8-ми часовом световом дне составляет 1,2 года (при 12-ти часовом световом дне срок окупаемости равен 1 году). Кроме того, возможно повышение продуктивности птицы благодаря улучшению среды ее обитания.

Апробация данной системы освещения на птицефабрике ФГУП ППЗ «Кучинский» (рис. 5) показала, что в цехе с напольным содержанием птицы размером 8×78 м для обеспечения требуемой освещенности взрослой птицы необходимо установить 24 светодиодных светильника мощностью по 4,5 Вт со световым потоком 500 лм. Таким образом, потребляемая мощность рабочей системы освещения составит лишь 110 Вт.



Рис. 5. Резонансная система освещения цеха для содержания птицы (птицефабрика «Кучинская», 2010 г.)

Для светодиодной системы освещения разработан универсальный микропроцессорный блок управления. В его функции входит включение-выключение системы освещения в заданное время дня в течение года, плавное включение и выключение в течение 90 сек, при этом уровень освещенности плавно меняется в 16 раз, выбор 5 уровней максимальной освещенности от 20% до 100%. При этом программирование осуществляется как с клавиатуры блока управления, так и с подключаемого к нему компьютера. Все режимы работы и текущее время отображаются на графическом дисплее.

Регулировка уровня освещенности осуществляется сдвигом частоты резонансного преобразователя относительно резонансной частоты передающего трансформатора Тесла.

К преимуществам резонансных систем светодиодного освещения можно отнести следующее:

- передача электрической энергии на большие расстояния без применения промежуточных трансформаторов;
- снижение капитальных затрат на электроснабжение;
- уменьшение потерь в линии при передаче электроэнергии;
- принципиальное отсутствие коротких замыканий в проводах;
- экономия цветных металлов;
- улучшенная цветопередача;
- экономия электроэнергии;
- высокий срок службы – до 100 тыс. ч;
- возможность плавного регулирования яркости.

Выводы

Результаты производственной апробации резонансной системы освещения на основе точечных светодиодных светильников с целью замены действующих линий освещения свидетельствуют о высокой их эффективности и экономичности. Нормы освещенности внутри клеток обеспечиваются при монтаже двух светодиодных ламп мощностью по 1 Вт снаружи клетки с разных сторон по диагонали. Замена ламп низкого давления на разработанные в ВИЭСХе светодиодные светильники позволяет уменьшить потребление электроэнергии в 4 раза.

Однопроводную резонансная система освещения может быть использована для замены существующей системы освещения.

Литература

1. Патент РФ № 2241176. Солнечный светильник / *Стребков Д.С., Некрасов А.И., Лямцов А.К., Юферев Л.Ю.* // БИ. 2004. № 33.
2. *Юферев Л.Ю., Стребков Д.С., Роцин О.А.* Экспериментальные модели резонансных систем передачи электрической энергии. / Под общей ред. Юферева Л.Ю.– М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. - 208 с.
3. *Стребков Д.С., Юферев Л.Ю., Роцин О.А.* Однопроводниковые системы электрического снабжения (освещения) // Специализированная выставка «Изделия и технологии двойного назначения. Диверсификация АПК». Сборник научных трудов и инженерных разработок. М.: 2008. С. 358 – 362.

АНАЛИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РОССИИ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Канд. техн. наук С.Н. Трушевский (ГНУ ВИЭСХ)

Произведен анализ низкотемпературных источников теплоты для тепловых насосов. Солнечная энергия и энергия воздуха малоэффективны в климатических условиях средней полосы России. Охлаждение грунтовых вод и грунта приводит к отчуждению земли для растениеводства, нарушает экологическое равновесие.

Ключевые слова: тепловой насос, солнечная энергия, энергия воздуха, грунт, грунтовые воды, термоскважина, релаксация, отчуждение земли.

Теория тепловых насосов (ТН) достаточно хорошо изучена, так как принцип действия известен ещё с 1852 г. (Уильям Томпсон), а практическое применение также достаточное. Впервые в Европе мощный ТН для отопления здания был применён в Цюрихе в 1938 г. [1]. В настоящее время в мире насчитывается большое количество ТН и теплонасосных установок, однако их применение в РФ связано с определёнными сложностями, вызванными как климатическими условиями, так и свойствами низкотемпературных источников теплоты.

К низкотемпературным источникам теплоты (НТИТ) для тепловых насосов относятся отработанная теплота и энергия окружающей среды. Источниками энергии из окружающего пространства служат солнечная энергия и её производные в виде воздуха, грунтовых и поверхностных вод, а также аккумулированная тысячелетиями теплота, исходящая из недр Земли. Частично НТИТ рассмотрены в [2]. Поговорим об особенностях некоторых НТИТ, характерных для территории Средней полосы России.

1. Солнечная энергия

Наиболее распространёнными устройствами использования солнечной энергии для её превращения в тепловую являются концентрирующие и непосредственно поглощающие солнечный поток (солнечные коллекторы и абсорберы, или панели).

1.1. Сконцентрированная солнечная энергия

При концентрации солнечного излучения получают высокие плотности теплового

The analysis of use different natural energy sources for heat pumps in a condition of Russia is analytically investigated. Solar- and air energy are not effective. Cooling subsoil waters and soil leads to transfer of territory for plant growing and it breaks ecological equilibrium.

Keywords: heat pump, solar- and air energy, drilling, ground, soil, subsoil waters, relaxation, transfer of ground.

потока и, соответственно, температуры нагреваемого тела, чего не нужно для теплового насоса. Однако если сконцентрированный поток падает на фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), КПД которого зависит от температуры, то есть искушение его охлаждать, получать больше электроэнергии, а на выходе ТН – нагретый теплоноситель. Рассмотрим такую систему тепло- и электроснабжения.

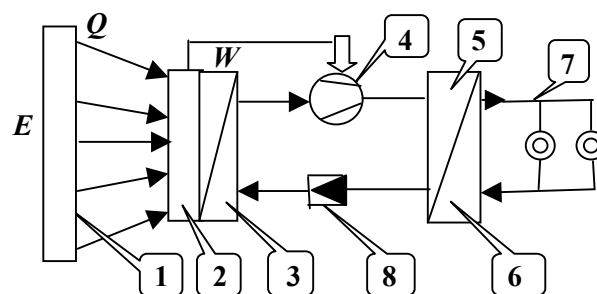


Рис. 1. Схема системы тепло- и электроснабжения с концентратором, ФЭП и тепловым насосом:
1 - концентратор солнечного излучения; 2 - ФЭП;
3 - испаритель; 4 - компрессор; 5 - конденсатор; 6 - теплообменник; 7 - нагрузка; 8 - регулирующий вентиль

На рис. 1 изображена схема такой системы, в которой испаритель 3 теплового насоса отбирает теплоту («холодный» источник) фотоэлектрического преобразователя 2, облучаемого лучистым потоком Q от концентратора 1 солнечного излучения. Электроэнергия W от ФЭП поступает на привод компрессора 4, где происходит повышение давления и температуры теплоносителя, который затем поступает в конденсатор 5 и его

теплота, включающая W , через теплообменник 6 передаётся на тепловую нагрузку 7. Охлаждённый теплоноситель через регулирующий вентиль (детандер) 8 в жидком виде вновь поступает в испаритель 3.

КПД ФЭП зависит от температуры [3]:

$$\eta = \eta_0 [1 - k(T_f - T_0)], \quad (1)$$

где η_0 - КПД ФЭП при стандартной температуре $T_0 = 298$ К, T_f - температура ФЭП, К; k - температурный коэффициент ($k < 0,003$).

Коэффициент преобразования теплового насоса обратного цикла Карно определяется как [1]

$$\xi = T_n / (T_n - T_f), \quad (2)$$

где T_n - температура нагрева теплоносителя для потребителя (верхняя точка цикла Карно), К, а для реального процесса

$$\xi_p = \nu T_n / (T_n - T_f), \quad (3)$$

где ν - степень термодинамического совершенства реального процесса.

Коэффициент использования первичной энергии системой ФЭП+ТН, начиная с приходящего от концентратора лучистого потока Q к ФЭП до конденсатора, определяется как произведение (1) на (2)

$$\Psi = \eta^* \xi_p. \quad (4)$$

Результаты расчётов по (1), (2) и (4) коэффициентов полезного действия ФЭП, преобразования теплового насоса и использования первичной энергии системой для широкого диапазона температур ФЭП приведены в табл. 1. Для расчётов приняты следующие значения параметров: $\eta_0 = 0,15$, $k = 0,0025$, $T_f = 0 \div 322$ К. Температура теплоносителя у потребителя принята, в качестве примера, равной $T_n = 323$ К (50 °С), как наиболее распространённая в низкотемпературных отопительных системах с использованием ТН. Как видно из таблицы, в приемлемом диапазоне рабочих температур ФЭП от 273 до 313 К значение коэффициента использования первичной энергии больше единицы (1,04 – 4,63). Однако с учётом того, что система генерирует энергию, поступающую только от ФЭП, в отличие от поступления энергии из неограниченной окружающей среды, коэффициент Ψ не может превышать единицу. Отметим также, что с уменьшением разности температур $T_n - T_f$ существенно возрастает ξ , и по данным [1] разность не должна превышать 40–50 °С.

Таблица 1. Зависимость КПД ФЭП η , преобразования теплового насоса ξ и использования первичной энергии системой Ψ , а также нагрева $T_n - T_f$ от температуры ФЭП T_f при температуре нагрева $T_n = 323$ К

T_f	η	ξ	Ψ	$T_n - T_f$
0	0,284	1	0,28	323
100	0,239	1,45	0,35	223
200	0,194	2,63	0,51	123
250	0,172	4,42	0,76	73
273	0,161	6,46	1,04	50
293	0,152	10,77	1,64	30
298	0,15	12,92	1,94	25
310	0,145	24,85	3,59	13
313	0,143	32,3	4,63	10
320	0,14	107,67	15,08	3
322	0,139	323	44,96	1

Оценим фактическое значение Ψ в реальной системе. Предположим, что на концентратор 1 (рис. 1) с площадью 1 м^2 поступает суммарная солнечная радиация $E = 1000 \text{ Вт/м}^2$, тогда на ФЭП поступит концентрированный лучистый поток $Q \approx 750 \text{ Вт}$, так как не используется диффузная радиация и имеются оптические потери концентратора (условно КПД концентратора $\eta_k = 0,75$). На ФЭП 15%, т.е. $W = 112,5 \text{ Вт}$, превращается в электроэнергию, а не менее 25% (187,5 Вт) – в тепловые потери ФЭП как приёмника концентрированной лучистой энергии, т.е. тепловой КПД ФЭП $\eta_{\text{ФЭП}} = 0,6$. КПД компрессора примем: электрический $\eta_{\text{эл}} = 0,95$, индикаторный $\eta_{\text{инд}} = 0,5$. Следовательно, через теплообменник конденсатора в сеть потребителя поступит тепловой поток

$$E_{\text{потр}} = E \times \eta_k \times \eta_{\text{ФЭП}} \times \eta_{\text{инд}} + \eta_{\text{эл}} W \approx 332 \text{ Вт},$$

т.е. КПД реальной системы составит 0,33, что ниже КПД солнечного коллектора. Как видно из полученных численных значений, мощность ФЭП приблизительно равна мощности, необходимой для привода компрессора.

Вывод. Несостоятельность такой системы очевидна.

1.2. Несконцентрированная солнечная энергия

Здесь в качестве приёмников солнечной радиации для ТН рассматриваются солнечные коллекторы и абсорберы. Применение солнечных коллекторов в зимний и переходный периоды на территории РФ крайне ограничено незначительной плотностью солнечной радиации, облачностью, низкими температурами окружающей среды, снежными покровами. Солнечные абсорберы не имеют прозрачной изоляции, поэтому при от-

сутствии или низкой солнечной радиации они могут работать как воздушные теплообменники с естественной циркуляцией воздуха (конвективный теплообмен при отсутствии снежного покрова).

Вывод. Эффективность таких систем крайне низкая из-за незначительного коэффициента теплоотдачи (средняя скорость ветра 3–4 м/с) и неизбежного обледенения абсорбентов.

2. Воздух в качестве НТИТ

Для применения воздуха окружающей среды в качестве НТИТ в состав периферийного оборудования теплонасосных установок необходимо включать воздушные теплообменники с вентиляторами. Воздух подаётся в теплообменник испарителя ТН, отдаёт теплоту и, охлаждённый, возвращается в окружающую среду. Что при этом происходит в штилевую погоду?

Охлаждённый воздух как более плотный осажается вокруг отапливаемого здания. Для поддержания в помещении заданной температуры потребуется увеличить термическое сопротивление наружных ограждений здания, учесть снижение температуры инфильтрационного воздуха здания. В стационарном режиме подведённая в здание теплота равна теряемой через ограждения. Температура отходящего воздуха будет выше температуры среды и как менее плотный, чем нижние слои воздуха, он будет подниматься вверх. Воздушные потоки (ветер), неразрывность потоков и прочие факторы способствуют перемешиванию отработанного воздуха с окружающим, но это мало что меняет. В больших массивах застройки будет изменение микроклимата, а прокачанный через вентиляторы ТН воздух изменит свои свойства не в лучшую сторону, плюс шум оборудования (экология). Основным же возражением против использования в отопительный период воздуха в качестве НТИТ в РФ будет, как и следует из инструкций к «воздушным» ТН, требование работы при положительных (>2–3 °С) температурах среды.

Возвращаясь к климатическим условиям, отметим, что для эффективной работы ТН перепад температур между НТИТ и подающей линией (50 °С) должен быть 10–15 °С, а для условий Средней полосы России он составляет 53–71 °С и более, при максимально допустимом 45–50 °С [1], т.е. коэффициент использования первичной энергии будет незначительным (при $\nu=0,5$, КПД электростанции 0,35 и

расчётной температуре воздуха от –3 до –21 °С $\Psi=1,1-0,68$).

Вывод. Применение «воздушных» ТН в условиях, аналогичных Средней полосе РФ, малоэффективно.

3. Грунтовые воды

Наиболее предпочтительным кажется использование теплоты природных водных ресурсов, в частности, грунтовых вод, ввиду доступности и кажущейся простоты схемы низкотемпературного (до 50 °С) теплоснабжения, состоящей в подаче воды и её возврате в водоём через соответствующие скважины. В качестве примера рассмотрим систему теплоснабжения одноэтажного отдельно стоящего жилого дома с отапливаемой площадью $F = 100 \text{ м}^2$, в котором проживает 5 чел., расположенного в Московской области. В соответствии с нормативами и [2], годовая тепловая нагрузка, включающая отопление и горячее водоснабжение, составляет 28 МВт·ч. Если 75% этой нагрузки осуществить за счёт НТИТ, то $Q_{\text{НТИТ}} = 21 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ и требуемый объём перекачиваемой воды $\approx 2590 \text{ м}^3/\text{год}$, что приведёт к дополнительному расходу электроэнергии.

Если вода непроточная, то не исключено перемешивание охлаждённой и грунтовой вод, т.е. деградация источника теплоты вплоть до полного истощения. Если дом не одиночный, то потребуется такое расположение зданий, чтобы не «обирать» соседей. При проточной воде также следует учитывать расположение зданий. Обязательным условием является размещение скважин, исключающее замораживание воды, т.е. преимущественно внутри здания.

С учётом расхода электроэнергии на водоподъём коэффициент преобразования теплонасосной установки составляет $\varepsilon = 1,87$, а коэффициент использования первичной энергии $\Psi = \eta \times \varepsilon = 0,66$, где η – КПД электростанции ($\eta = 0,35$). Такое значение коэффициента Ψ сравнимо со степенью использования первичной энергии в котлоагрегатах с угольной топкой.

Выводы. Использование теплоты грунтовых вод весьма малоэффективно, проблематично и на предпроектной стадии требует тщательной гидрологической и экологической проработки для каждого конкретного объекта, включая влияние на вышележащий грунт. Аналогичные проблемы возникнут при использовании воды рек и открытых водоёмов.

4. Грунт в качестве НТИТ

Грунт поверхностных (глубиной до 400 м) слоёв земли рассматривается энергетиками как

низкопотенциальный источник энергии для тепловых насосов. В частности, в Москве и Ярославской обл. в конце 90-х – начале 2000-х годов введено в эксплуатацию несколько объектов с грунтовыми термоскважинами для тепловых насосов системы теплоснабжения зданий. Экспериментальные исследования проводились в отопительный период только в первый [4–7] или первые (экопарк «Фили» [8]) годы эксплуатации. Последние публикации по этим объектам относятся к 2002 г. Вышедшая в 2006 г. монография [8] практически не содержит новых экспериментальных данных.

Таблица 2. Тепловые нагрузки жилого дома

Показатели, МВт·ч	Месяцы года											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Отопительная нагрузка	2,3	2	1,8							1	1,5	2
Нагрузка горячего водоснабжения	0,85	0,77	0,85	0,82	0,85	0,82	0,85	0,85	0,82	0,85	0,82	0,85
Тепловая нагрузка здания	3,2	2,8	2,7	1,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	1,9	2,3	2,9

Термоскважина представляет собой теплообменник типа «труба в трубе», погруженный вертикально в грунт с геотермическим градиентом $3^\circ\text{C}/(100\text{ м})$ и нейтральной глубиной 10 м. Циркулирующий в теплообменнике теплоноситель отбирает тепло из грунта и подаёт его в теплообменник испарителя теплового насоса. Охлаждённый теплоноситель вновь поступает в скважину. Мы не будем рассчитывать весь цикл теплонасосной установки, для этого есть подробные рекомендации [11], а ограничимся только процессами теплопереноса из грунта в теплообменник термоскважины. На рис. 2 изображена расчётная схема термоскважины, где d_0 - диаметр внешней трубы теплообменника, d_1 - диаметр слоя грунта после первого месяца охлаждения (покрытия месячной нагрузки), d_2 - после второго месяца и т.д., вплоть до 12-го месяца – d_{12} . Следующий за первым второй год эксплуатации начинается с диаметра предыдущего года d_{12} , диаметр охлаждённого слоя первого месяца второго года обозначается d_{13} и т.д., диаметр после τ лет эксплуатации $d_{12+\tau}$.

Расчёты проводились в предположении квазистационарного режима в течение каждого месяца. Массу каждого слоя определяли по формуле

$$m=Q/c_p (t_r - t_x), \quad (5)$$

где Q - месячная тепловая нагрузка из табл. 2, c_p - удельная теплоёмкость грунта; t_r и t_x -

В связи с тем, что с каждым годом площадь земли над охлаждённым массивом грунта будет увеличиваться и, соответственно, земля будет охлаждаться, возникает вопрос о масштабах этого процесса и его влиянии на окружающую среду, в частности, на растениеводство. Предлагаем рассмотреть эту проблему («проблему» потому, что предлагается массовое внедрение [8]) на примере покрытия тепловой нагрузки системы теплоснабжения того же дома, рассмотренного в разделе 3. Тепловые нагрузки приняты по [10] и приведены в табл. 2.

средние температуры слоя на границах с неохлаждённым и охлаждённым слоями грунта. Тепловой поток от охлаждаемого слоя к теплообменнику определим как

$$q = \frac{t_2 - t_0}{R}, \quad (6)$$

где t_0 - средняя температура на внешней оболочке теплообменника; R - термическое сопротивление от неохлаждённого слоя до теплообменника, например от d_{13} до d_0 :

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda h} \ln \frac{d_i}{d_0}, \quad (7)$$

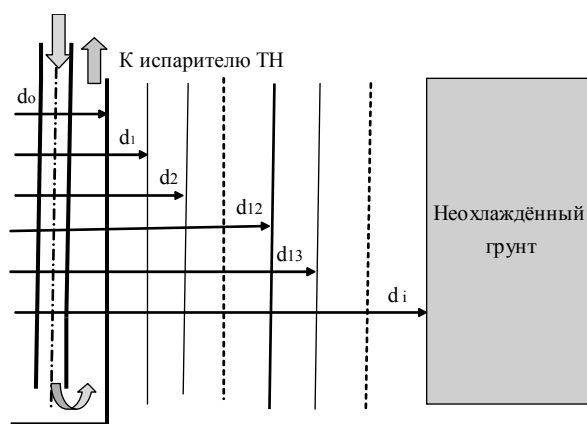


Рис. 2. Расчётная схема термоскважины. Тепловой поток направлен в противоположном стрелкам направлении от грунта в скважину (пояснения в тексте)

где d_i - диаметры d_1, d_2, \dots, d_{12t} ; h - высота полого цилиндра (очередного слоя грунта). В качестве грунта рассматривалась гомогенная глина с термическими коэффициентами: $c_p=0,838$ кДж/(кг °С), $\gamma=2000$ кг/м³, $\lambda = 0,928$ Вт/(м К) [12]; температура на входе в испаритель $t_{вх}=8$ °С, на выходе $t_{вых}=1$ °С. **Масса охлаждаемого за год грунта составляет $\approx 13\ 000$ тонн.**

Расчёты начинались с октября, т.е. с начала отопительного сезона, в предположении полностью естественно прогретого грунта (первый год эксплуатации). В качестве расчётной принималась средняя температура t_c неохлаждённого грунта, определяемая как средняя по высоте скважины с учётом геотермического градиента 3 °С/(100 м) и температуры нейтрального пласта земли $t_n = +8$ °С. Температура внешней оболочки теплообменника t_x принималась как средняя между температурой $t_{вых}$ на выходе теплообменника испарителя (низ внутренней трубы теплообменника термоскважины) и температурой нейтрального пласта земли t_n . Расчёты и графики производились с помощью компьютерной программы Excel.

Зависимость получаемой теплообменником мощности из грунта от глубины скважины для значений $d_0=0,5$ м, $t_x=4$, $t_{вх}=8$ и $t_{вых}=1$ °С показана на рис. 3.

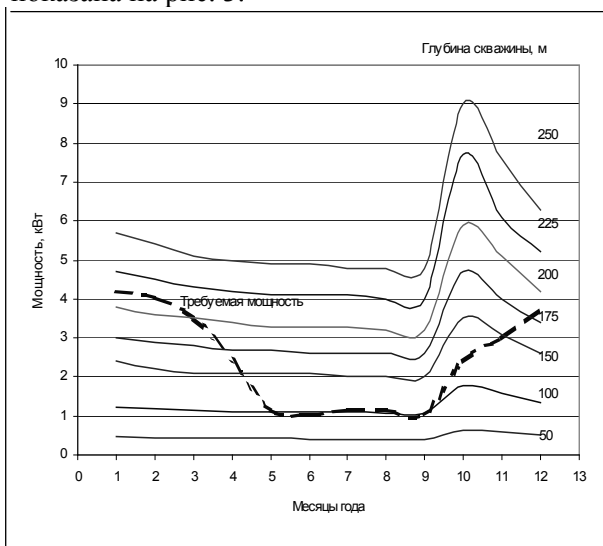


Рис. 3. Зависимость мощности от глубины скважины в 1-й год эксплуатации

Полное покрытие тепловой нагрузки происходит при глубине скважины $h \approx 225$ м. Однако на 2-й и каждые последующие годы эксплуатации отопительный период будет начинаться при всё более толстом охлаждённом слое грунта, т.е. при всё увеличивающемся

термическом сопротивлении R . На рис. 4 показано уменьшение мощности скважины глубиной 225 м в течение 40 лет эксплуатации. Как следует из рисунка, на второй год не обеспечивается тепловая нагрузка в отопительный период (октябрь - апрель). На 4 – 5-й годы мощность скважины устанавливается на отметке $\approx 2,5$ кВт и плавно уменьшается до 2,3 кВт за 40 лет эксплуатации.

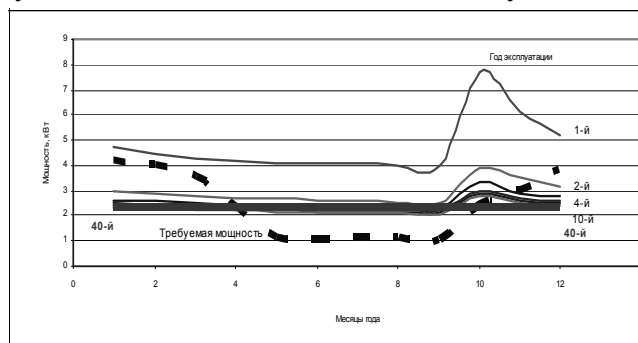


Рис. 4. Зависимость мощности скважины 225 м от времени эксплуатации

При использовании тепловых насосов рекомендуется применение догревателей, но прежде нужно оценить, какой ценой досталась «бесплатная» теплота грунта. Приведём расход первичной энергии на изготовление трубы 500x480 мм с длиной 225 м. Масса такой трубы 30 тонн, а удельный расход первичной энергии на прокат чёрных металлов [1] 10,61 МВт·ч/т, т.е. первичные энергозатраты составят 318 МВт·ч, а выработка энергии термоскважиной за 10 лет равна 281 МВт·ч, что составляет только 88% от затрат. Если учесть остальные затраты энергии (бурение и обустройство скважины, сварка труб, изготовление теплообменника, теплового насоса, фильтра, циркуляционного насоса, системы автоматики, монтажные работы, транспорт и т.д.), то можно воспользоваться удельным расходом первичной энергии для переработки исходных материалов в изделие [1] в машиностроительной промышленности: $67,9$ МВт·ч/т $\times 30$ т + 318 МВт·ч = 2355 МВт·ч. За 40 лет выработка энергии составляет 970 МВт·ч. Тогда при средней генерации 24 МВт·ч/год срок окупаемости составит 98 лет. Эксергетический КПД произведённой теплоты 0,09, а первичной энергии 0,84. При расчёте сроков окупаемости учитывалась вся полученная от грунта теплота.

Предполагается, что такие системы теплоснабжения являются экологически чистыми. Мы не будем сравнивать количество вредных выбросов при изготовлении и «экономленных» при эксплуатации теплонасосной установкой, оно явно будет не в пользу «экономии». Рассмотрим лишь ущерб, наносимый природе в процессе экс-

платации. На рис. 5 показано увеличение диаметра охлаждённого грунта во время эксплуатации. На второй год эксплуатации диаметр составит 8 м, на 5-й – 13, на 25-й – 28 м, что по площади более «шести соток», а на сороковой – 37 м, т.е. 1100 м², что в 11 раз больше площади дома, а это, по существу, равносильно отчуждению земли. Кроме того, по окончании эксплуатации в земле останутся ржавые трубы с «начинкой».

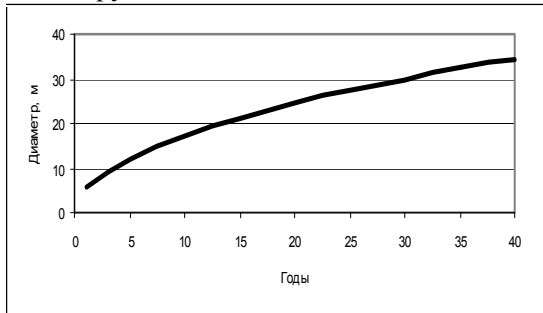


Рис. 5. Увеличение диаметра охлажденного грунта термоскважины 225 м за годы эксплуатации

Выводы. Энергозатраты на производство грунтового теплообменника и в целом теплонасосной установки значительно превышают «бесплатную» энергию, добываемую из грунта за нормативный срок окупаемости. Теоретический срок окупаемости – до 98 лет. Полученная в теплонасосной установке энергия на порядок ниже, чем у первичной энергии, затраченной на её изготовление.

Теплонасосные установки с грунтом в качестве низкотемпературного источника теплоты не являются экологически чистыми как при изготовлении, так и при эксплуатации, а также после её завершения.

5. Релаксация температуры охлаждённого грунта

Как долго будет сказываться влияние охлаждённого грунта на окружающую среду?

Задача о релаксации температуры охлаждённого грунта сводится к нестационарной задаче прогрева неограниченного сплошного цилиндра при заданном радиальном распределении температуры $f(r)$. В начальный момент времени поверхность цилиндра, контактирующая с неохлаждённым массивом грунта, принимает его температуру T_c , которая остаётся постоянной на протяжении всего процесса нагрева. Необходимо найти распределение температуры внутри цилиндра в любой момент времени. Конечной целью является определение полного времени релаксации, т.е. вре-

мени до достижения температуры на оси цилиндра, равной температуре неохлаждённого грунта.

Дифференциальное уравнение теплопроводности, описывающее процесс:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right),$$

$$(\tau > 0; 0 < r < R)$$
 (8)

Краевые условия:

$$T(r, 0) = \text{const},$$
 (9)

$$T(R, \tau) = T_c = \text{const},$$
 (10)

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad T(0, \tau) \neq \infty,$$
 (11)

где R, r – радиусы внешнего цилиндра и координатный; τ – время; a – коэффициент температуропроводности.

Решение этой задачи при $f(r) = T_0 = \text{const}$ и $T_c \neq 0$ [13]:

$$1 - \theta = 1 - \frac{T(r, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} =$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right),$$
 (12)

где θ – относительная температура при охлаждении, $(1 - \theta)$ – при нагреве; J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков; μ_n – корни функции J_0 . Значения μ_n определяются характеристическим уравнением для цилиндра при условии $Bi = \infty$, т.к. температура на поверхности цилиндра в течение всего времени остаётся постоянной.

При $Fo = \frac{a\tau}{R^2} \geq 0,3$ ряд быстро сходится,

поэтому с погрешностью, не превышающей 1%, достаточно ограничиться первым членом, и тогда решение (12) примет вид:

$$1 - \theta = 1 - \frac{T(r, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{2}{\mu_1 J_1(\mu_1)} J_0\left(\mu_1 \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a\tau}{R^2}\right)$$
 (13)

Значения μ_1, J_0 и J_1 табулированы в [13].

На оси цилиндра $r = 0$ и, следовательно, $J_0(0) = 1$, тогда

$$\theta_c = (1 - \theta) = 1 - \frac{T(r, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{2}{\mu_1 J_1(\mu_1)} \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a\tau}{R^2}\right),$$
 (14)

а численные значения $\mu_1 = 2,4048$ и $J_1 = 0,5202$.

Краевые условия (9) – (11) для конкретной задачи:

$$T(r, 0) = 1^\circ\text{C},$$
 (9')

$$T(R, \tau) = T_c = 11,5 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (10')$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad T(0, \tau) \neq \infty. \quad (11')$$

Температура $T_c = 11,5 \text{ }^\circ\text{C}$ определена как средняя по высоте цилиндра 225 м с учётом геотермического градиента $3 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ м})$ и температуры нейтрального пласта земли $+8 \text{ }^\circ\text{C}$. Значения $T(r, 0) = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, как и $T_0 = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, приняты в предположении, что по окончании работы скважины после 40 лет температура грунта и заполненного теплоносителем теплообменника будут одинаковыми. В качестве грунта рассматривалась гомогенная глина.

Изменение температуры на оси цилиндра (прогреваемого грунта) во времени показано на рис. 6, из которого видно, что время релаксации (от 1 до $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$) равно времени охлаждения. В первый год эксплуатации скважины наблюдается та же закономерность, поэтому если на летний период (май-сентябрь) полностью отключить отбор тепла из грунта, т.е. остаться без горячего водоснабжения, то к октябрю произойдёт практически полная релаксация.

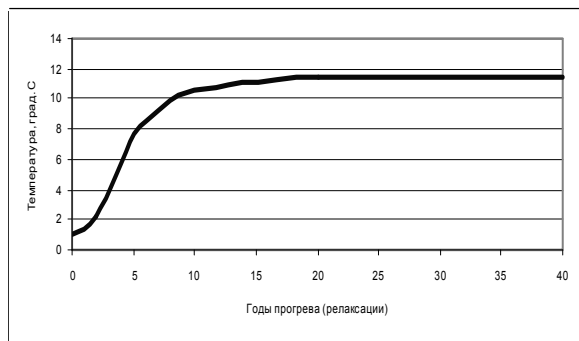


Рис. 6. Температура на оси цилиндра (охлажденного грунта) при релаксации

Выводы. Время релаксации температуры грунта приблизительно равно времени охлаждения грунта, используемого как низкотемпературный источник энергии для теплонасосной установки.

В климатических условиях, аналогичных условиям средней полосы России, энергии солнечной и недр Земли недостаточно для прогрева охлажденного «теплонесущего» грунта в разумные сроки — грунт останется охлажденным или промерзшим.

6. Влияние охлажденного грунта на нейтральный и корнеобитаемый слой

При проектировании теплонасосных установок следует учесть охлаждение нейтрального и корнеобитаемого слоев земли над охлажденным массивом грунта. В связи с тем, что при постановке задачи имеется много факторов, связанных с климатическими и теплообменными особенностями, корректное решение задачи на все разнообразие краевых условий требует большого объема вычислительных работ. Мы покажем на частном примере, что охлаждение нейтрального слоя происходит достаточно быстро, и это оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Рассмотрим неограниченную пластину толщиной $2R$, когда поверхности её поддерживаются при температуре $T_c = \text{const}$ на протяжении всего процесса охлаждения (начало координат находится на одной из поверхностей пластины). Математическая постановка задачи:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0; 0 < x < R) \quad (15)$$

при краевых условиях

$$T(x, 0) = f(x), \quad (16)$$

$$T(0, \tau) = T_c = \text{const},$$

$$T(2R, \tau) = T_c = \text{const}. \quad (17)$$

Решение этой задачи при $f(r) = T_0 = \text{const}$ и $T_c = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ [13]:

$$\frac{T(x, \tau)}{T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1} \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (18)$$

где $\mu_n = n\pi$; $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$; a — температуропроводность глины.

Ограничиваясь первым членом ряда (18), получим:

$$\frac{T(x, \tau)}{T_0} = \frac{2}{\pi} \frac{x}{R} \exp(-\pi^2 \frac{a\tau}{R^2}). \quad (19)$$

Принимая толщину нейтрального слоя $2R = 10 \text{ м}$ и его температуру $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, варьируя в (19) время τ , получим распределение температуры в слое грунта, в частности, через 90 и 365 дней (рис. 7).

На рис. 7 видно, что охлаждение нейтрального слоя грунта происходит достаточно быстро по сравнению с временем эксплуатации скважины, что делает грунт непригодным для растение-

водства, а также может оказывать негативное воздействие на экологическое равновесие.

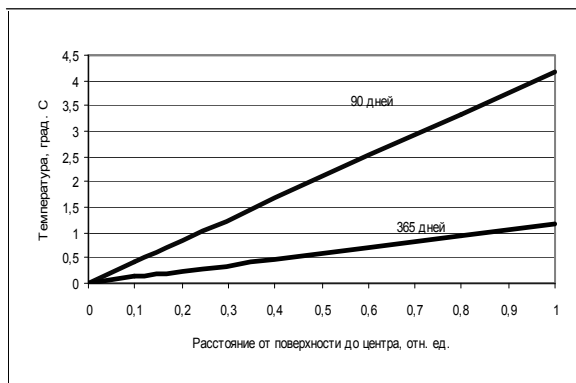


Рис. 7. Температура нейтрального слоя грунта толщиной 10 м с начальной температурой 10°C через 90 и 365 дней охлаждения

Выводы. Охлаждение нейтрального слоя земли над охлаждённым грунтом термоскважины происходит достаточно быстро по сравнению с временем эксплуатации теплонасосной установки, что приводит к отчуждению земли для растениеводства, нарушает экологическое равновесие.

7. Сбросное тепло

Использование отработанной теплоты воздуха, промышленных или сточных вод, теплоты технологических процессов, например, охлаждение или пастеризация молока, представляется возможной областью применения тепловых насосов. Один из последних примеров использования сбросного тепла описан в [14].

Выводы

Возможно применение лишь таких теплонасосных установок, которые используют отработанную теплоту (сбросное тепло), если её имеется в достаточном количестве и это экономически выгодно. Остальные ТНУ можно рассматривать как исключение. Работа по созданию теплонасосных установок является проектно-конструкторской с использованием выпускаемых промышленностью тепловых насосов, компрессоров, теплообменников, фильтров, регулирующей аппаратуры и пр.

См. также выводы по разделам настоящей статьи.

Литература

1. Хейндрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. М.: Стройиздат, 1985.
2. Трушевский С.Н. О низкотемпературных источниках теплоты для тепловых насосов // Труды 7-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». Часть 4. М.ГНУ ВИЭСХ, 2010. С. 270-274.
3. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007.
4. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Москомархитектура. М.: ГУП "НИАЦ", 2001.
5. Васильев Г.П. Энергоэффективный экспериментальный жилой дом в микрорайоне "Никулино-2" // АВОК. 2002. №4.
6. Васильев Г.П., Крундышев Н.С. Энергоэффективная сельская школа в Ярославской области // АВОК. 2002. №5.
7. Васильев Г.П. Энергоэффективные здания с теплонасосными системами теплоснабжения // ЖКХ. 2002. №12.
8. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли: Монография. М.: «Граница», 2006.
9. Горбачёв В.С., Малюгин А.В. Использование нетрадиционных источников энергии для теплоснабжения сельского дома // Гелиотехника. 1987. №3.
10. Рекомендации по экспериментальному проектированию систем теплохладоснабжения с использованием серийно выпускаемых холодильных машин, работающих в режиме тепловых насосов. М.: Госгражданстрой СССР, ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1986.
11. Ачеркан Н.С. Справочник машиностроителя. Том 2. М.: Машгиз, 1956. С. 117.
12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. С. 83, 87, 146.
13. Григорьев В.А., Зорин В.М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. М.: Энергоиздат, 1982. С. 141, 139.
14. Васильев Г.П., Абуев И.М., Горнов В.Ф. Автоматизированная теплонасосная установка, утилизирующая низкопотенциальное тепло сточных вод города Зеленограда. Интернет. 2004.

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ БЫСТРОМ ПИРОЛИЗЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Канд. техн. наук А.Г. Чижиков (ГНУ ВИЭСХ),
доктор техн. наук А.В. Голубкович (ГНУ ВИМ)

Рассмотрены условия теплообмена при быстром пиролизе между сплошной металлической греющей поверхностью и перемещаемыми по ней частицами растительного материала. Составлено математическое описание энергетического баланса для частицы за бесконечно малое время с использованием дифференциального уравнения Фурье. Определено, что теплообмен характеризуется высокой интенсивностью – $200 < \alpha < 400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$. Установлены параметры быстрого пиролиза: диаметр частиц, длительность их контакта с греющей поверхностью, коэффициент теплообмена, удельная производительность процесса, затраты тепла в зависимости от исходной влажности сырья, время пиролиза.

Ключевые слова: растительные материалы, быстрый пиролиз, теплообмен, уравнение, расчет, параметры, коэффициент теплоотдачи, затраты тепла, удельная производительность, время пиролиза.

Постановка задачи. Быстрый пиролиз растительных материалов (РМ) в отличие от медленного позволяет получить большее количество энергетически ценных продуктов, он менее энергозатратен и материалоемок, а технические средства его реализации более производительны. В то же время закономерность протекания быстрого пиролиза РМ в тонком слое ($h_c \leq 10 d$, где h_c – высота слоя, d – приведенный диаметр частицы сырья) на плоской греющей поверхности изучены недостаточно. Пиролизуемый материал может менять своё положение относительно этой поверхности, что постоянно приводит к изменению условий теплообмена. Это достигается его принудительным перемещением рабочими органами пиролизной установки, например скребком, мешалкой, планками конвейера и т.п.

Условия теплообмена при быстром пиролизе между греющей поверхностью и частицами РМ следующие. При попадании частицы РМ на поверхность и достаточно длительном её контакте температура частицы начинает повышаться, пока не достигнет температуры греющей поверхности, при этом $M_n \gg M_{\text{ч}}$, где M_n , $M_{\text{ч}}$ – массы

Heat exchange conditions are considered at fast pyrolysis between a continuous metal heating surface and particles of a vegetative material moved on it. The mathematical description of power balance for a particle for infinitesimal time with use of the differential equation of Fure is made. It is defined that heat exchange is characterized by high intensity – $35,2 < \alpha < 70,4 \text{ BTU/ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F}$. Parameters of fast pyrolysis are established: diameter of particles, duration of their contact to a heating surface, koeffitsient heat exchange, specific productivity of process, an expense of heat depending on initial humidity of raw materials, pyrolysis time.

Keywords: vegetative materials, fast pyrolysis, heat exchange, the equation, calculation, parameters, koeffitsient heat exchange, heat expenses, specific productivity, pyrolysis time.

греющей поверхности и частиц (теплопотери в окружающую среду не учитываются).

Процессы, при которых два тела с различными свойствами обмениваются тепловой энергией, описываются математически в достаточно сложной форме. Это описание упрощается, если рассматривать контактирующие поверхности тел, между которыми происходит теплообмен, и вместо всего процесса от начала до момента выравнивания температур описывать только начало процесса теплообмена. В этом случае пограничный слой РМ и греющую поверхность во время контакта можно считать бесконечно протяженными, а температуру соприкасающихся во время контакта поверхностей постоянной и равной t_1 , а на противоположной стороне частицы её температура t_0 близка к начальной.

Математически рассматриваемую задачу можно сформулировать следующим образом: на поверхности частицы пиролизуемого материала, имеющего начальную температуру t_0 , температура возрастает до t_1 . Требуется определить изменение температуры внутри частицы. Чтобы математически описать такой неустановившийся процесс, необходимо составить уравнение

энергетического баланса для частицы РМ за бесконечно малый промежуток времени. Это можно сделать, используя дифференциальное уравнение Фурье [1], которое для плоской стенки его можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{c\gamma}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, кДж/кг·°С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С; γ – плотность материала, кг/м³; $a = \lambda / c\gamma$, м²/с – коэффициент температуропроводности тела.

Если количество тепла, подводимого к отдельной частице РМ или их массе, за счет теплопроводности больше, чем отводимого от них, то при этом будет повышаться температура и начнется процесс пиролиза.

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$t = AG \frac{1}{2} \sqrt{Fo} + B, \quad (2)$$

где A и B – постоянные; Fo – число Фурье; G – интеграл Гаусса, описывающий температурное поле в частице при рассматриваемых условиях, зависящее от значения числа Фурье.

Для использования полученного уравнения (2) необходимо определить значения постоянных A и B . Это можно сделать на основании граничных условий:

$$t_{z=1} = A G(0) + B = t_1, \quad (3)$$

$$t_{z=0} = A G(0) + B = t_0. \quad (4)$$

Подставляя табличные значения интеграла Гаусса, уравнение (2) можно переписать в виде:

$$t = (t_1 - t_0) G \frac{1}{2} \sqrt{Fo} + t_0 \quad (5)$$

$$\text{или } \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} = G \frac{1}{2} \sqrt{Fo} = G \frac{1}{2} \frac{z}{\sqrt{a\tau}}. \quad (6)$$

Это уравнение описывает температурное поле контактирующих тел в безразмерных координатах, которое в дальнейшем использовано для расчета теплообмена и коэффициента теплоотдачи.

Теплообмен и коэффициент теплоотдачи.

Из уравнения (6) следует:

$$Q = F \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} (t_1 - t_0), \quad (7)$$

где F – площадь теплообмена, м².

Коэффициент температуропроводности равен $a = \lambda / c\gamma$, следовательно,

$$Q = F \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda c\gamma} \frac{1}{\sqrt{\tau}} (t_1 - t_0), \quad (8)$$

где Q – поток тепла через контактирующую поверхность частиц в момент времени τ , Вт.

Суммарное количество тепла за промежуток времени от 0 до τ составит:

$$Q' = F \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda c\gamma} \frac{1}{\sqrt{\tau}} (t_1 - t_0) = Fa (t_1 - t_0), \quad (9)$$

где $\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda c\gamma} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С.

При выводе выражения (9) принято допущение, что размеры частиц по направлению теплового потока бесконечно велики. Это условие можно считать выполненным лишь в том случае, когда длительность контакта настолько мала, что на противоположной стороне поверхности контакта не происходит заметного изменения температуры. Установлено, что максимально возможная длительность контакта равна [2]:

$$\tau_{\max k} = 381 \frac{d^2}{a}, \text{ с.}$$

Зависимость расчетных значений коэффициента α , диаметра частиц и удельного расхода тепла q , при пиролизе опилок от времени контакта приведены на рис. 1.

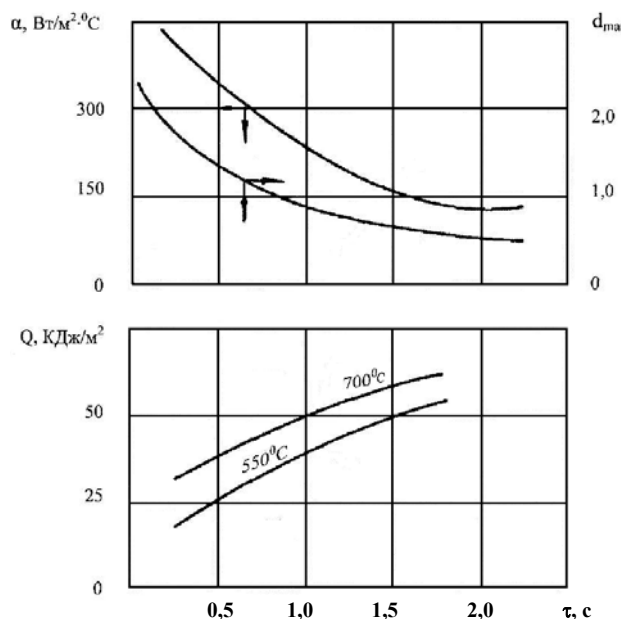


Рис. 1. Зависимость расчетных значений коэффициента теплоотдачи, диаметра частиц и удельного расхода тепла от времени контакта

Пиролиз при изменяющейся температуре контакта. Температура на греющей поверхности может меняться вследствие изменения производительности установки, а также физико-механических и теплофизических свойств РМ в

процессе пиролиза. Эти факторы могут менять температуру греющей поверхности в любую сторону. При увеличении температуры на поверхности α возрастает, при уменьшении – снижается. Когда разность температур $t_z = t_1 - t_0$ возрастает пропорционально времени контакта $\sqrt{\tau_k}$, то коэффициент теплоотдачи α в $3\pi/8$ раз больше, чем при постоянной температуре поверхности контакта. Следовательно, при повышении температуры греющей поверхности величина α в 1,18 раз возрастает, при снижении во столько же раз уменьшается. Однако в реальных условиях пиролиза величина τ_k , как правило, задана, поэтому изменение величины α следует рассчитывать, исходя из изменения соответствующих параметров теплообмена: коэффициента теплопроводности λ и свойств материала W , d , γ и с.

Пиролиз влажных РМ. Теплота парообразования влаги вначале расходуется на охлаждение РМ, затем они подсушиваются, и лишь когда влажность материала достигнет равновесной, начинается увеличение температуры материала и процесс пиролиза.

Как правило, пиролизу подвергаются капиллярно-пористые материалы. Влага, находящаяся в частицах РМ, образует пленки или сплошные трубки, и она является более теплопроводной средой, чем воздух, находящийся в порах. Пленки или трубки увеличивают теплопроводность влажных РМ по сравнению с сухими. Кроме того, внутри пор вследствие разности температур возникает явление термовлагопроводности, которое препятствует термомоконверсии.

Процесс теплообмена при пиролизе влажных материалов практически не изучен. Однако можно предположить, что он качественно не отличается от теплообмена при пиролизе сухого материала, а количественные характеристики этого процесса могут быть получены при замене $\lambda = \text{const}$ на $\lambda = f(W)$.

Расчет теплотехнических параметров и времени пиролиза. Потребное для пиролиза количество теплоты можно принять равным:

$$Q_1 = F h_c \gamma Q_n^p, \quad (10)$$

где Q_n^p – низшая теплотворная способность материала, которую в первом приближении можно принять равной теплоте необходимой для пиролиза, кДж/кг.

Количество теплоты, передаваемое материалу при кратковременном контакте, составляет:

$$Q_2 = F \alpha \Delta t \tau, \quad (11)$$

где Δt – перепад температур между греющей поверхностью и материалом, $^{\circ}\text{C}$; τ – длительность пиролиза, с.

Приравнивая правые части уравнений (10) и (11), получаем время пиролиза:

$$\tau = \frac{h_c \gamma Q_n^p}{\alpha \Delta t}, \quad (12)$$

Производительность установки для пиролиза равна:

$$G_n = F h_c \gamma / \tau, \quad \text{кг/с}. \quad (13)$$

Количество воды, которое необходимо испарить из материала перед пиролизом, составляет:

$$\bar{W} = F h_c \gamma \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}, \quad (14)$$

где ω_1 , ω_2 – начальная и конечная влажность материала, %.

Массоперенос при пиролизе материала и свободном удалении паров влаги в общем виде можно записать [2]:

$$\text{Nu} = 2 + 1,07 \text{Re}^{0,48} \cdot \text{Pr}^{0,75} \cdot \text{Gu}^{0,175}, \quad (15)$$

где Nu , Re , Pr и Gu – числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Гухмана.

Для данного случая при скорости фильтрации $V < 0,01$ м/с, в частности, можно принять:

$$\text{Nu} \approx 2. \quad (16)$$

Коэффициент массообмена между пиролизуемым материалом и окружающей средой равен:

$$\beta = \text{Nu} D/d, \quad \text{м/с}, \quad (17)$$

где D – коэффициент диффузии, определяемый по формуле:

$$D = D_0 \left(\frac{T_0 + T}{T_0} \right)^{1,8} = 0,219 \left(\frac{273 + \frac{t_n}{2}}{273} \right)^{1,8} \quad \text{м}^2/\text{с}, \quad (18)$$

где t_n – температура процесса, $t_n \approx 550^{\circ}\text{C}$, а T – средняя температура процесса, $t_n/2 = 275^{\circ}\text{C}$.

Парциальное давление водяных паров в пиролизной камере равно:

$$P_n = \phi P_n, \quad (19)$$

где ϕ – относительная влажность среды в пиролизной камере, %, примем $\phi \approx 35\%$; P_n – давление насыщенных водяных паров при 100°C , Па.

По уравнению (17) можно определить количество воды, испаряющейся с 1 м^2 поверхности материала в пиролизной камере [3]:

$$q_m = \frac{\beta}{RT(P_v - P_n)}, \quad (20)$$

где P_v – парциальное давление водяного пара при $t_n/2$; R – газовая постоянная (461 Дж/кг·К); $T = 273 + t_n/2$.

Таблица 1. Показатели теплообмена и параметров быстрого пиролиза РМ
(расчет выполнен для смеси опилок и стружек при $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\lambda = 0,22$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\gamma = 250$ кг/м 3 ,
 $c = 1,3$ кДж/кг $^{\circ}$ С, $\tau_k = 1$ с, $\beta = 0,02$ м/с)

Показатель	Температура греющей поверхности при пиролизе, $^{\circ}$ С				
	500			700	
	Влажность материала, %				
	10	20	35	10	35
Теплотворная способность материала, МДж/кг	12,6	11,0	9,5	12,6	9,5
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м 2 $^{\circ}$ С	405	415	400	400	410
Время пиролиза, с	11	13	15	8,5	14
Удельная производительность, т/ч \cdot м 2	0,05	0,043	0,035	0,065	0,046
Затраты тепла на пиролиз, кДж/м 2 \cdot ч	18300	16900	15500	23400	19300

Так как $\overline{W} = q_m$, то из решения уравнений (14) и (20) можно определить время пиролиза влажных РМ (таблица 1).

Выводы

Быстрый пиролиз РМ влажностью 10 % и менее на греющей поверхности в тонком слое характеризуется кратковременным контактом не более 10 с, а теплообмен высокой интенсивностью - $200 < \alpha < 410$ Вт/м 2 $^{\circ}$ С.

С повышением влажности РМ величина температуропроводности материала практически не меняется, возрастает его теплопроводность, но одновременно увеличивается время контакта из-за снижения сыпучести и, в конечном счете, величина коэффициента теплоотдачи α постоянна.

Для РМ с влажностью, более гигроскопической, прогрев и пиролиз наступает после его подсушки до этой влажности, причем длительность пиролиза возрастает на время подсушки.

С повышением температуры пиролиза величина α не меняется, но сокращается длительность процесс, и снижаются затраты теплоты. Выход готового продукта (жидкая и твердая фракция) сокращается с повышением влажности.

Расчетом установлены следующие параметры быстрого пиролиза: диаметр частиц от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ м: длительность контакта с греющей поверхностью от 0,5 до 2 с (чем крупнее частицы, тем меньше должна быть длительность контакта), материал влажностью, большей гигроскопической, должен быть подсушен до влажности не более $\sim 10\%$.

Литература

1. Теория тепломассообмена / Под ред. д-ра техн. наук А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. – 495 с.
2. Кришер О. Научные основы техники сушки. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
3. Печенегов Ю.Я. Примеры расчетов и решений задач по процессам тепло- и массопереноса. Саратов: Саратовский политехнический институт, 1968.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Академик Россельхозакадемии Д.С. Стребков,
доктор хим. наук Ю.М. Щекочихин, канд. биол. наук М.Ю. Росс
(ГНУ ВИЭСХ)

Анализ топливно-энергетического баланса сельского хозяйства России с учетом освоения новых видов энергии определяет необходимость использования местных энергоресурсов и новых энергетических технологий. Перспективным является освоение биологических видов топлива (биомассы) для производства биотоплива (бионефть). Рассмотрены перспективы получения биотоплив второго и третьего поколения из биомассы непищевого назначения.

Проведен анализ промышленной эффективности и экономической целесообразности технологий получения биотоплив из микроводорослей в открытых и замкнутых системах. Показано, что новые энергетические технологии позволяют эффективно преобразовывать биомассу и отходы растениеводства в жидкое и газообразное топливо и электроэнергию.

Ключевые слова: Биотопливо, альтернативные источники энергии, биодизельное топливо, биотопливо из микроводорослей, открытые и закрытые способы выращивания микроводорослей.

Современная ситуация в топливно-энергетической сфере характеризуется нестабильностью мировых цен на ископаемые энергоносители и постоянно возрастающим технологическим давлением на окружающую среду. Этим и определяются основные тенденции политического, экономического, законодательного и технологического характера. Достаточно хорошо известны примеры, когда мотивирующей силой политических событий является стремление контролировать рынки энергоносителей. В законодательной области многое делается для того, чтобы стимулировать замещение невозобновляемого ископаемого энергетического сырья возобновляемым, которое одновременно является и более безопасным в экологическом отношении. Так, например, согласно Директиве ЕС № 2003/30 от 14 мая 2003 г., доля биотоплива на транспорте в Европе должна составить не менее 5,75 % к следующему году, а к 2020 г. эта доля должна возрасти до 10 % [1].

Analysis of the energy balance of agriculture in Russia with consideration of the development of new types of energy determines the need of use of the local energy resources and new energy technologies. Promising is the development of biological fuels (biomass) for the production of biofuels (bio-oil). The paper discusses the prospects for production of biofuels of production of the second and the third generation from non-food biomass.

The article analyzes the industrial efficiency and economic feasibility of technologies of production of biofuels from microalgae in open and closed systems. It is shown that new energy technologies can effectively convert biomass and crop residues into liquid and gaseous fuels and electricity.

Keywords: Biofuels, alternative energy, biodiesel, biofuels from microalgae, open and closed technologies of microalgae production.

В научно-технической и технологической сфере это стимулирует поиск новых возможностей в производстве биотоплив, в частности, вовлечение в топливно-энергетическую сферу биоресурсов, использование которых не вносит серьезного дисбаланса в структуру сельхозпроизводства, традиционно ориентированного на удовлетворение продовольственного спроса. Важным направлением также является поиск новых методов ресурсосбережения и снижения вредного влияния на окружающую среду находящихся в обращении технических средств механизации, работающих на так называемых «традиционных» видах топлива (бензин, дизельное топливо, мазут), а также создание соответствующих технологий и оборудования.

Быстрое сокращение разведанных ресурсов ископаемого энергетического сырья заставляет мировое сообщество интенсивно осваивать возобновляемые источники энергии, среди которых растительной биомассе принадлежит ведущая роль. В настоящее время она покрывает 35 %

энергопотребления развивающихся стран. Кроме того, постепенное замещение углей, природного газа и продуктов нефтеперегонки биотопливом из растительной биомассы при постоянном ее воспроизводстве в объемах, превосходящих потребности, перспективно для сохранения баланса углекислоты в атмосфере. Современный уровень энергопотребления в мире эквивалентен 12 млрд. т нефтяных единиц (НЕ). С учетом существующих темпов роста к 2050 г. мировое энергопотребление достигнет 15 млрд. т НЕ (по более пессимистическим прогнозам – 25 млрд. т НЕ). При этом по данным Мирового Энергетического Совета, использование возобновляемых источников энергии увеличится в два раза и достигнет 6 млрд. т НЕ, а доля биомассы составит 2,6 млрд. т НЕ. В настоящее время в мире для энергетики используется около 1 млрд. т растительной массы, что эквивалентно 25% мировой добычи нефти. Потенциальный ресурс растительной массы для энергетического использования оценивается в районе 100 млрд. т. В странах экваториального пояса биомасса остается основным источником энергии. Ее доля в энергобалансе развивающихся стран составляет 35%, в мировом потреблении энергоресурсов – 12%, в России – лишь 3% [2–7].

Вероятностные альтернативные источники энергии, перспективные для обеспечения стабильности мировых энергетических ресурсов, в значительной степени основываются на производстве биодизельного топлива из растительной биомассы.

Растительная биомасса является первичным источником энергии на Земле. Она образуется при фотосинтезе из диоксида углерода и воды с выделением кислорода. При образовании 1 кг сухой биомассы поглощается около 1,83 кг CO_2 и столько же выделяется при ее разложении. В результате содержание углекислого газа в атмосфере остается неизменным, что является важным фактором климатического баланса (8–10). Биомасса как топливо имеет ряд достоинств. В частности, использование биомассы для получения энергии экологически более безопасно, чем, например, угля из-за низкого содержания серы (при сжигании биомассы выделяется менее 0,2% серы и от 3 до 5% золы в сравнении с 2–3% и 10–15% соответственно для угля). Кроме того, зола может быть возвращена обратно в почву, что обеспечивает замкнутость круговорота биогенных элементов. Эмиссия оксидов азота при сжигании биомассы может быть снижена при использовании современных технологий и понижении температуры сжигания. Производство компостов из переработанной

биомассы улучшает структуру почвы и снижает загрязнение стоков и подземных вод [11–14].

Биомасса также имеет превосходство перед углем благодаря своей более высокой способности к реакции газификации. Уголь газифицируется при высокой температуре в чистом кислороде, что требует использования установок для сжижения воздуха и получения кислорода. Биомасса же газифицируется при более низкой температуре, при этом теплота для поддержания процесса может быть передана через теплообменники от внешнего источника. Состав генераторного газа: 18–20% H_2 , 18–20% CO , 2–3% CH_4 , 8–10% CO_2 , остальное – азот. Кроме того, энергия, получаемая при использовании биомассы, относительно дешева, и имеются возможности ее накопления. В связи с малой мощностью электростанций, используемых в качестве топлива биомассу, к их преимуществам можно отнести также короткий срок проектирования и строительства, повышение надежности энергоснабжения, связанное с его децентрализацией, повышение эффективности использования топлива; снижение остроты проблемы избавления от отходов [1, 14].

Требование повсеместного отказа от вредных для экологии продуктов нефтепереработки вынуждает производителей горюче-смазочных материалов разрабатывать синтетические горючие компоненты (например, газ из различных пород древесины). Пионером подобной методики стала известная компания Shell, которая уже давно специализируется на выпуске экологически безопасных продуктов переработки нефти. Однако если раньше подобные технологии выступали лишь в качестве возможной альтернативы традиционным маслам и топливу, то сегодня уже наметились тенденции к полному переходу на использование "энергетических растений". В частности, немецкое энергетическое агентство DENA сделало заявление о создании биотоплива второго поколения по новейшей технологии Biomass to Liquid (BtL), с учетом имеющихся объемов сырья и минимальных затрат на производство BtL эти перспективы более чем реальны [1].

Топливные смеси с подавляющим процентом биодизельной составляющей помимо высоких экологических показателей, отличаются и более высокой по сравнению с традиционными аналогами вязкостью, что способствует увеличению срока службы двигателей. В широком смысле, к биотопливам второго поколения относят топлива, полученные различными методами пиролиза биомассы [2, 15]. Быстрый пиро-

лиз позволяет превратить биомассу в жидкость для производства автомобильного топлива или топливо для электростанций, легкое и дешевое в транспортировке, хранении и использовании. Из биотоплив второго поколения наиболее известны BioOil производства канадской компании Dynamotive и SunDiesel германской компании Chloren Industries GmbH. По оценке Германского Энергетического Агентства Deutsche Energie-Agentur GmbH производство топлив пиролизом биомассы может покрыть 20 % потребностей Германии в автомобильном топливе. К 2030 году, с развитием технологий, пиролиз биомассы может обеспечить 35 % германского потребления автомобильного топлива.

В Норвегии применяются передвижные установки на лесосеках, где перерабатываются растительные отходы методом пиролиза. Производительность отдельной установки от 10 до 30 т древесного угля в сутки. При пиролизе из 1 т отходов (щепа) получается 280 кг угля, 200 кг смолы пиролиза и около 222 кг газообразного топлива. Газообразное топливо используется для поддержания процесса пиролиза. Смола пиролиза применяется как котельное топливо или подвергается гидрооблагораживанию под давлением водорода для получения бензина и дизельного топлива. Стационарные установки пиролиза могут иметь до 40 печей и рассчитаны на переработку 300–350 тыс. т органических отходов в год.

Разработан процесс ожижения растительной биомассы методом гидрогенизации при 350° С под давлением водорода при 6,4 МПа. Из 1 т биомассы получают 24 кг синтетической нефти и 160 кг остатка типа асфальта. Одним из методов получения жидких моторных топлив является термическое растворение древесины в нефтяных фракциях при 380–450°С под давлением 10,0 МПа. При этом происходит ожижение древесины. В США имеется экспериментальная установка, где из 1000 кг древесной щепы получается 300 кг топлива типа сырой нефти. Процесс ведут при давлении 28 МПа и температуре 350–375°С. В качестве катализатора применяют карбонат натрия.

В ряде стран (Италия, ФРГ, Аргентина и др.) созданы специальные энергетические плантации быстрорастущих пород древесины и других пород на землях, не пригодных для сельского хозяйства. Плантации ивы в Швеции на заболоченных землях дают 25 т древесины с 1 га в год. Сбор древесины осуществляется через 2 года специальными комбайнами в зимнее время года, когда заболоченная земля замерзает. С

1 млн. га получается 15 млн. т древесины в виде сухого древесного топлива, что эквивалентно 20% энергии, необходимой для этой страны.

В рамках Западно-Европейской программы развития возобновляемых энергоресурсов в Италии пущен крупный биоэнергетический комплекс, рассчитанный на ежегодную переработку 300 тыс. т быстрорастущей биомассы и органических отходов. Помимо газа и тяжелых остатков будет получено 20 тыс. т жидкого топлива. В Германии имеются большие плантации рапса, из которого получают смазочные масла и дизельное топливо.

В Латинской Америке, США и Франции из биомассы (отходов сахарного тростника, кукурузы и др.) получают этанол, используя обычно процессы брожения. В Бразилии получается более 10 млн. т этанола, который применяют как основное топливо для автомобилей (96%-ный этанол) или в смеси с бензином - топливо "Газохол" (22 % этанола с 78 % бензина). В США из кукурузы получают более 3 млн. т этанола, который применяют в качестве добавки к бензину (5-10%) для повышения октанового числа и улучшения процессов сгорания.

Из биотоплив второго поколения, продающихся на рынке, наиболее известны BioOil производства канадской компании Dynamotive и SunDiesel германской химической компании CHOREN Industries GmbH Industrieries при поддержке концернов DaimlerChrysler и Volkswagen. Сырьем для производства топлива SunDiesel служат отходы сельскохозяйственного производства, куски древесины, солома, навоз и т.п. После сушки отходы нагреваются до 400–500°С, выделившийся газ проходит ряд превращений в присутствии катализатора – и на выходе из реактора получается дизельное топливо без содержания серы и других вредных примесей. Кроме того, биодизельное топливо «СО₂-нейтрально» по отношению к окружающей среде – при его сгорании в атмосферу возвращается та углекислота, что была поглощена растениями при росте.

Еще один способ получения биологического дизельного топлива – из растительного сырья. Основой для такого биодизельного топлива служат различные компоненты, чаще всего соя, рапс, хлопок. В процессе производства биодизельного топлива из растительного сырья семена растений проходят через маслобойку, далее из сырья выжимают масло, очищают от вкраплений, шрота – отходов маслоэкстракционного производства. Затем масло смешивают с метанолом, применяя в качестве катализатора

метоксид натрия, охлаждают и дистиллируют (рис. 1). Горючее может быть использовано после очистки, в частности, ученые из университета Айовы предложили использовать нанотехно-

логии для процедуры очистки топлива путем введения наносфер, поры которых в ходе химической реакции заполняет катализатор, ускоряющий процесс.

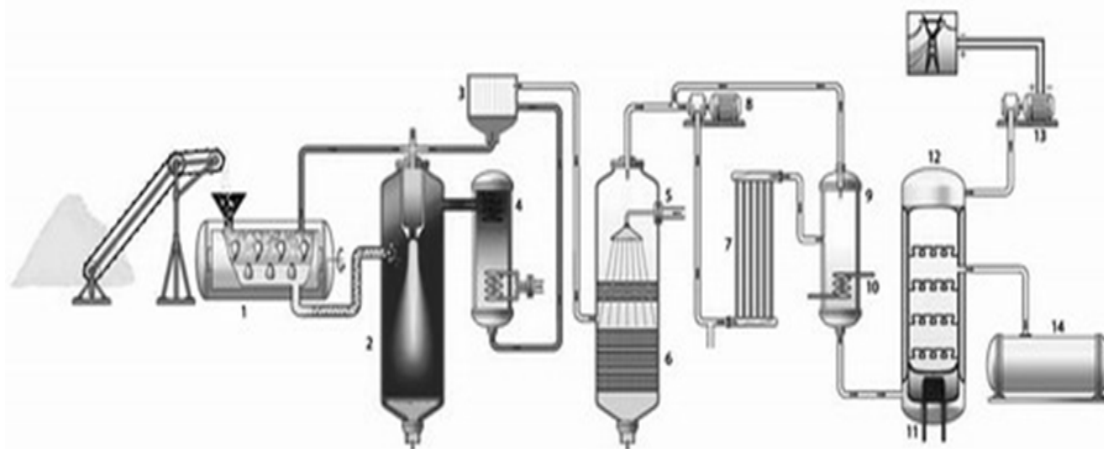


Рис. 1. Схема процесса производства биодизельного топлива из растительного сырья:

1 – низкотемпературный газовый генератор; 2 – высокотемпературный реактор; 3 – пылевой фильтр; 4 – теплообменник; 5 – подача воды; 6 – сепаратор; 7 – многотрубчатый реактор; 8 – газовый компрессор; 9 – конденсор; 10 – система охлаждения; 11 – нагреватель; 12 – дистилляционная емкость; 13 – газовый электрогенератор; 14 – резервуар с готовым топливом

Таблица 1. Анализ биодизельного топлива, производимого из традиционного растительного сырья

Достоинства	Недостатки
Экономический аспект. Страны, где нефти нет либо крайне мало, готовы платить зеленым сырьем за энергетическую независимость;	Себестоимость производства выше, чем бензина и минерального дизельного топлива;
Биодизельное топливо практически не содержит серы и канцерогенного бензола. Разложение этого топлива происходит в естественных условиях без вреда для природы, а в процессе сгорания в двигателе выбросы в атмосферу CO_2 на 50–80% ниже, чем при работе на традиционном минеральном дизельном топливе;	Требуются дополнительные площади сельскохозяйственных земель;
Растительное топливо отличается хорошей воспламеняемостью, поскольку его цетановое число достигает 58, тогда как этот показатель для традиционной солянки не превышает 52. Иными словами, зажечь биодизельное топливо легче, но сгорает оно с меньшей теплоотдачей;	Эфиры рапсового масла обладают значительной коррозионной активностью, что чревато потерей стойкости резиновых прокладок и сальников, образованием твердых отложений в форсунках и жиклерах, забитыми топливными фильтрами и отказавшими насосами высокого давления;
Запасы сырья могут возобновляться ежегодно, культура не требует особого ухода в процессе выращивания;	Высокое содержание в «растительном» выхлопе окиси азота NO_x : в сравнении с обычным дизельным топливом на 10% больше, а в ходе эксперимента инженеры Volvo показали, что эта разница может достигать 40%;
В ходе переработки масла получают дополнительные продукты (глицерин, сульфат натрия).	Борьба с токсичностью приводит к потере мощности, а ее компенсирует больший расход топлива.

В табл. 1 [1] представлены положительные свойства биодизельного топлива и слабые стороны его использования в хозяйственных целях.

Обычным сырьем для производства биодизеля является рапс. Урожайность рапса достигает 20–25 центнеров с гектара. Но пока его

только добавляют в дизельное топливо, поскольку рапсовое масло в чистом виде как топливо не используется. Из-за более высокой вязкости (почти в 20 раз выше по сравнению с дизельным горючим) требуется другая топливная аппаратура и изменение камеры сгорания. Мас-

ло смешивают с метанолом и получают метиловый эфир, иначе называемый «маслометанольная смесь». Из 1 тонны получается 350 килограммов такой смеси. Для получения биодизеля в солярку добавляют 30% маслометанольной смеси. Вместо ядовитого метилового спирта рапсовое масло можно смешивать с этиловым (пищевым) спиртом. В ходе переработки масла в биодизель получают ряд дополнительных продуктов, пользующихся спросом (например, глицерин, сульфат калия).

В табл. 2 [1] приводятся сравнительные характеристики минерального и биодизельного топлива.

Таблица 2. Сравнительные характеристики минерального дизельного топлива и биодизельного топлива, производимого из традиционного растительного сырья

Показатель	Минеральное ДТ	Биодизельное топливо
Цетановое число	42-52	47-58
Температура застывания, °С	-10	-9
Содержание серы, %	0,2	-
Зольность, %	0,03	-
Вязкость при 20 С, мм ² /с	3,8	7,5
Теплотворная способность, кДж/кг	42 000	37 000

В последние годы в связи со значительным увеличением использования биомассы для энергетических целей достаточно остро встали проблемы, связанные с вырубкой лесов и переводом значительной части сельхозпродукции из сферы пищевого и фуражного назначения в топливно-энергетическую сферу. Интенсивная заготовка древесины для производства биотоплива ведет к гибели экосистем, сложившихся на протяжении отрезков времени геологического масштаба и включающих в себя многие виды растений и животных. Очевидно также, что использование растительных масел для энергетических целей – это далеко не лучший способ утилизации ресурсов, которые могут быть использованы для пищевых целей. Насчитываются десятки технологий выработки биотоплива, основным сырьем для него служат пальмовое масло, рапс, соя и другие растительные компоненты, которые смешиваются с продуктами нефтепереработки. Многие специалисты в качестве решения проблемы энергетического кризиса рассматривают возможность выращивания

большого количества масличных культур [15, 16]. Тем не менее, этот подход имеет, по меньшей мере, два недостатка:

- выращивание большого количества масличных культур вытеснит пищевые культуры, выращиваемые для удовлетворения пищевых потребностей человечества;

- традиционные масличные культуры – не самые продуктивные источники растительных масел.

В этой связи актуальны поиски и промышленное освоение альтернативного растительного сырья высокой продуктивности для получения биотоплив. Особый интерес в этом плане представляют микроводоросли [1, 17–20]. Считается, что именно эти организмы были основным составляющим современных ископаемых топлив [21–22].

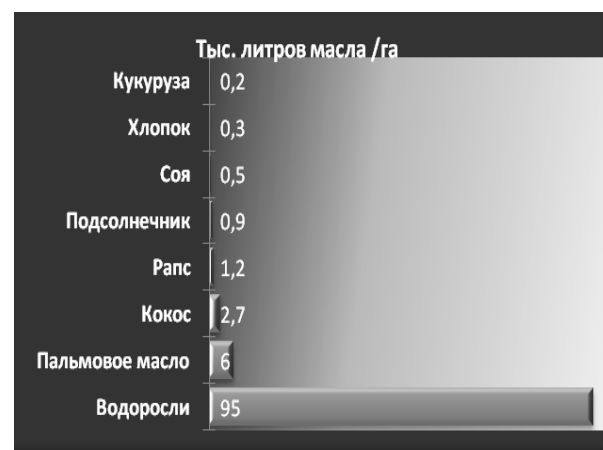


Рис. 2. Сравнительные данные производства масла-сырца в расчете на 1 гектар площади, отведенной под производство культур

По скорости производства биомассы водоросли многократно превосходят самые продуктивные наземные растения, при значительно более высоком выходе полезной продукции на единицу площади. Так, злаковые содержат только около 2% масел по массе, в масленичных семенах растительных масел больше: – от 20% в бобах сои до 50% в плодах австралийской разновидности канолы. Содержание масел в подсолнечнике – до 55%, в сафлоре красильном (*Carthamus tinctorius*) – до 40%, в хлопковом семени – около 20%, в конопле (*Cannabis sativa*) – до 35%, в арахисовых орехах и пальмовых сердцевинах – до 50% масла по сухому остатку. Среднее содержание масел в горчице около 40%, льняное семя имеет содержание масел около 45%, а в тропическом растении ятрофа содержание масел составляет 35–40% в семенах

и 50–60% в сердцевине ствола. На этом фоне статистически выгодно выделяются показатели водорослей, демонстрирующие 10–15-кратное превосходство по содержанию масел в пересчете на единицу площади, отведенную под культивирование (рис. 2).

Биотоплива из масел водорослей называют биотопливами третьего поколения. Сырьем для них служит биомасса непитевого назначения. По мнению аналитиков, эти биотоплива весьма перспективны с точки зрения технических характеристик конечного продукта и экономии на его производстве [23, 24]. В 1978–1996 гг. Министерство Энергетики США инвестировало более чем 25 миллионов долларов в программу Aquatic Species Program (ASP). Это было сделано для продвижения идеи производства биологически чистого топлива из масла водорослей вместо традиционного соевого и пальмового сырья, что не было реализовано вследствие относительно невысоких цен на нефть, и производство традиционного дизельного топлива было более выгодным. Программа была направлена, во-первых, на поиск наиболее маслопродуктивных штаммов и определение условий выращивания максимально благоприятных для продуцирования масел, во-вторых, на разработку технологических линий многотоннажного производства этих штаммов. Цели ASP не были достигнуты вследствие того, что стоимость производимого альтернативного топлива превосходила существующие цены дизельного горючего, по меньшей мере, в два раза.

В 2006 г. после резкого повышения цен на нефть были проведены исследования, показавшие, что при должном развитии технологии использование водорослевого сырья позволит не только значительно снизить цены на горючее, но и обеспечит высокое качество и должный уровень экологической безопасности топлива. Внимание к этому вопросу со стороны межправительственной группы экспертов по изменению климата IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) – организации, основанной в 1988 г., определило дальнейшее развитие тематики возобновляемых источников энергии из водорослей [2–5]. Технология производства топлива из масла водорослей стала объектом целого ряда научных и коммерческих исследований. Она привлекла внимание исследовательских и промышленных организаций, в частности, топливных корпораций, таких, как канадская Global Green Solutions, испанская Bio Fuel Systems и новозеландская Aquaflow Bionomic Corporation, заявивших о строительстве новых

промышленных площадок для производства бионефти и дизельных смесей из водорослей.

В настоящее время определение роли и масштабов применения микроводорослей как альтернативного источника энергии находится в стадии разработки [25]. Так, Национальная Лаборатория по Возобновляемым источникам энергии Департамента Энергетики США вплотную занимается методологией производства промышленных объемов топлива из микроводорослей, богатых триглицеридами. Национальная Лаборатория Сандия в Альбикерке (США) провела ряд исследований, на основании которых потенциал водорослей для биоэнергетики оценивается столь высоким, что позволит заменить в будущем все дизельное топливо на биодизельное горючее, полученное из водорослей.

Вопрос об энергетическом использовании масел водорослей имеет две принципиальные стороны, от решения которых зависит масштаб и области использования этого сырья [26]. Это определение: 1) вида маслосодержащих водорослей, наиболее выгодного для культивирования, и 2) оптимальной технологии культивирования, позволяющей получать промышленно значимые объемы маслосодержащей биомассы.



Рис. 3. Промышленное выращивание микроводорослей в открытых прудах



Рис. 4. Выращивание микроводорослей в фотобиореакторах

Многочисленные данные о биологии перспективных для возобновляемой энергетики видов водорослей и исследования преимуществ их использования как альтернативного энергетического сырья стимулировали развитие технологий и методов производства микроводорослей. Для достижения промышленной эффективности и экономической целесообразности технологии получения биотоплив из водорослей требуют усовершенствования.

Существуют два принципиально отличающихся способа выращивания микроводорослей – в открытых и в замкнутых системах [1]. В первом случае культивирование водорослей осуществляется в прудах и бассейнах различных конструкций, и в качестве источника освещения используется солнечный свет (рис. 3). Другой способ включает закрытые фотобиореакторные системы с искусственным освещением (рис. 4).

Для крупномасштабного производства биомассы имеются попытки объединения открытого и закрытого способов выращивания [27]. Конструкции фотобиореакторов, использующих для освещения электрический свет, отличаются значительным разнообразием. Такие фотобиореакторы представляют собой закрытые системы, дающие возможность контролировать и оптимизировать параметры выращивания [28]. Стабильный и качественный урожай микроводорослей с высоким содержанием белка и витаминов достигается поддержанием оптимального состава культуральной среды (рис. 5, 6).

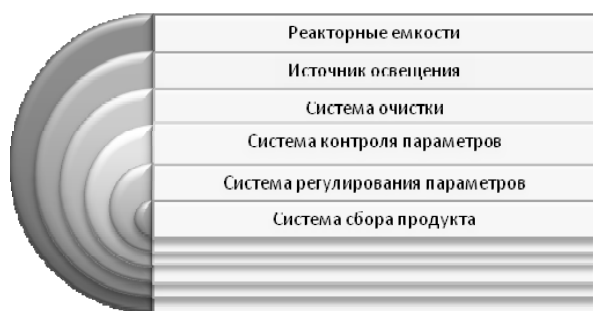


Рис. 5. Основные компоненты закрытых фотобиореакторных систем

Достаточно высокая стоимость конструкции и затрат на обеспечение функционирования ограничивает производство и использование крупномасштабных промышленных систем фотобиореакторов. В последнее время развиваются идеи о двухфазовой технологии выращивания микроводорослей для производства биодизель-

ного топлива, комбинирующей закрытый (фотобиореакторный) и открытый (бассейново-прудовой) способы выращивания. Закрытые фотобиореакторы в этом случае могут быть эффективно и экономически целесообразно использованы для производства высококачественного инокулята – суспензии клеток, являющихся исходными для клеточной культуры (фаза 1) с последующим внесением в выростные пруды открытого выращивания (фаза 2).

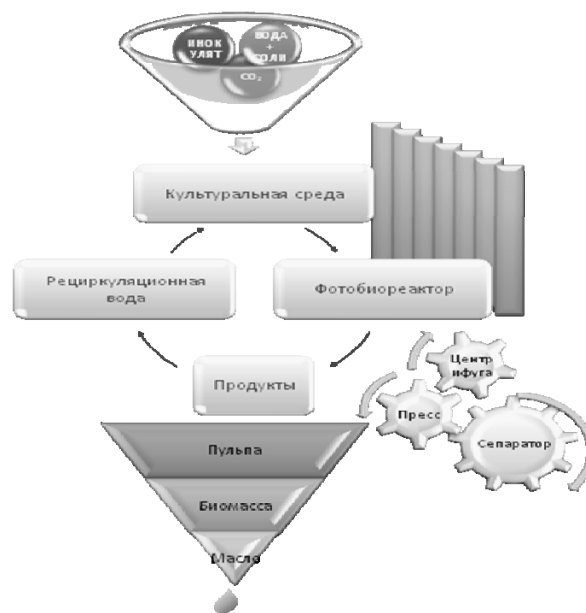


Рис. 6. Схема работы фотобиореактора

Можно заключить, что на современном этапе мирового экономического и технологического развития имеется достаточно высокая перспективность использования микроводорослей в качестве альтернативного растительного сырья высокой продуктивности для получения биодизельного топлива. Дальнейший прогресс определяется: 1) выявлением продуктивного по маслосодержанию, быстрорастущего и резистентного штамма микроводорослей при развитии альгологии с использованием ряда биотехнологических, геномных и биохимических методов; 2) усовершенствованием процесса выращивания с использованием преимуществ открытого выращивания многотоннажной биомассы и фотобиореакторного культивирования штаммов с заданными технологическими свойствами. Это возможно при совмещении открытого и фотобиореакторного культивирования. В открытых прудах, экономически выгодных и дающих возможность получения большого количества биомассы, происходит засорение нежелательными

видами основной маслосодержащей культуры. Это бывает в связи с тем, что различные штаммы имеют сходные требования по параметрам выращивания и в ходе конкуренции продуктивность целевой культуры снижается. В свою очередь, фотобиореакторы дают возможность получать чистую монокультуру с требуемыми свойствами, но достаточно дороги для полного цикла выращивания. Использование комбинирования открытой и фотобиореакторной технологии с максимальным использованием преимуществ каждой и минимизации слабых сторон (выращивание чистой монокультуры в фотобиореакторах с последующим дорастиванием в открытых прудах), даст возможность экономически и технологически оптимизировать процесс производства энергетической биомассы микроводорослей.

Литература

1. Росс М.Ю., Стребков Д.С. Биодизельное топливо из водорослей / Под ред. д-ра хим. наук, проф. Ю.М. Щекочихина. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. – 252 с.
2. Watson R.T., Zinyowera M.C. and Moss R.H. (Eds.). Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses. Contribution of working group II to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, IPCC, 1995, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 354 p.
3. Watson R.T. and the Core Writing Team (eds.) Climate change 2001: Synthesis report. A contribution of working groups I, II and III to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2001, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 398 p.
4. Metz B., O. Davidson R. and Pan J. (Eds.). Climate change 2001: Mitigation. Contribution of working group III to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2001, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 751 p.
5. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai, X. Maskell K. and Johnson C.A. (eds.) Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2001, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 881 p.
6. Возобновляемое растительное сырье. В 2-х томах. / Под ред. Д. Шнаар. - С-Пб.-Пушкин, 2006. - 416 с.
7. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. Постановление правительства РФ № 1234-п от 28.08.2003.
8. Paustian K., Cole C.V., Sauerbeck D. and Sampson N. CO2 mitigation by agriculture: An overview, Climatic Change 40, 1998, pp.135–162.
9. Murakami M., Ikenouchi M. The biological CO2 fixation and utilization project by RITE.2. Screening and breeding of microalgae with high capability in fixing CO2, Energy Conversion and Management, 1997, 38(Suppl.), pp.493–498.
10. Becker E.W. Microalgae: Biotechnology and Microbiology. 1994, Cambridge Univ. Press, 301 p.
11. Edmonds J.A. Climate change and energy technologies, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 9 (4), 2004, pp. 391–416.
12. International Energy Outlook, Washington, DC, US Department of Energy, Energy Information Administration, Report EIA, 1999, DOE/EIA-0484, 189 p.
13. Annual Energy Outlook 2003, Washington, DC, US Department of Energy, Energy Information Administration, EIA, 2003, DOE/EIA-0383, 256 p.
14. Annual Energy Outlook 2003: Natural Gas, Washington, DC, US Department of Energy, Energy Information Administration, EIA, 2003, DOE/EIA-0484, 176 p.
15. Методические рекомендации по определению кинематической вязкости и расчету динамической вязкости жидких топлив. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009. - 36 с.
16. Савельев Г.С. Производство и использование биодизельного топлива из рапса. М.: ГНУ ВИМ, 2007. С. 40-48.
17. Моисеев И.И., Платэ Н.А. Топливо будущего// Химический журнал. 2006. №6. С. 45-53.
18. Algae Biodiesel Startup. Green Car Congress. Aug. 22, 2007, www. greencarcongress.com.
19. Benemann J., Goebel R.P., Weissman J.C. and Augenstein D.C. Microalgae as a Source of Liquid Fuels, Washington, DC, US Department of Energy, 1982, 202 pp.
20. Berndes G., Hoogwijk M. and van den Broek R. The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies, Biomass and Bioenergy 25, 2003, pp.1–28.
21. Dyni J.R. Geology and resources of some world oil-shale deposits, Oil Shale 20(3), 2003, pp. 193–252.
22. Белянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкениш А.П. Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1980. - 134 с.
23. Порев И.А., Щекочихин Ю.М., Росс М.Ю., Чирков В.Г. Получение биотоплив из микроводорослей // Материалы 10-й Специализированной выставки «Изделия и технологии двойного назначения. Диверсификация ОПК». М., 2009.
24. Ma F., Hanna M.A. Biodiesel production: A review, Bioresource Technology 70, 1999, p.1–15.
25. Christi Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. Trends Biotech., 2008, V.26(3), pp.126-131.
26. Ross M. Renewable energy solutions for energy supply to consumers in Russia. Energy Bulletin, 2010, N1 (8), pp.47-61.
27. Kunjapur A.M., Eldridge R.B. Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae, // Ind. Eng. Chem. Res., 2010, N 49(8), pp. 3516–3526.
28. Ross M. Closed photobioreactor systems for intensive cultivation of microalgae for energy production. // Energy Bulletin, 2010, N2 (9), pp. 66-76.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Доктор техн. наук Д.С. Стребков, канд. техн. наук М.Н. Фильков,
канд. биол. наук М.Ю. Росс, доктор хим. наук Ю.М. Щекочихин
(ГНУ ВИЭСХ)

Рассмотрено применение низкотемпературной плазмы для утилизации отходов сельского хозяйства. Показано, что процесс плазменной газификации обеспечивает экологически чистую переработку сырья (отходов) без образования смол, диоксинов, аэрозолей. Продуктом плазменной газификации является высококалорийный горючий газ и нейтральный твердый остаток. Показано, что использование плазменных технологий дает возможность не только избавиться от отходов, но и получить дополнительную электрическую энергию и тепло.

Ключевые слова: Плазменная газификация, отходы сельского хозяйства, синтез-газ, когенерация, миниТЭС.

Существует серьезная проблема утилизации жидких органических отходов с большой концентрацией органической или углеродсодержащей компоненты.

Выращивание растений, животных, производство и потребление продуктов питания, использование ГСМ порождает огромное количество отходов. Например при содержании КРС и свиней образуется в десятки раз больше отходов, чем весят сами животные. В таких объемах отходы представляют экологическую опасность. Поэтому использование новых высокоэффективных технологий для утилизации отходов является важной и актуальной задачей, решение которой обеспечит эффективность и энерговооруженность сельскохозяйственного производства.

Плазменные технологии широко используются во всем мире в различных отраслях промышленности: химической, металлургической, а также для переработки отходов. Именно эта технология обеспечивает переработку отходов (бытовой мусор, промышленные отходы, токсичные органические соединения, медицинские и пищевые отходы, пестициды и т.п.) и позволяет получать дополнительную энергию: тепловую и электрическую.

Применение низкотемпературной плазмы – одно из перспективных направлений в области утилизации отходов, так как в этом случае

The paper examined the use of low-temperature plasma for the disposal of agricultural waste. It is shown that plasma gasification process provides an environmentally clean processing of raw materials (waste) without formation of tar, dioxins and aerosols.

The product of a high-plasma gasification is a combustible gas and a neutral solid residue. It is concluded that the use of plasma technology makes it possible not only to get rid of waste, but also receive electrical energy and heat.

Keywords: Plasma gasification, agricultural wastes, synthesis gas, cogeneration, mini-TES.

достигаются высокая степень обезвреживания отходов канцерогенных веществ, на которые установлены жесткие нормы ПДК в воздухе, воде, почве и др. [1].

Основным преимуществом плазмохимической технологии является универсальность по отношению к типу перерабатываемого вещества и малые габаритные размеры установок, которые позволяют создавать передвижные технологические модули. Кроме того, эта технология способна полностью разрушить любые органические и биологические материалы и тем самым значительно сократить объем отходов, образующихся в результате переработки.

Процесс плазменной газификации (пироллиз) обеспечивает экологически чистую переработку сырья (отходов) без образования смол, диоксинов, аэрозолей и пр., а также полное извлечение всего углерода из материала, в то время как в процессе сжигания отходов остается в твердом остатке до 30% углерода.

Продуктом плазменной газификации является высококалорийный горючий газ (смесь водорода и окиси углерода) и нейтральный твердый остаток. Кроме того, плазменная газификация обеспечивает огромную степень сокращения веса твердого вещества. Отношение веса материала отходов к золе твердого остатка достигает 400:1, т.е. степень переработки составляет более 99,7%.

Другие технологии обеспечивают степень переработки не более 60%, а отношение веса отходов к весу золы не превышает 5:1.

Результаты испытаний установок плазменной газификации отходов различного химического состава показали, что содержание токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу, и их содержание в твердых остатках, образующихся в процессе пиролиза отходов, ниже установленных существующими стандартами.

Для утилизации различных видов отходов разработаны два процесса, основанные на использовании дуговой плазмы в качестве источника нагрева для высокотемпературной газификации их органической или углеродсодержащей компоненты. Плазмообразующим газом является водяной пар.

Первый процесс реализуется с использованием плазменной установки с паровым плазмотроном. Технологическая схема процесса включает плазменный реактор и механизмы загрузки и подачи отходов. Нагрев плазмообразующего газа осуществляют один или несколько плазмотронов постоянного тока. Процесс плазменной газификации нечувствителен к влажности обрабатываемых отходов. В газе отсутствуют окислы азота и кислород, поэтому газ не взрывоопасен [2].

Использование паро-плазменной конверсии позволяет ожидать значительно более высокую степень превращения материалов отходов (независимо от их состава) в целевой продукт – синтез-газ. Оценка энергоэффективности этого метода плазменной газификации показывает, что 1 кг отходов (целлюлозы – 60%, полиэтилена – 30% и жидкости – 10%) требует около 1 кВт·ч электроэнергии, которая расходуется на диссоциацию этих веществ с получением синтез-газа в количестве 1,1 – 1,4 Нм³. При сгорании синтез-газа выделяется теплота с общей энергией 125,45 ккал на один грамм-моль. Это соответствует 2800 ккал/Нм³, что эквивалентно 3,26 кВт·ч электроэнергии. Таким образом, в результате плазменной

газификации из 1 кг отходов образуется такое количество синтез-газа, которое эквивалентно количеству энергии, равному 3,59 – 4,56 кВт·ч.

Использование синтезированного газа для автономного энергоснабжения плазменной установки позволяет существенно снизить электрические затраты на переработку отходов, и тем самым сделать энергонезависимым процесс их переработки.

Второй паро-плазменный процесс переработки жидких отходов основан на поперечной прокачке водоорганической суспензии через зону электродугового разряда, расположенного между двумя угольными электродами, погруженными в жидкость. Электрическая дуга, находящаяся в газовом «пузыре», обеспечивает перевод компонентов суспензии в газообразное состояние, а уровень температуры в зоне реакции (порядка 3900 °С) – высокую степень превращения отходов в синтез-газ. Образующиеся в ходе реакции продукты содержат достаточно много водяного пара. Водяной пар конденсируется, а горячую дистиллированную воду можно использовать в качестве теплоносителя для местной системы отопления.

Основы этого процесса разработаны американским ученым Ругерро Мариа Сантили в 1978 г. [3]. Химический состав полученного газа, исследованный Р. Сантили, следующий: Н₂ – 40-45%, СО – 55-60%, СО₂ – 1-2%. Для переработки можно использовать суспензию микроводорослей хлореллы, отработанные моторные масла, антифриз, растворители, нефтешламы, отходы растительных масел, жировые эмульсии и стоки мясоперерабатывающих предприятий, сахарных заводов, жидкие отходы крупных комплексов по выращиванию КРС, свиней и птицы. Конденсированная вода может использоваться для бытовых целей и теплообеспечения помещений. Разработанная нами схема процесса паро-плазменной переработки отходов с использованием синтез-газа для получения электрической энергии изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схема паро-плазменного процесса переработки отходов с генерацией электрической энергии

Проведенные испытания такого газообразного топлива для автомобилей показали, что оно по экологической чистоте выхлопных газов существенно превосходит бензин и метан. Один литр бензина, в зависимости от состава исходного сырья, эквивалентен 1,0 – 1,3 Нм³ такого газа.

В Институте теплофизики СО РАН разработан плазмотрон, не имеющий каких-либо ограничений по ресурсу работы электродов, отличающийся тем, что внутри герметичного корпуса две реакционные камеры со специальными ваннами [4]. В ванны загружается металлический лом. Под воздействием дугового разряда металл плавится. Отходы подаются в «анодную» и «катодную» камеры плазмотрона на зеркало расплавленного металла. Плазмохимическая газификация отходов осуществляется в разрядных камерах плазмотрона-реактора при температуре 1300 °С. Продукты газификации выводятся из камер плазмохимического реактора и поступают в систему газоочистки.

Во время работы на поверхности металла образуется слой расплавленного шлака. Шлак удаляется по мере накопления или непрерывно.

Использование жидких электродов позволяет в широком диапазоне регулировать мощность реактора. На базе нового плазмотрона разработан плазмохимический процесс утилизации самых опасных органических отходов. Реактор с успехом может быть использован также и для переработки различных твердых, жидких сельскохозяйственных и бытовых отходов.

Выводы

Использование плазменных технологий дает возможность не только избавиться от отходов, но и получить дополнительную электрическую энергию и тепло. В данном случае речь идет об использовании поршневых и газотурбинных генераторных установок.

Технология комбинированной выработки энергии позволяет кратно увеличить экономическую эффективность использования газа, в особенности, когда в одном процессе производятся два вида энергии – электрическая и тепловая. Поэтому миниТЭС, работающие на принципе когенерации, – это будущее сельскохозяйственной энергетики.

Литература

1. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов / *Б.Е. Патон, А.В. Чернец, Г.С. Маринский, С.В. Петров* // Современная электрометаллургия. 2005. №3. С. 54-63.
2. <http://plazer.com.ua/> *С.Н. Петров, Г.С. Маринский, А.В. Чернец, В.Н. Коржик, В.М. Мазунин*. Применение паро-плазменного процесса для пиролиза органических, в том числе медицинских и других отходов.
3. *Santilli R.M.* The novel magnecular species of hydrogen and oxygen with increased specific weight and energy content: Preprint Institute for basic research IBR-TC-033, 2001 // *J. of hydrogen energy*. – Pergamon Press, Oxford, England.
4. Плазменная электротехнология и оборудование для переработки углеродсодержащих техногенных отходов / *А.И. Алиферов, А.С. Аньшаков, П.В. Домаров, В.С. Чередниченко* // Энергетика в глобальном мире. Сборник тезисов докладов Первого международного научно-технического конгресса (Красноярск, 16-18 июня 2010 г.). – Красноярск: ООО «Версо», 2010. С. 120–121.

СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВ СЛОЖЕНИЯ МОЩНОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ НА МАГНЕТРОНАХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ АПК

Академик Россельхозакадемии Д.С. Стребков, Ю.М. Егоров, канд. биол. наук М.Ю. Росс, доктор хим. наук Ю.М. Щекочихин, канд. техн. наук В.Г. Чирков (ГНУ ВИЭСХ)

Разработаны устройства, позволяющие осуществлять сложение мощностей нескольких магнетронов средней мощности. Рассмотрены различные варианты схем сложения мощностей магнетронов, отличающиеся не только количеством магнетронов, но и электродинамическими схемами суммирования их мощностей.

Ключевые слова: Магнетроны, сложение мощностей, безэховая камера, частота генерации.

Развитие современного промышленного производства требует внедрения высокоэффективных технологий, позволяющих повышать качество продукции, увеличивать производительность и снижать энергозатраты на единицу выпускаемой продукции. К таким технологиям относятся СВЧ технологии, использующие электромагнитное СВЧ излучение, разработка которых началась в конце прошлого века для многих областей производства, где требуется и оказывается эффективным быстрый нагрев или полевое воздействие на обрабатываемый материал. Но широкого применения в промышленности СВЧ технологии не нашли из-за высокой стоимости мощных СВЧ генераторов и сложности их обслуживания.

Создание направленных потоков электромагнитной энергии сантиметрового диапазона с уровнем мощности до 100 кВт является актуальной задачей для использования в различных технологических процессах объемного нагрева веществ: спекание при производстве керамических материалов, сушка зерна и древесины, активизация диффузионных процессов и химических реакций и т.п.

Существующие унитарные источники непрерывного излучения имеют, как правило, высокую стоимость (1 кВт ~ 1000\$), ограниченный ресурс работы (менее 5000 часов) и требуют высокой квалификации обслуживающего персонала. Сложности в техническом смысле выражаются в использовании высоких уровней питающего напряжения (до 50 кВ) и применения мощных систем охлаждения коллектора (анода) приборов.

Device designed to allow the addition of capacities of several low – power magnetrons. The paper considers the different options of addition capacities of magnetrons schemes, which differ not only in the number of magnetrons, but also the electrodynamic schemes of the summations of their capacity.

Keywords: Magnetrons, the addition of capacity, anechoic chamber, the frequency of oscillation.

Высокая стоимость генераторов является одной из основных причин, сдерживающих применение СВЧ генераторов в различных технологиях.

Выходом из положения является разработка модульных систем на базе относительно недорогих массово выпускаемых магнетронов для бытовых печей. Такие СВЧ генераторы, в которых складываются мощности нескольких отдельных магнетронов, будут существенно дешевле моноблочных магнетронов на одинаковую мощность.

Решение этой задачи существенно не только с точки зрения продвижения СВЧ технологий в различные отрасли промышленности, но и представляет самостоятельный интерес для развития СВЧ техники. СВЧ генераторы на базе бытовых магнетронов, безусловно, найдут себе применение в технологических установках и могут реализоваться потребителями по другому назначению (например, для научных исследований).

Целью настоящей работы является решение задачи по созданию устройства, позволяющего осуществить сложение мощностей нескольких (более 3-х) магнетронов средней мощности (0,8÷1 кВт) от бытовых печей, которые в больших количествах выпускаются по всему миру и имеют низкую стоимость. Ранее неоднократно предпринимались попытки сложения мощностей нескольких магнетронов, но они не увенчались успехом из-за «конфликта» магнетронов между собой и быстрого выхода их из строя. Из литературы известно [1], что удалось сложить мощности двух и трех магнетронов с применением развязывающих элементов: двой-

ных волноводных тройников, вентилях и циркуляторов. Но этот путь решения приводит к значительному увеличению массы, габаритов и стоимости такого устройства.

В процессе проведения работы рассматривались различные варианты схемы сложения мощностей магнетронов, отличающиеся не только количеством магнетронов, но и электродинамическими схемами суммирования их мощностей.

Из литературы известно сложение мощностей СВЧ генераторов на основе полупроводниковых приборов (транзисторы, диоды Ганна и т.п.) [2], а также на основе электровакуумных приборов (отражательные клистроны, магнетроны и т.п.) [1, 3]. В частности, в работе [3] описано устройство «Многофункциональный сумматор СВЧ мощности», работающий на 3-х магнетронах. В описанном устройстве мощности 3-х генераторов складываются с использованием двойного волноводного тройника и шестигранного волновода, к тому же применяются фазовращатели в прямоугольных волноводах, обеспечивающие поляризационную развязку между генераторами. Устройство обеспечивает КПД суммирования 95% в режиме взаимной синхронизации и одночастотных колебаний, а также в режиме многочастотных колебаний с некоторым увеличением частоты.

Недостатком этого устройства является наличие большого числа СВЧ элементов: двойного волноводного тройника, шестигранного волновода и фазовращателей, с помощью которых достигается результат. Эти дополнительные к СВЧ генераторам элементы приводят к увеличению материалоемкости всего устройства – повышается вес, увеличиваются габаритные размеры всего устройства и, как следствие, его стоимость.

Экспериментальная установка и методика измерений. В данной работе поставленная задача решалась, исходя из требований простоты изготовления, сборки и обслуживания устройства, а также минимизации его габаритов,

веса и стоимости. После проведения анализа совместной работы нескольких магнетронов, нагруженных на прямоугольный резонатор, выбор был остановлен на структуре, схема которой приведена на рис. 1. Резонатор представляет собой прямоугольный волновод с размерами $A \times B \times L$, где $A > \lambda_0/2$; $B < \lambda_0/2$; $L \sim n \cdot \lambda_0/2$ (λ_0 – длина волны, соответствующая рабочей частоте магнетрона, n – число магнетронов). В верхней стенке $A \times L$ сделаны щели связи – прорезы в виде «бубликов» напротив каждого вывода энергии из резонатора в окружающее пространство. Узкие стенки $B \times L$ сделаны подвижными, чтобы изменять размер A для настройки структуры на максимальную выходную мощность.

Поскольку предлагаемая схема сложения мощностей излучает в свободное пространство, то система диагностики должна обеспечивать в любой точке диаграммы направленности измерение напряженности поля E или плотности потока мощности S . Напряженность электрического поля E измерялась с помощью датчика поля (штыревой антенны), подключенного к детекторной головке, выход которой соединялся с осциллографом. Между антенной и детекторной головкой включался аттенюатор с ослаблением $10 \div 20$ дБ для обеспечения работы детектора в квадратичной области вольтамперной характеристики, где выходной сигнал пропорционален мощности излучения ($P_{\text{изл}} \sim E^2$). На рис. 2 дана схема расположения датчиков поля под структурой.

Измерения распределения поля на границе «ближняя» - «дальняя» зона. Измерялось распределение поля, излучаемого структурой. Для этого использовался деревянный ящик с внутренними стенками, выложенными поглощающим пористым материалом. В середине дна ящика по его длине прорезана щель, в которую снизу помещалась дипольная антенна, прикрепленная к каретке, которая могла перемещаться вдоль прорези. Сигнал с дипольной антенны детектировался и передавался на запоминающий

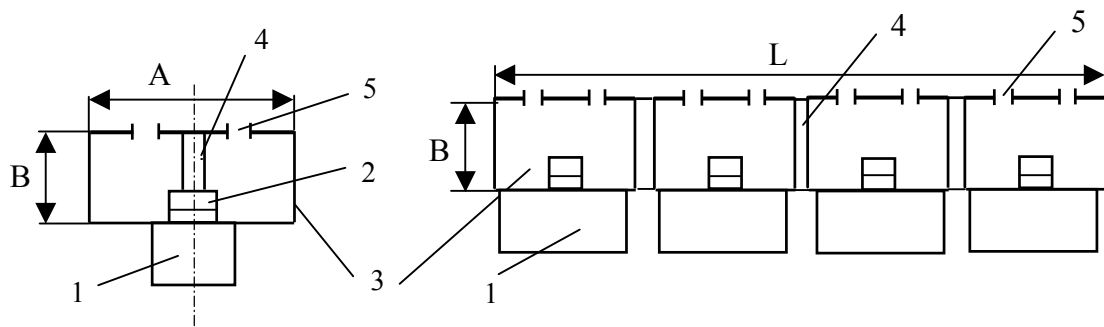
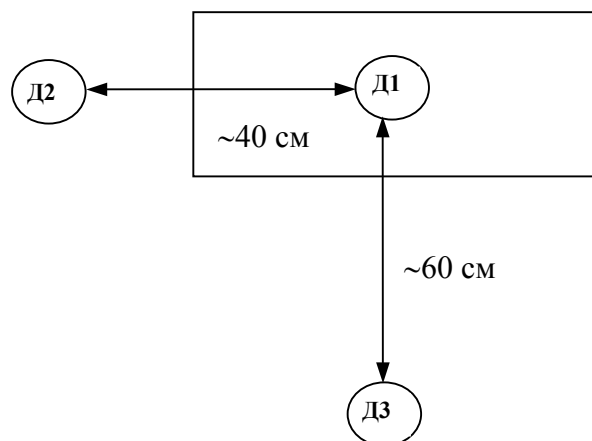


Рис. 1. Схема сложения мощностей четырех магнетронов:
1 – магнетрон; 2 – штырь возбуждения (вывод энергии магнетрона); 3 – резонатор;
4 – селекционная вставка; 5 – щель связи



Расстояние между структурой
и плоскостью расположения
датчиков $h \sim 1,5$ м

Рис. 2. Схема расположения датчиков поля под структурой

осциллограф. Ящик располагался на расстоянии $\sim 1,5$ м ниже структуры. Перемещая дипольную антенну от одной стенки ящика до другой, снималось распределение поля на указанном расстоянии вдоль структуры (рис. 3).

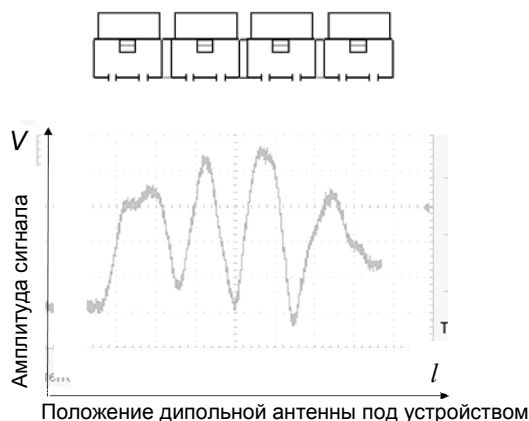


Рис. 3. Распределение поля при работе 4-х магнетронов

Вид распределения излучаемого поля вдоль структуры говорит о том, что излучение когерентно, т.е. магнетроны работают на одной частоте – в режиме взаимной синхронизации. Если бы не было взаимной синхронизации излучения, то каждый магнетрон работал бы на своей частоте и распределение поля было бы неправильной формы (наблюдалось бы наложение полей от каждого отдельного магнетрона).

Зависимость выходных параметров структуры от расстояния между узкими стенками $B \times L$. На первом этапе исследований диагностика величины излучения осуществлялась с помощью датчиков поля (рис. 2). Сначала поочередно включалось по одному магнетрону.

Для каждого магнетрона с помощью осциллографов измерялась величина сигнала с датчика в mV и волномером 42-9А – частота излучения. Затем одновременно включались 4 магнетрона и фиксировались величины амплитуд сигналов с датчиков и частота излучения. Результаты этих измерений приведены на графиках рис. 4 – 6.

Как видно из графиков, в большинстве случаев сигналы с датчиков от 4-х магнетронов несколько меньше арифметической суммы сигналов от отдельно работающих магнетронов.

Во всех случаях измерений (по датчикам поля) максимальная выходная мощность излучения структуры с указанными магнетронами имеет место при расстоянии между узкими стенками $A \approx 60 \div 62$ мм. Но при этом частота излучения на $50 \div 60$ МГц выше рабочей частоты магнетронов и равна ~ 2510 МГц (при $f_p = 2447$ МГц).

Учитывая нагрев структуры от 20 до 60°C за 1 час работы, очевидно, что часть неучтенной энергии тратится не только на излучение по сторонам, но и на потери внутри структуры, приводя к ее нагреву. Как видно из графиков на рис. 4 – 6, с уменьшением расстояния между узкими стенками (размер A от 100 мм и менее) увеличивается выходная мощность излучения и повышается его частота. При величине $A \sim 60 \div 62$ мм наблюдается максимальная частота излучения (рис. 5). С дальнейшим уменьшением размера A резко снижается мощность излучения, а частота излучения становится даже ниже собственной частоты магнетронов (графики на рис. 5), происходит «перескок» частоты. Это свидетельствует о том, что магнетроны вынуждены работать на резонансной частоте структуры, которая определяется соотношением

размеров $A \times B \times L$, и в данном конкретном случае изменяется с изменением размера A . Явления перескока частоты генерации при изменении одного из параметров связи между двумя гене-

раторах и вынужденная работа генераторов на резонансной частоте системы связи теоретически рассчитаны и описаны в работе [4].

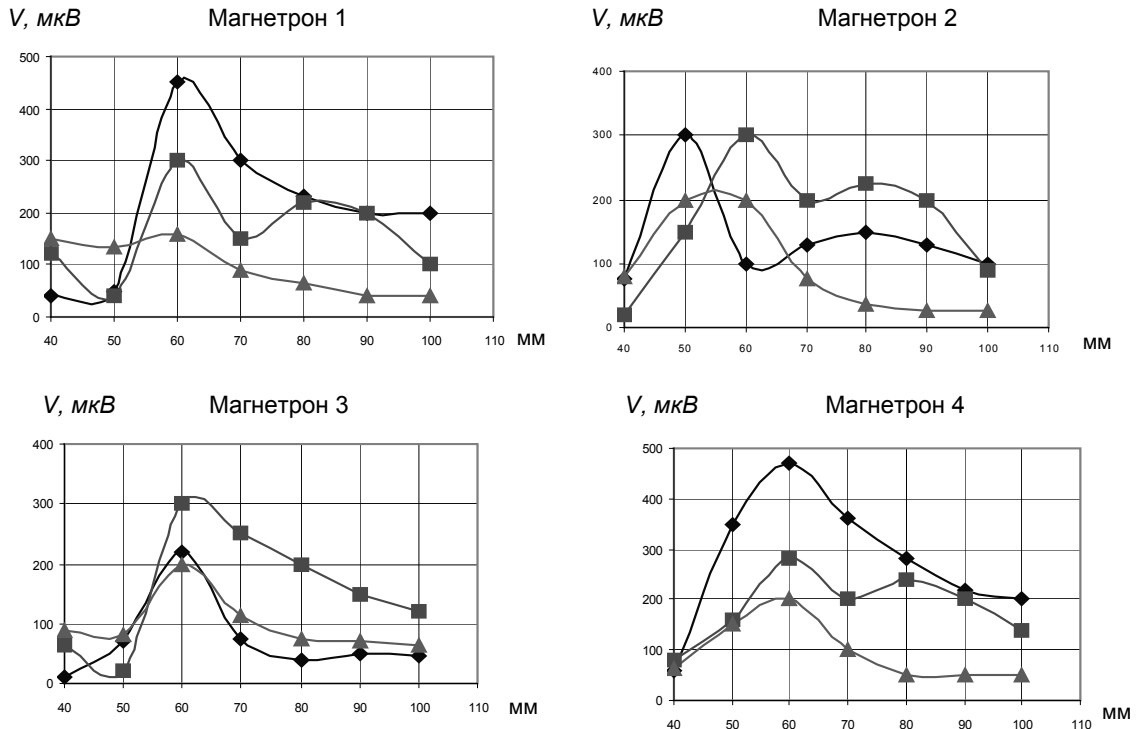


Рис. 4. Сигналы с датчиков поля для каждого магнетрона

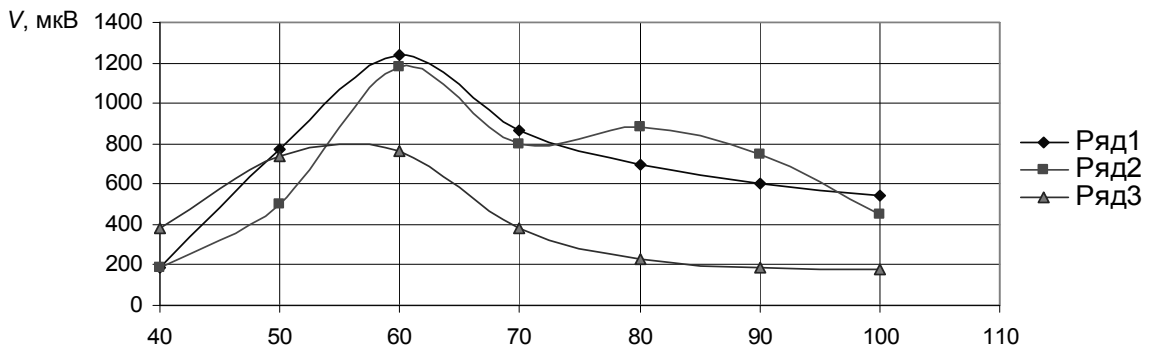


Рис. 5. Сигналы с датчиков поля для 4-х магнетронов

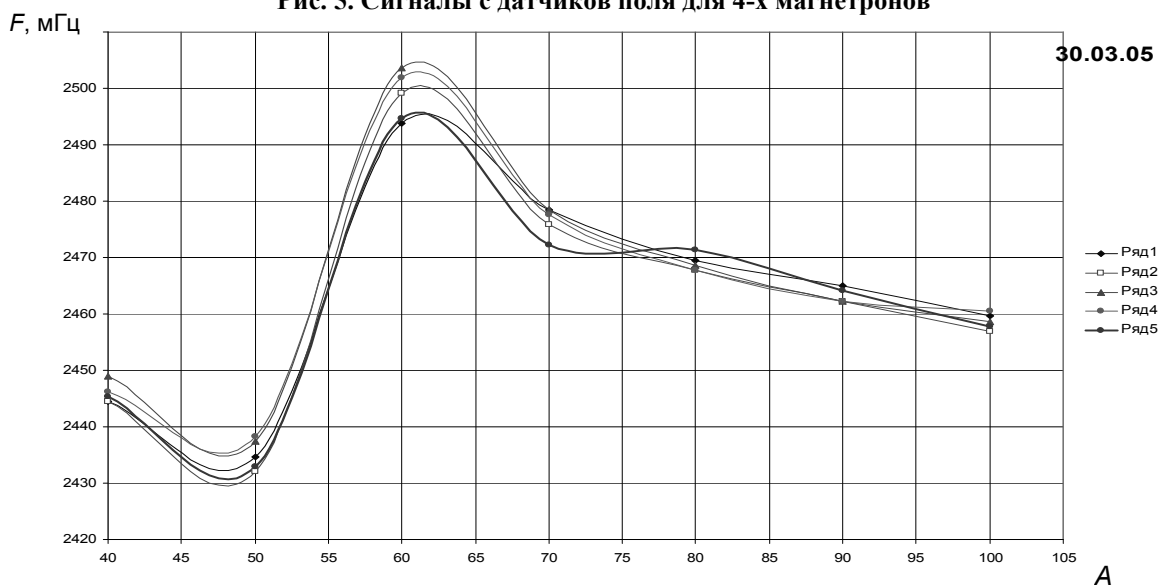


Рис. 6. Зависимость частоты излучения от размера широкой стенки A

Зависимости выходных параметров структуры от формы и размеров щелей излучения. В структуре по сложению мощностей использовались три вывода энергии (ВЭ) со щелями излучения различных размеров и формы (сторона $A \times L$), схематические изображения которых приведены на рис. 7.

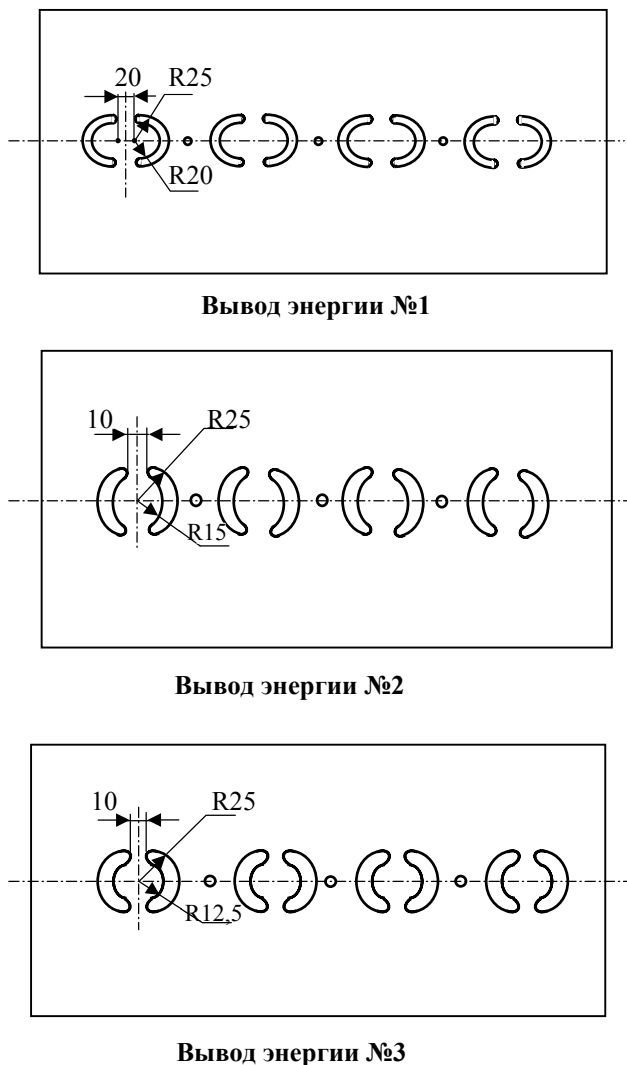


Рис. 7. Формы вывода энергии излучения

Дальнейшее исследование структуры с различными выводами энергии показало, что при увеличении площади щелей выходная мощность излучения увеличивается, но максимум её соответствует той же величине $A = 60-62$ мм, а частота излучения при этом снижается. Очевидно, дальнейшее увеличение площади щелей излучения (при этом сохраняется величина $A = 60-62$ мм) приведёт к ещё большему снижению частоты излучения и при равенстве её рабочей частоте магнетронов (на которой КПД работы магнетронов максимален) получим максимальную выходную мощность такой системы.

Исследование системы сложения мощностей, выполненной на прямоугольном медном резонаторе с размером широкой стенки

$A = 60$ мм. Исходя из полученных результатов, описанных выше, была сконструирована и изготовлена система для сложения мощностей четырёх магнетронов на медном прямоугольном резонаторе с размером широкой стенки 60 мм (рис. 8 – 10)

Поскольку схема генерирует на собственной резонансной частоте структуры, которая выше рабочей частоты магнетронов, то очевидно, что максимум выходной мощности будет достигнут тогда, когда собственная резонансная частота структуры совпадает с рабочей частотой магнетронов, на которой реализуется их максимальный КПД. Дальнейшее увеличение площади излучающих щелей приведет к уменьшению собственной резонансной частоты структуры, которая станет ниже рабочей частоты магнетронов и приведет, как следствие, к снижению выходной мощности схемы и, в конечном счете, к исчезновению режима взаимной синхронизации работы магнетронов.

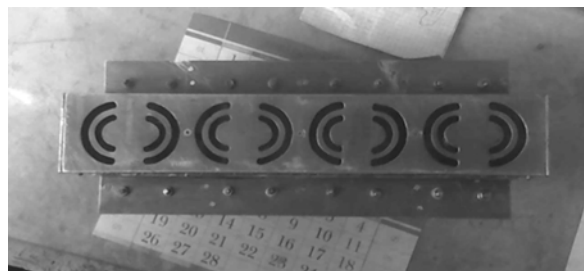


Рис. 8. Система для сложения мощностей магнетронов



Рис. 9. Конструкция волноводной структуры



Рис. 10. Рупор для формирования направленности излучения

Конструкция. Используя данные, полученные в результате исследований структуры с перемещающимися узкими стенками, была разработана конструкция волноводной структуры, с помощью которой осуществлялось сложение мощностей магнетронов, т.е. взаимная синхронизация работы магнетронов. Внешний вид этой конструкции на рис. 9.

Конструкция структуры представляет собой прямоугольный волновод 60×45 мм, изготовленный из стандартного медного волновода 90×45 мм, и имеющий такую длину, чтобы на ней разместилось 4 магнетрона вплотную друг к другу. Выводы энергии магнетронов вводятся в волновод через отверстия в широкой стенке по оси ее симметрии. На противоположной широкой стенке располагаются излучающие щели в виде «бубликов» (рис. 8). На узких стенках вдоль волновода расположены кронштейны для крепления магнетронов и вентиляторов воздушного охлаждения магнетронов. Торцы волновода закорочены латунными вставками 60×45 мм. Между магнетронами внутри волновода симметрично расположены закорачивающие штыри, обеспечивающие селекцию (подавление) высших мод. Соединения с волноводом закорачивающих вставок на торцах волновода и закорачивающих штырей внутри волновода тщательно пропаены.

Для формирования направленности излучения на структуру со стороны излучающих щелей укреплялся рупор с углом раскрытия 60° (рис. 10).

Исследование характеристик схемы сложения мощностей 4-х магнетронов OM75S(21). Структура с установленными в ней магнетронами, вентиляторами охлаждения, блоками питания располагалась в «безэховой камере» (рис. 11, 12).



Рис. 11. Безэховая камера

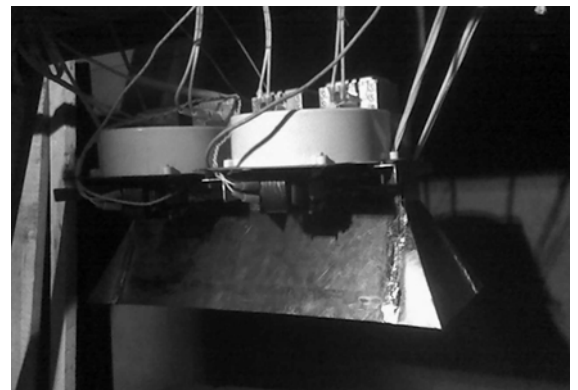


Рис. 12. Устройства сложения мощностей

Частотные и спектральные характеристики схемы сложения исследовались с помощью волномера Ч2-9А. В ходе эксперимента проверялась работа схемы сложения мощностей при работе магнетронов как по одному, четырех магнетронов вместе, так и различных сочетаний из четырех магнетронов.

Из рис. 13 видно, что при совместной работе 4-х магнетронов в такой схеме сложения, ширина спектра частот излучения сужается

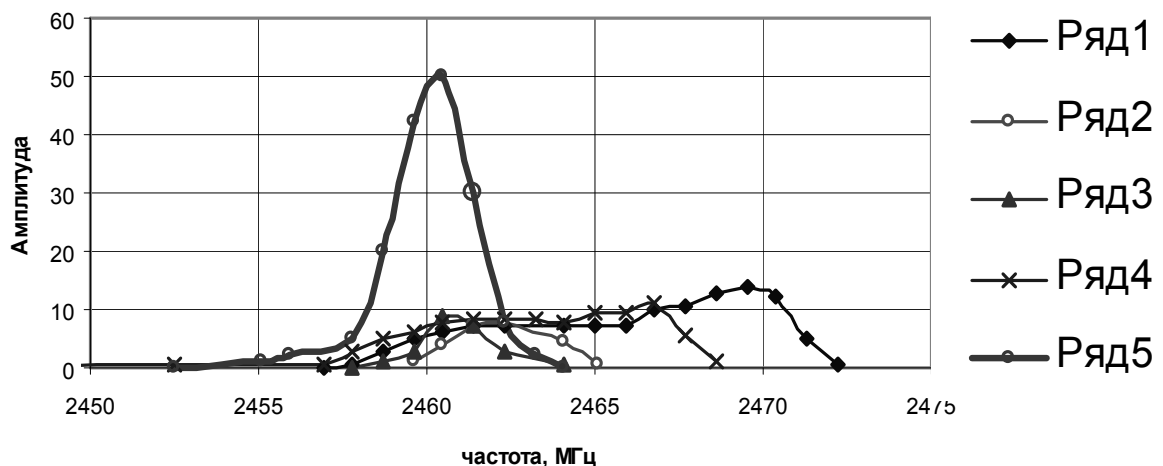


Рис. 13. Работа магнетронов по одному и работа 4-х магнетронов вместе

по сравнению со спектром одного магнетрона. Это подтверждает теоретические расчёты, приведённые в работе [5], где показано, что чем больше число связанных генераторов, тем становится уже ширина спектра генерируемых частот.

Измерения мощности схемы сложения мощностей 4-х магнетронов с излучением в камеру. В экспериментах схема работала на металлическую камеру, в которой были установлены три сосуда с водой с конусной верхней частью суммарной массой 9,3 кг. Мощность измерялась калориметрическим методом по нагреву воды. Предполагалось, что излучение из объема в окружающее пространство незначительно, и можно считать, что большая часть генерируемой мощности поглощалась водой.

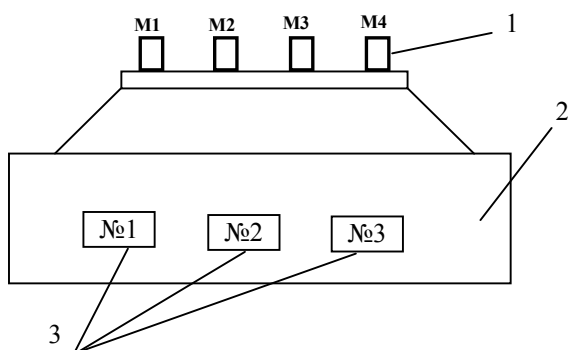


Рис. 14. Схема эксперимента:

- 1 – блок магнетронов с рупорной антенной;
2 – камера;
3 – водяные поглотители

Схема эксперимента представлена на рис. 14. Начальная температура воды составляла $T_{нач} = 23^\circ\text{C}$. В процессе эксперимента магнетронный модуль включался на 7 мин. За это время температура поглотителей достигла соответственно 52, 42 и 46°C . Мощность, затраченная на нагрев воды, равна

$$P = 4,187 \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t}, \quad (1)$$

где m – масса воды; ΔT – разность температуры до и после нагрева; t – время работы; c – удельная теплоемкость воды.

Таким образом,

$$P = 3100 \cdot 19 / 420 + 3100 \cdot 29 / 420 + 3100 / 420 = 2200 \text{ Вт.}$$

Погрешность измерений составляет 5%.

Предварительно были измерены мощности отдельных магнетронов:

$$P_1 = 775 \text{ Вт, } P_2 = 776 \text{ Вт, } P_3 = 773 \text{ Вт, } P_4 = 712 \text{ Вт.}$$

Сумма мощностей отдельных магнетронов $\sum P_i = 3034$ Вт. Отсюда следует, что КПД схемы сложения мощностей 4-х магнетронов составляет

$$\eta = \frac{P_{вых}}{\sum_{i=1}^4 P_i} = \frac{2200}{3034} = 0,725. \quad (2)$$

При расчете КПД не учитывались отражение мощности от нагрузки с водой и рассеяние отражённой мощности в окружающее пространство, что может увеличить КПД схемы сложения до $0,75 \div 0,8$.

Временные и температурные режимы работы схемы сложения. Суммарное время работы схемы составило около 30 часов. Максимальное время непрерывной работы 5 часов. Во всех случаях наблюдалась стабильная величина выходной мощности, о чем свидетельствовали постоянные амплитуды сигналов с трех датчиков поля на осциллографе. Так же была стабильна во времени частота излучения, измеряемая волномером. При этом температура магнетронов не превышала 100°C , а температура самой структуры была не более 50°C .

В условиях эксперимента схема сложения мощностей показала себя как очень стабильное по всем параметрам генерирующее устройство.

Предложенная схема сложения мощностей магнетронов, разработанная и изготовленная на ее основе конструкция оказались работоспособными. Изменяя расстояние между узкими стенками (размер A , рис. 1) и площадь S излучающих щелей, удалось определить их оптимальные значения (A и S), соответствующие максимальной величине выходной мощности системы и длительной и стабильной работы магнетронов.

Наблюдался эффект перескока частоты (рис. 5) при изменении одного из параметров (A) области связи для нескольких генераторов.

Схема сложения на медном отпаянном волноводе показала устойчивую и стабильную работу в режиме взаимной синхронизации магнетронов в течение длительного времени (более 5 часов непрерывной работы) при когерентном излучении. При этом КПД схемы составил 72% от суммарной мощности магнетронов ($P_{изм} = 2200$ Вт при суммарной мощности 4 магнетронов 3030 Вт).

Выводы

1. Определены условия взаимной синхронизации 4-х магнетронов, при которых суммарная выходная мощность в сей системы достигает максимального значения. КПД сложения мощностей составляет 0,75-0,8.

Одно из этих условий: размер широкой стенки прямоугольного резонатора равен половине длины волны, соответствующей рабочей частоте магнетронов.

2. Показано, что при сложении мощностей происходит сужение полосы генерации системы по сравнению с полосой генерации одного магнетрона в данной системе, а сдвиг амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы происходит в нижнюю область частот.

3. При увеличении площади щелей, через которые выводится излучение в окружающее пространство, резонансная частота системы связи снижается и при равенстве её рабочей частоте магнетронов достигается максимальная выходная мощность всей системы.

4. Экспериментально подтверждён перескок частоты генерации при изменении одного из параметров системы связи между магнетронами, а также эффект затягивания частоты работающих магнетронов на собственную частоту системы связи.

Литература

1. Дейвид Х. Анализ характеристик генерирующих систем. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. С. 338-342.
2. Галдецкий А.В. и др. Сложение мощностей полевых СВЧ-транзисторов в двухсантиметровом диапазоне длин волн // Радиотехника. 2007. №3. С. 50-52.
3. Ильин С.Ч., Ильин В.С., Лобанов В.Г., Хоркина А.А. Многофункциональный сумматор СВЧ мощности // Тезисы докладов VI Всесоюзной научно-практической конференции «Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях». Саратов, 1991. С. 113.
4. Хохлов Р.В. Об одном случае взаимной синхронизации отражательных клистронов // Радиотехника и электроника. 1956. №1. С. 88-97.
5. Канавец В.И., Стабинис Ю.А. Сужение спектра генераторов с близкими частотами при взаимной синхронизации // Радиотехника и электроника. 1972. Т. XVII, вып. 19. С. 2124-2129.

АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ МНОГОСТЕПЕННЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Канд. техн. наук Б.А. Никитин, канд. техн. наук В.А. Гусаров (ГНУ ВИЭСХ)

В работе приведены алгоритмы решений приведенных полных уравнений 3-й и 4-й степеней. Общим подходом к этим решениям является первоначальный перевод их в неполные. Решение кубических уравнений достигается предположением, что их корни представляются в виде суммы двух слагаемых, которые корректно находятся по общеизвестным правилам. Уравнения 4-й степени представляются в виде произведения двух уравнений 2-й степени, коэффициенты которых перед членами более низких степеней находятся из системы уравнений, связывающих их с коэффициентами исходного уравнения.

Ключевые слова: уравнения 3-й и 4-й степеней, фотоэлектричество, ветроэнергетика.

При выполнении ряда теоретических задач в области фотоэлектричества и ветроэнергетики возникает необходимость анализировать возможные решения уравнений высших степеней (3 и выше). Так, вырабатываемая фотоэлектрическим модулем (солнечной батареей) мощность аппроксимируется в работе [1] с четвертой степенью косинуса угла солнцестояния относительно горизонта. В работах [2] и [3] удельная мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости потока воздуха.

Трудности проведения анализа возможных решений связаны с тем, что в специальной литературе отсутствует само корректное решение такого рода уравнений, и лишь в постулатной форме излагается итоговое резюме (формула Кардано и т.д.). В такой же постулатной форме рассматриваются их корни. Например, в справочнике по высшей математике [4], случай отрицательных значений дискриминанта кубического уравнения назван «неприводимым, поскольку необходимо извлекать кубические корни из комплексных чисел». Следует отметить, что впервые решение кубического уравнения было найдено в 1535 году итальянским математиком Николо Тарталья, будущим зятем Д. Кардано, который и опубликовал решение на десять лет позже.

В настоящей работе поставлена актуальная задача устранения отмеченных выше трудностей в части проведения самого решения уравнений третьей и четвертой степени и анализа их корней.

In work algorithms of decisions of the resulted full equations 3rd and 4th degrees are resulted. The general approach to these decisions is their initial transfer in incomplete ones. The decision of the cubic equations is reached by the assumption that their roots are represented in the form of the sum of two composed which correctly are by well-known rules. The equations of 4th degree are represented in the form of product of two equations of 2nd degree which factors before members of lower degrees are obtained from system of the equations connecting them with factors of the initial equation.

Keywords: equations 3rd and 4th degrees, photovoltaic, wind power engineering.



Рис. 1. Никколо Тарталья

Рассмотрим кубическое уравнение общего вида:

$$Dz^3 + Az^2 + Bz + C = 0. \quad (1)$$

Трансформируя его в приведенное, получим:

$$z^3 + A_1z^2 + B_1z + C = 0, \quad (2)$$

где A_1, B_1, C_1 – соответствующие коэффициенты выражения (1), деленные на D.

Если ввести новую неизвестную, положив, что

$$z = x + \varphi,$$

где φ есть некоторая фиксированная величина, получим:

$$x^3 + (3\varphi + A_1)x^2 + (3\varphi^2 + 2A_1\varphi + B_1)x + (\varphi^3 + A_1\varphi^2 + B_1\varphi + C_1) = 0. \quad (3)$$

Выбирая соответствующие значения величины φ , можно обнулить коэффициенты либо перед второй степенью неизвестной, либо перед первой ее степенью. Обнуление вновь получен-

ного свободного члена равносильно решению исходного выражения (2), т.е. возвращает нас на исходные позиции.

Положив, что

$$3\varphi + A_0 = 0 \text{ или } \varphi = -\frac{A_0}{3},$$

получаем неполное кубическое уравнение в виде:

$$x^3 + B_0 x + C_0 = 0, \quad (4)$$

где B_0 и C_0 – коэффициенты при соответствующих степенях новой неизвестной при

$$\varphi = -\frac{A_0}{3}.$$

Решению именно этого уравнения посвящена приводимая в справочниках формула Тарталья (Кардано). Ход решения заключен в том, что неизвестная x представляется состоящей из двух слагаемых, т.е.:

$$x = m + n. \quad (5)$$

Тогда, оставив x^3 в левой части выражения (4) и сопоставив его с раскрытием x^3 в виде его слагаемых, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} x^3 = -B_0 x - C_0 \\ x^3 = m^3 + 3m^2n + 3mn + n^2 \end{cases} \quad (6)$$

После перегруппировки слагаемых в правой части нижнего уравнения, имеем:

$$\begin{cases} x^3 = -B_0 x - C_0 \\ x^3 = 3mnx + (m^3 + n^3) \end{cases} \quad (7)$$

Два многочлена считаются равными в том и только том случае, когда равны их коэффициенты при одинаковых степенях неизвестной.

Откуда следует, что:

$$\begin{cases} 3mn = -B_0 \\ m^3 + n^3 = -C_0 \end{cases} \quad (8)$$

Имеем систему двух уравнений с двумя неизвестными, которую и предстоит решить.

Поскольку $m^3 + n^3$ есть некоторое действительное число, то эту же сумму можно представить как сумму двух среднеарифметических чисел с отклонениями в сторону плюса и минуса каждая, т.е.:

$$\begin{cases} m = \sqrt[3]{P+Q} \\ n = \sqrt[3]{P-Q} \end{cases} \quad (9)$$

Тогда

$$m^3 + n^3 = 2P = -C_0. \quad (10)$$

Из этого следует, что среднеарифметическая величина P определяется:

$$P = -\frac{C_0}{2}. \quad (11)$$

Утроенное произведение чисел m и n согласно выражению (8), составит:

$$3\sqrt[3]{P^2 - Q^2} = B_0. \quad (12)$$

Из полученного выражения следует, что:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{-C_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_0}{3}\right)^3}. \quad (13)$$

В итоге согласно выражению (5) имеем решение неполного кубического уравнения, соответствующее формуле Тарталья (Кардано):

$$\begin{aligned} x_{123} = & \sqrt[3]{\frac{-C_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{-C_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_0}{3}\right)^3}} + \\ & + \sqrt[3]{\frac{-C_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{-C_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_0}{3}\right)^3}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Анализ корней кубического уравнения следует начать с вопроса избежания появления лишних корней. Каждый из двух кубических радикалов выражения (14) в общем случае дает по три корня, а в совокупности шесть. Однако уравнение третьей степени должно иметь всего три корня. Для того чтобы избежать отсева лишних корней методом Эдисона, следует использовать правило согласованного по фазе извлечения кубического корня в каждом слагаемом. Под однофазным извлечением кубического корня следует понимать введение одинакового числа дополнительных периодов в главное значение аргумента тригонометрической формы рассматриваемого числа. Вторым и, можно сказать, основным вопросом анализа корней кубического уравнения является оценка его дискриминанта, т.е. подкоренного выражения квадратного радикала, которое в зависимости от значений C_0 и B_0 исходного кубического уравнения может быть больше нуля, меньше нуля и равно нулю.

В случае его положительного значения, арифметический квадратный радикал из него будет иметь положительное действительное

значение, а оба подкоренные значения кубических радикалов будут действительными числами. Это обстоятельство, совместно с однофазным извлечением кубических корней, обусловит появление трех корней кубического уравнения, один из которых действительное число, а два других комплексные числа. Из этого обстоятельства следует вывод:

при $D > 0$ x_1 – действительное число;

$$\sqrt[3]{R} \left[\sqrt[3]{\cos(\alpha + n2\pi) + i \sin(\alpha + n2\pi)} + \sqrt[3]{\cos[-(\alpha + n2\pi)] + i \sin[-(\alpha + n2\pi)]} \right] \quad (17)$$

где $R = \sqrt{M^2 + N^2}$;

$\sqrt[3]{R}$ – положительное действительное число;
 α – главный аргумент комплексного числа;
 n – число дополнительных периодов 2π ;
 $n = 0$ для первой фазы извлечения корня;
 $n = 1$ для второй фазы извлечения корня;
 $n = 2$ для третьей фазы извлечения корня.

Решениями для суммы слагаемых выражения (17) после сокращения их мнимых частей, соответственно по первой, второй и третьей фазам извлечения корня будут:

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt[3]{R} 2 \cos \frac{\alpha}{3} \\ x_2 = \sqrt[3]{R} 2 \cos \left(\frac{\alpha}{3} + 120^\circ \right) \\ x_3 = \sqrt[3]{R} 2 \cos \left(\frac{\alpha}{3} + 240^\circ \right) \end{cases} \quad (18)$$

Эти все три корня есть разные действительные числа, знаки которых определяются знаком косинусов соответствующих аргументов. Из этого следует вывод, что:

при $D < 0$ все три корня кубического уравнения есть действительные числа.

В случае $D = 0$ подкоренные выражения обоих кубических радикалов следует считать также сопряженными комплексными числами, коэффициенты, перед мнимыми частями которых равны нулю. Это обстоятельство определяет величину главного аргумента α , равную нулю или π . Это в свою очередь обуславливает получение всех трех корней кубического уравнения в виде действительных чисел, причем два из них равновелики, поскольку при $\alpha = 0$ $\cos 120^\circ = \cos 240^\circ$, а при $\alpha = \pi$ $\cos 60^\circ = \cos(60^\circ + 240^\circ)$.

Вывод: при $D = 0$ все три корня есть действительные числа, при этом $x_2 = x_3$.

x_2 и x_3 – комплексные числа. (15)

При $D < 0$, в случае его отрицательного значения, подкоренные выражения кубических радикалов будут представлять собой комплексные сопряженные числа типа:

$$\sqrt[3]{M + N_i} + \sqrt[3]{M - N_i} \quad (16)$$

Переведя эти числа в тригонометрическую форму согласно действиям (5), получим:

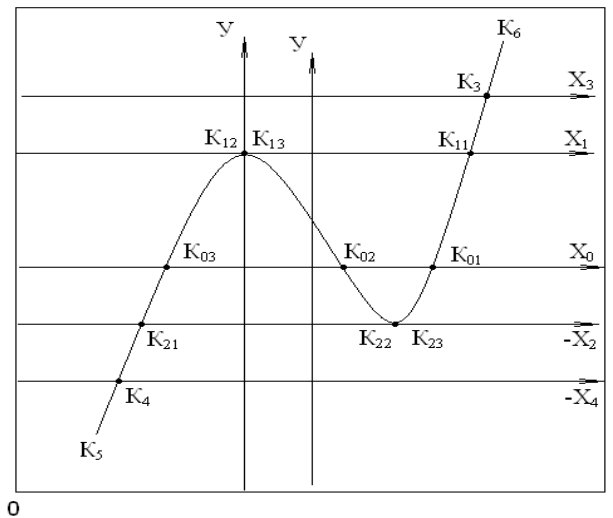


Рис. 2. Характерный вид кривой функции $Y = X^3 + B_0X + C_0$ с возможными точками пересечения K_1 с осью X при различных её положениях относительно экстремумов

В геометрической интерпретации полученные результаты можно рассматривать как пересечение функции неполного кубического многочлена $y = x^3 + B_0 + C_0$ с осью X , исходящей из начала координат. На рис. 2 схематично показана эта функция. Реальная форма кривой может несколько меняться в зависимости от величин B_0 и C_0 . Положение оси X относительно ординат производных этой функции так же может меняться в зависимости от этих величин, возможны три варианта: ось X проходит вне (выше или ниже) зигзага кривой y , либо внутри его, либо по самой его границе (верхней или нижней).

Ширину зигзага можно оценить диапазоном:

$$y_{02} < y < y_{01} \quad (19)$$

где y_{02} и y_{01} – значения ординат функции, соответствующие ее производным, равным нулю.

В ряде случаев при $B_0 > 0$ ординаты функции в экстремальных точках будут иметь недействительные величины.

В случае величины дискриминанта $D > 0$ рассматриваемая кривая пересекает ось X лишь в одной точке, абсцисса которой соответствует одному действительному корню (два других комплексные). На рис. 2 этот случай соответствует положению осей X_3 и X_4 .

В случае $D < 0$ кубическая кривая пересекает ось X в трех точках, что соответствует наличию трех действительных корней различной величины. На рисунке этому случаю соответствует положение оси X_0 .

В случае $D = 0$ кривая функции кубического многочлена пересекает ось X в одной точке и касается оси X своим экстремумом в другой точке. Точка пересечения функции с осью X соответствует одному действительному корню, а точка касания соответствует дополнительно двум другим действительным корням, равным между собой. Этот случай соответствует положению осей X_1 и X_2 .

Равенство друг другу всех трех корней кубического уравнения возможно лишь в случае равенства нулю коэффициентов B_0 и C_0 , что является частным случаем $D = 0$.

Этот случай соответствует тому, что исходное полное кубическое уравнение представляет собой полный куб двучлена, т.е.:

$$(x + \varphi)^3 = 0$$

При решении уравнения четвертой степени общего вида его необходимо первоначально трансформировать в приведенное, согласно выражению:

$$z^4 + Dz^3 + Az^2 + Bz + C = 0, \quad (20)$$

где D, A, B, C – действительные коэффициенты перед соответствующими степенями неизвестной.

Методом введения новой неизвестной x , положив, что:

$$z = x + \varphi,$$

где φ – некоторая действительная постоянная величина, при этом $\varphi = -\frac{D}{4}$,

получим неполное уравнение четвертой степени с нулевым коэффициентом при неизвестной в третьей степени.

$$x^4 + 0x^3 + A_0x^2 + B_0x + C_0 = 0, \quad (21)$$

где A_0, B_0, C_0 – коэффициенты неполного приведенного уравнения четвертой степени.

Полученное выражение (21) можно рассматривать как произведение двух квадратных приведенных уравнений со своими действительными коэффициентами при неизвестных соответствующих степеней:

$$(x^2 + B_1x + C_1)(x^2 + B_2x + C_2) = 0. \quad (22)$$

После раскрытия скобок выражения (22) уравнение четвертой степени принимает вид:

$$x^4 + (B_1 + B_2)x^3 + (B_1B_2 + C_1 + C_2)x^2 + (B_2C_1 + B_1C_2)x + C_1C_2 = 0. \quad (23)$$

Сопоставляя выражение (23) с выражением (21), получаем систему уравнений, связывающих коэффициенты искомого квадратного уравнения с коэффициентами решаемого уравнения четвертой степени:

$$\begin{cases} B_1 + B_2 = 0 \\ B_1B_2 + C_1 + C_2 = A_0 \\ B_2C_1 + B_1C_2 = B_0 \\ C_1C_2 = C \end{cases}. \quad (24)$$

Исходя из того, что $B_1 = -B_2$ из первого уравнения выражения (24), система преобразуется в виде:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = A_0 + B_2^2 \\ C_1 - C_2 = \frac{B_0}{B_2} \\ C_1C_2 = C \end{cases}. \quad (25)$$

Вычитая из квадрата первого уравнения квадрат второго уравнения, получим:

$$\begin{cases} 4C_1C_2 = (A_0 + B_2^2) - \left(\frac{B_0}{B_2}\right)^2 \\ C_1C_2 = C \end{cases}, \quad (26)$$

откуда следует, что:

$$B_2^6 + 2A_0B_2^4 + (A_0^2 - 4C_0)B_2^2 - B_0 = 0. \quad (27)$$

Это есть кубическое уравнение относительно одной неизвестной $B_2^2 = B_1^2$.

Это уравнение решается в соответствии с алгоритмом, изложенным в выражениях (1) – (14).

В процессе решения получим корни, один из которых обязательно будет действительным числом, поскольку коэффициенты исходного уравнения есть действительные числа.

Этот действительный корень следует использовать для дальнейших расчетов.

Таким образом, два коэффициента из четырех для искомым двух квадратных уравнений найдены:

$$B_{12} = \pm\sqrt{B_2^2}, \quad (28)$$

где B_2^2 – действительный корень кубического уравнения (27).

Два других коэффициента C_1 и C_2 могут быть найдены согласно системе (25) путем сложения и вычитания левых и правых частей первого и второго уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2} \left(A_0 + B_2^2 + \frac{B_0}{B_2} \right) \\ C_2 &= \frac{1}{2} \left(A_0 + B_2^2 - \frac{B_0}{B_2} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

В результате проведенных расчетов согласно выражению (22) имеем равносильное исходному уравнению четвертой степени произведение двух квадратных уравнений:

$$1) \quad x^2 + \sqrt{B_2^2}x + \frac{1}{2} \left(A_0 + B_2^2 + \frac{B_0}{\sqrt{B_2^2}} \right); \quad (30)$$

$$2) \quad x^2 - \sqrt{B_2^2}x + \frac{1}{2} \left(A_0 + B_2^2 - \frac{B_0}{\sqrt{B_2^2}} \right). \quad (31)$$

Корнями этих уравнений, а следовательно, корнями исходного уравнения четвертой степени, будут выражения:

$$1) \quad x_{12} = -\frac{\sqrt{B_2^2}}{2} \pm \sqrt{\frac{B_2^2}{4} - \frac{1}{2} \left(A_0 + B_2^2 + \frac{B_0}{\sqrt{B_2^2}} \right)}; \quad (32)$$

$$2) \quad x_{34} = \frac{\sqrt{B_2^2}}{2} \pm \sqrt{\frac{B_2^2}{4} - \frac{1}{2} \left(A_0 + B_2^2 - \frac{B_0}{\sqrt{B_2^2}} \right)}, \quad (33)$$

где B_2^2 – корень кубического уравнения (27), в котором отражено влияние коэффициентов исходного уравнения, в том числе и C_0 .

Анализ корней уравнения четвертой степени согласно выражениям (32) и (33) показывает, что в зависимости от величин дискриминантов D_1 и D_2 полученных квадратных уравнений возможны случаи:

при $D_1 \geq 0$ и $D_2 \geq 0$ – четыре корня действительные числа;

при $D_1 \geq 0$ и $D_2 < 0$, или $D_1 < 0$, а $D_2 \geq 0$ – два корня есть действительные числа, а два других – сопряженные комплексные числа;

$D_1 < 0$ и $D_2 < 0$ – четыре корня попарно сопряженные комплексные числа.

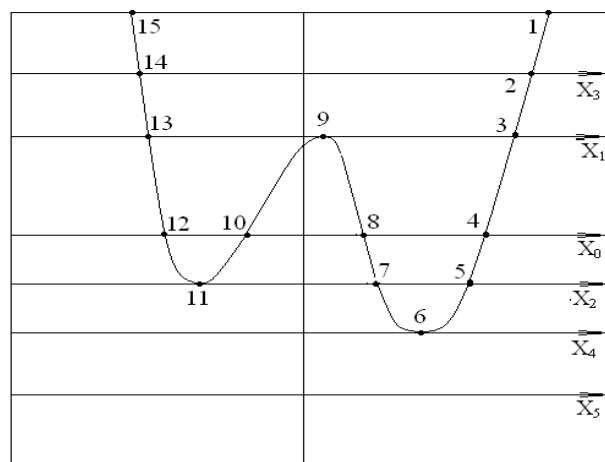


Рис. 3. Характерный вид функции $Y = X^4 + A_0X^2 + B_0X + C_0$ с возможными точками K_i пересечения с осью X при различных её положениях относительно экстремумов функции

На рис. 3 в общем виде графически показаны возможные варианты нахождения корней уравнения четвертой степени в зависимости от положения оси X относительно экстремумов соответствующей уравнению функции.

Литература

1. Никитин Б.А. К вопросу повышения суточной эффективности работы фотопреобразователей в наземных условиях путем выбора оптимальных вариантов коррекции их ориентации относительно солнца // Автономная энергетика (журнал НПП КВАНТ). 2007. № 23. С. 17.
2. Концепция использования ветровой энергии в России / Под общ. ред. Безруких П.П. – М.: Комитет Российского Союза научных и инженерных общественных организаций по проблемам использования возобновляемых источников энергии, 2005. С. 27.
3. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России» / Под общ. ред. Безруких П.П. – С-Пб: Наука, 2002. С. 103.
4. Гусак А.А., Гусак Г.М., Бричкова Е.А. Справочник по высшей математике. Минск: ТетраСименс, 2001. С. 143.
5. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. Изд. 16-е. М.: Наука, Гл.редакция физ.-мат. литературы, 1965. С. 207.
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki>

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Канд. техн. наук Ю.С. Борисов, доктор техн. наук А.И. Некрасов,
А.А. Некрасов, А.В. Ефимов (ГНУ ВИЭСХ)

Обоснованы критерии контроля электрического сопротивления изоляции обмотки асинхронных электродвигателей и приводятся их численные значения для разных условий эксплуатации. Представлены результаты многолетних исследований и предложен инженерный метод использования этих результатов на практике.

Ключевые слова: электродвигатель, электрическое сопротивление изоляции, ресурс, сочетание эксплуатационных факторов.

Рыночное хозяйствование и недостаток средств у сельских товаропроизводителей настоятельно требуют экономного расходования финансовых, трудовых и материальных ресурсов на сохранение длительной работоспособности электрифицированной техники. Поэтому весьма актуальна задача оперативного определения ее текущего состояния и остающихся возможностей по завершении какого-то периода функционирования (например, по окончании нормативного или гарантийного срока службы).

Оценку и прогнозирование состояния технических изделий наиболее достоверно можно осуществить на основе изучения процессов физического износа основных ресурсообразующих элементов. У асинхронных короткозамкнутых электродвигателей (АД) такими элементами считаются обмотка и подшипниковые узлы. Для контроля качества обмотки в нашей стране принято регулярное измерение текущих значений ее электрического сопротивления $Z(t)$ мегаомметром. Полученные данные сравнивают с нормируемым минимально допустимым значением в нагретом состоянии (60°C) $Z_{\text{мин}} = 0,5 \text{ МОм}$, в холодном ($10^{\circ}\dots 30^{\circ}\text{C}$) – 1 МОм [1]. Поскольку ухудшение изоляции приводит не только к снижению надежности АД, но и повышению опасности электропоражения людей и сельскохозяйственных животных, необходимо следить за величиной $Z(t)$.

К изоляции АД предъявляется ряд требований: достаточная эластичность, цементация и механическая прочность; высокая теплопроводность; сохранение стабильного химического со-

The results of many years research of insulation resistance variation for different combinations of operational factors and technical condition of asynchronous electrical motors are presented.

Keywords: Electrical motors, insulation resistance, service life, performance factors, defining.

става; устойчивость структуры за счет ее монолитности и однородности; влагостойкость; способность длительно работать в электрических полях и довольно агрессивной среде; обладать надежными тепло- и нагревостойкостью; успешно противодействовать до определенных пределов механическим и термомеханическим перегрузкам, а также коммутационным электрическим перенапряжениям и вибрации. Теплоустойчивость – это способность электроизоляционного материала сохранять свои свойства на заданном уровне при установленном типовом нагреве. Нагревостойкость характеризует способность материала изоляции без существенного ухудшения характеристик выдерживать воздействие предельно допустимой для данного класса изоляции температуры в течение срока службы АД при обусловленных величинах других эксплуатационных воздействий. В АД современных серий с высотой оси вращения 56...63 мм применена изоляция класса нагревостойкости В, 71...132 мм – В или F, 160...335 мм – F (ГОСТ 8865-87). Механические нагрузки включают статическое давление на изоляцию, изгибающие и скручивающие усилия, удары и вибрации (их источниками выступают электродинамические силы, неуравновешенность вращающихся частей, магнитные тяжения, центробежные усилия и удары со стороны приводимых в действие рабочих машин и механизмов. Термомеханические нагрузки возникают в результате периодических нагревов и охлаждений обмотки, что весьма распространено в сельскохозяйственном производстве – они обусловлены

меняющимися нагрузками комплектующих электродвигателями рабочих машин (от холостого хода до перегрузки). Определенную роль в процессе износа изоляции играют термомеханические явления, связанные с различием коэффициентов теплового расширения изоляции и проводниковых материалов. Эти процессы активизируются при работе АД в форсированных режимах и частых переходных процессах (например, реверсах и повторно-кратковременных режимах работы электропривода). Изоляцию разрушают щелочи, кислоты и их ангидриды, пары, растворители, навоз, вода, дезинфицирующие растворы, пыль, грязь, соль, масла, краска, сок овощей и фруктов и т. д. Износ изоляции происходит постепенно и неравномерно, завершается пробоем в наиболее слабом месте.

Характерными особенностями использования АД в сельском хозяйстве, значительно влияющими на их эксплуатационную надежность, являются малое число часов непрерывной работы в сутки и длительное пребывание в отключенном состоянии в неблагоприятной воздушной среде, в том числе на открытом воздухе, частые реверсы на ряде рабочих машин, перегрузки и заклинивания, чрезмерные колебания питающего напряжения, коммутационные перенапряжения, сезонный характер работы многих машин, повышенная загрязненность и запыленность, высокая вероятность заваливания обрабатываемым материалом или (и) обливания водой при мытье рабочих машин, попадание на АД дезинфицирующих растворов, масел, краски и др., возможность ударов и других механических воздействий, ослабление крепления со всеми вытекающими отсюда отрицательными последствиями. Воздействуя в течение достаточно длительного времени на изоляцию АД, они способствуют ее износу и пробоем. Наиболее активными объективными причинами выступают режимы работы, механические перегрузки и неблагоприятная окружающая среда. Но подавляющее большинство отказов АД обусловлено недостаточной квалификацией или (и) недобросовестностью персонала, своими действиями или (и) бездействием вызывающим аварийные ситуации. В целом изоляционные конструкции, прошедшие приработку и, следовательно, не имеющие скрытые дефекты, даже при минимальном соблюдении правил эксплуатации очень редко выходят из строя вследствие износа в течение довольно длительного времени.

В целях определения статистически обобщенных численных значений $Z(t)$ и ресурсов обмоток АД при различных условиях эксплуа-

тации ВИЭСХ совместно с соисполнителями провел десятилетние исследования нескольких сот короткозамкнутых АД серии 4А, в основном общепромышленного назначения, непосредственно на сельскохозяйственных предприятиях, преимущественно животноводческих [2, 3]. Для почти полутора сотен из них применены автоматизированные системы постоянного контроля и записи на цифропечатающие устройства до 36 параметров (Z и эксплуатационных факторов).

При обработке полученной информации основное внимание уделялось отказам, вызванным естественным износом обмотки, а не дефектами изготовления или грубыми нарушениями правил эксплуатации. Применена модель представления зависимости состояния исследуемого изделия от входных факторов в виде многомерной динамической стохастической системы с линейным фильтром и соответствующей определенной функцией [4]. Проведен корреляционный анализ факторов, влияющих на старение изоляции АД, использован нелинейный трехшаговый алгоритм параметрической идентификации [5, 6, 7]. Каждый вектор входного или выходного параметра представляет собой временную последовательность, состоящую из ряда последовательных замеров, осуществляемых через равные интервалы дискретизации. Для построения суточных регрессионных моделей замеры проводились с интервалом 2 и 10 мин. Для моделирования процесса изменения в течение всего периода эксплуатации периодичность измерений была установлена равной 15 суткам. Интегральные характеристики эксплуатационных факторов получены методом анализа временных рядов [8]. В качестве итогов приняты значения исследуемых параметров, соответствующих левой (наименьшей) границе 95%-ного доверительного интервала, которая отражает наихудшую реакцию изоляции на воздействие эксплуатационных факторов. Например величина $Z(t)$, равная указанной границе принятого интервала, свидетельствует о том, что из каждых, скажем, 100 шт. АД у 95 шт. текущее сопротивление изоляции будет не менее этой величины и только у 5 шт. возможно ее меньшее значение в рассматриваемых условиях эксплуатации. Аналогично – для ресурсов изоляции. Принята доверительная вероятность 95%. По каждому изучаемому параметру аналогичная работа проделана для обобщения по соответствующим 15 суткам. Построенный таким образом ряд значений с явно выраженным сезонным характером и тенденцией к затуханию представляет собой параболу выпуклостью

вверх, расположенную в первом квадранте прямоугольной системы координат с равномерными шкалами и имеющую во втором квадранте вершину с координатами $t = -b/2a$ и $Z = (Z_0 + b^2/4a)$ – формула (1)

$$Z(t) = Z_0 - at^2 - bt, \quad \text{МОм}, \quad (1)$$

где Z_0 – электрическое сопротивление изоляции обмотки нового или капитально отремонтированного АД непосредственно после его монтажа и ввода в эксплуатацию, МОм; a и b – коэффициенты параболы, определяемые взаимосвязями и соотношениями эксплуатационных факторов; t – текущее время, мес.

Для анализа используется часть параболы, расположенная в первом квадранте. Из формулы (1) очевидно, что для каждого конкретного сочетания эксплуатационных факторов (a и b постоянны) и фиксированного времени t значение $Z(t)$ напрямую зависит от величины Z_0 . Чем больше Z_0 , тем меньше влияние вычитаемого ($at^2 - bt$). Для конкретных a , b и Z_0 на $Z(t)$ существенно влияет t . По существу уравнение (1) является трансцендентным – все входящие в него параметры переменны.

Точка пересечения параболы (1) с осью абсцисс (осью t) отсекает на ней отрезок, обозначающий полный календарный ресурс изоляции $R(Z=0)$. Из формулы (1) следует

$$t = \frac{\sqrt{b^2 + 4aZ_0} - b}{2a}, \quad \text{мес.} \quad (2)$$

Остаточный по окончании какого-то определенного времени τ ресурс определяется формулой [9]

$$R(\tau) = R - \tau, \quad \text{мес.} \quad (3)$$

Показатели Z_0 , $Z(t)$, R и $R(\tau)$ позволяют проанализировать состояние изоляции и спрогнозировать длительность работоспособного состояния АД для любого сочетания эксплуатационных факторов.

Выявлено 26 и 68 значений коэффициентов уравнения (1) – соответственно a и b : $a = 0,13 \dots 0,54$; $b = 4,94 \dots 17,79$. Анализом установлена возможность группировки наиболее характерных по величине для разных сельскохозяйственных помещений определяющих параметров: температуры $\theta_1 = 10 \dots 20$ °C, $\theta_2 = 21 \dots 25$ °C, $\theta_3 = 26 \dots 30$ °C; относительной влажности воздуха в месте размещения АД $W_1 < 5\%$, $W_2 = 5 \dots 15\%$, $W_3 = 16 \dots 25\%$, $W_4 = 26 \dots 35\%$, $W_5 > 35\%$; числа пусков АД в час $K_1 = 1$, $K_2 = 2 \dots 3$, $K_3 = 4$, $K_4 = 5$, $K_5 > 5$; содержания агрессивных газов в помещении, в первую очередь аммиака, $G_1 = 0 \dots 0,1$ мг/м³, $G_2 > 0,1$ мг/м³. Каждому соче-

танию эксплуатационных факторов соответствуют определенные значения коэффициентов a и b , конкретная парабола.

Для всех реально возможных сочетаний набирается по 150 кривых по формуле (1) с фиксированной величиной первоначального сопротивления изоляции обмотки Z_0 . Сопротивление Z_0 на практике может принимать любое значение. Для новых АД оно исчисляется десятками тысяч (вплоть до бесконечности по показаниям мегаомметра), для капитально отремонтированных – сотнями и, реже, тысячами МОм. Таким образом, количество кривых по формуле (1) неимоверно возрастает и график очень трудно использовать практикам. Поэтому была поставлена задача оптимизировать численность кривых, сведя ее к 1...3 десяткам, и предложить простой и эффективный способ их применения для всего многообразия сочетаний эксплуатационных факторов и Z_0 .

В основу группировки всех 150 кривых для фиксированного Z_0 положен принцип, согласно которому получаемые из той или иной обобщающей (эквивалентной) кривой значения искомого параметра отличаются от аналогичных значений по каждой из обобщаемых (объединяемых) зависимостей не более $\pm 5\%$. Такая группировка может проводиться как для полного календарного ресурса R АД, так и для текущего сопротивления изоляции $Z(t)$, причем эти процедуры для одних и тех же кривых существенно различаются (рис. 1).

На рис. 1, а кривые 1 и 2 могут быть объединены на условиях допустимой погрешности по R относительно эквивалентной кривой Э, поскольку полный ресурс R , определяемый по эквивалентной кривой, отличается от таких же ресурсов R_1 и R_2 по каждой из объединяемых кривых на $\pm \Delta\%$, которая укладывается в допустимые пределы. Но погрешность $\pm \Delta_k$ применительно к $Z(t)$ на некоторых участках кривых (например, при $t = t_k$) может превышать допустимые пределы, т.е. $\Delta_{k1} > \Delta_{\text{доп}}$ и $\Delta_{k2} > \Delta_{\text{доп}}$.

На рис. 1, б кривые 1 и 2 объединяются по признаку $Z(t)$. До какого-то конкретного момента t_k расхождение между $Z(t_k)_2$ и $Z(t_k)_1$, а также и с $Z(t_k)_2$ оказывается допустимым. По мере расхождения кривых 1 и 2 (приближения их к точке пересечения с осью абсцисс) погрешность по $Z(t)$ возрастает и неизбежно при каком-то определенном для каждой группы объединяемых кривых моменте T (и далее) превысит допустимые значения $\Delta_{T1} > \Delta_{\text{доп}}$ и $\Delta_{T2} > \Delta_{\text{доп}}$. Разброс же по ресурсу между кривыми 1, Э и 2 значителен (Δ_1 , Δ_2), т.е. их объединять нельзя. Таким обра-

зом, группировка одних и тех же зависимостей по R и $Z(t)$ производится по-разному. Более того, группировка по $Z(t)$ зависит от принятого ограничительного срока службы АД. Сказанное обусловлено зависимостью $Z(t)$ от t – в формуле (1) одновременно действуют члены at^2 и bt . Количество групп тесно связано с величиной Z_0 .

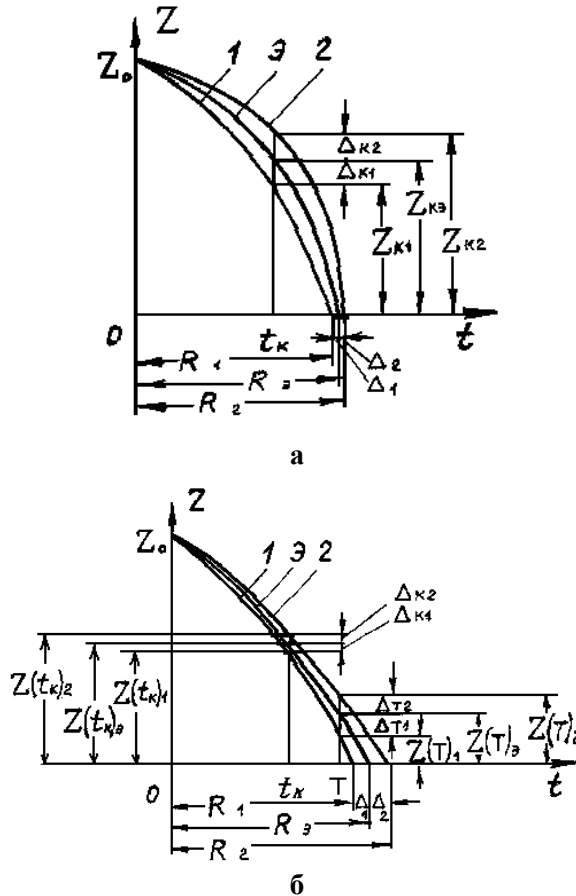


Рис. 1. Иллюстрация группировки кривых по ресурсу (а) и по сопротивлению (б)

В качестве ограничительных принято 20 лет для срока службы АД и 50 тыс. МОм – для Z_0 [10]. Группировка коэффициентов a не проводилась, поскольку для такого варианта, как показали соответствующие расчеты, наклон эквивалентных (обобщающих) кривых существенно отличается от наклонов объединяемых по a кривых, что приводит к большим различиям между текущими $Z(t)$ и $Z(t)_b$. Поэтому коэффициент a для эквивалентной и объединяемых кривых принят единым. Коэффициент же b каждой эквивалентной кривой скорректирован по отношению к обобщаемым b таким образом, чтобы его значения отличались не более 5% от значений b для обобщаемых кривых с наибольшим и наименьшим b . Все промежуточные значения b , естественно, находятся в указанных пределах погрешности.

Признано целесообразным провести общую группировку зависимостей формулы (1) по Z и R с таким расчетом, чтобы по возможности достигнуть погрешности по обоим параметрам не более 5%. В итоге для конкретных Z_0 получилось по 33 эквивалентных кривых, представленных в табл. 1.

Указанная погрешность соблюдается для всех 33 зависимостей при длительности эксплуатации, составляющей 0,955 (средневзвешенное значение) от R . То есть, на конечном интервале времени $0,045 \times R$ погрешность в определении $Z(t)$ по той или иной эквивалентной кривой будет превышать 5% по отношению к аналогичному показателю некоторых, в первую очередь граничных, из обобщаемых ею зависимостей. Если не учитывать кривые 4, 15, 17, 23, 25...33, объединяющих по 1...2 зависимостей (табл.1), то эта доля составит 0,93хR.

Имея информацию по Z_0 и наиболее типичным значениям θ , W , K , G конкретного предприятия, по табл. 1 и формулам (1), (2) и (3) можно оценить ожидаемые на этом предприятии $Z(t)$ в любой момент времени t , R и $R(\tau)$.

На рис. 2 показаны рассчитанные по формуле (2) зависимости полного ресурса изоляции R для всех 33 эквивалентных кривых на диапазоне времени использования АД 0,5...20 лет и $Z_0=1...25000$ МОм.

В целях наглядности и удобства использования формула (1) представлена в виде графика. Он позволяет, в частности, корректировать прогнозируемые значения искомых параметров в тех довольно частых случаях, когда фактические (измеренные) $Z(t)$ и теоретические существенно различаются.

Для определенности целесообразно выбрать некоторое базисное значение $Z_{0б}$, для которого по формулам (1) и (2) рассчитать для разных реальных сочетаний эксплуатационных факторов текущие значения сопротивления изоляции $Z(t)_б$. Затем установить количественную взаимосвязь между $Z(t)_б$, $R_б$ и этими же параметрами при любом фактическом $Z_{0ф}$. Это позволяет определять $Z(t)_ф$, $R_ф$ и $R(\tau)_ф$. В качестве базисного $Z_{0б}$ можно принять любое значение Z_0 . Но при его выборе следует учесть реальные возможные Z_0 . Поскольку Z_0 может приобретать весьма широкий диапазон значений, базисными выбраны величины в 1000, 5000, 10000, 15000 и 25000 МОм. Для каждого из них построена серия из 33 кривых. В качестве примера на рис. 3 представлены зависимости при $Z_{0б} = 15000$ МОм.

Таблица 1. Характеристика эквивалентных кривых зависимости сопротивления изоляции электродвигателей от воздействующих эксплуатационных факторов

Номер кривой	Коэффициенты		Сочетания эксплуатационных факторов
	<i>a</i>	<i>b</i>	
1	0,13	5,18	W101,2K1G1; W103K1G1; W101K1G2
2	0,13	5,92	W102K2G2; W202,3K1G1; W201K1G1,2; W303K1G2; W101K2G1
3	0,13	6,56	W301,2K1G1; W303K1G1; W202,3K1G2; W301K1G2; W102K2G1
4	0,13	7,14	W401K1G1; W302K1G2
5	0,14	6,80	W103K2G1,2; W301K2G1; W202K2G1; W101,2K2G2
6	0,14	7,68	W402K1G1,2; W403K1G1; W501,2K1G1; W101K3G1; W303K1G2; W203K2G1, W201K2G2; W401,2,3K1G2
7	0,14	8,57	W503K1G1,2; W501,2K1G2;
8	0,15	7,92	W301,2,3K2G1; W102,3K3G1; W202,3K2G2; W101K3G2; W301K2G2
9	0,16	8,63	W401,2K2G1; W201,2K3G1; W302,3K2G2; W102,3K3G2
10	0,17	9,14	W403K2G1,2; W501,2K2G1; W401,2K2G2; W301K3G1; W203K3G1; W201,2K3G2
11	0,18	9,48	W503K2G1; W203K3G2; W302,3K3G1; W501,2K2G2; W101,2K4G1; W301K3G2
12	0,19	10,07	W401,2K3G1; W302,3K3G2; W103K4G1; W101,2K4G2; W503K2G2; W201K4G1
13	0,20	10,57	W401,2K3G2; W501K3G1; W202K4G1; W403K3G1; W103K4G2
14	0,21	10,55	W101K5G1; W201,2K4G2; W203K4G1; W301K4G1; W502K3G1
15	0,21	11,28	W503K3G1
16	0,22	10,88	W302K4G1; W102K5G1; W501K3G2; W203K4G2
17	0,22	11,54	W502K3G2; W503K3G2
18	0,23	11,33	W301K4G2; W302K4G2; W303K4G1; W401K4G1; W101K5G2; W103K5G1
19	0,24	11,71	W102K5G2; W201K5G1; W402K4G1; W303K4G2
20	0,25	12,09	W401K4G2; W403K4G1; W202K5G1; W103K5G2
21	0,26	12,55	W501,2K4G1; W402,3K4G2; W203K5G1; W201K5G2
22	0,27	12,95	W501K4G2; W202K5G2; W301K5G1; W503K4G1
23	0,28	13,83	W502K4G2
24	0,29	13,34	W302K5G1; W503K4G2; W203K5G2
25	0,30	13,09	W301K5G2; W303K5G1
26	0,31	13,50	W401K5G1; W302K5G2
27	0,33	13,85	W402K5G1; W303K5G2
28	0,34	14,17	W401K5G2; W403K5G1
29	0,35	14,51	W501K5G1; W402K5G2
30	0,37	15,98	W503K5G1; W403K5G2; W502K5G1
31	0,45	16,71	W501K5G2
32	0,50	17,42	W502K5G2
33	0,54	17,79	W503K5G2

Таблица 2. Приборы для контроля электрического сопротивления изоляции электротехнических изделий

Тип прибора	M4100 /3/4/5	M4101 /3/4/5	M1102 /1	Ф4101	Ф4100	M1101	ЭСО 202/25	ЭСО 210, Г	501M
Тестовое вы-ходное напря-жение, В	800, 1000, 2500	500, 1000, 2500	500, 1000	500, 1000	2500	500	500, 1000, 2500	100 ... 2500	500
Преде-лы из-мере-ния, МОм	0 ... 2500	0 ... 3000	0 ... 500	0,8 ... 20000 (500В) 0 ... 40000 (1000 В)	0 ... 10 ⁵	0 ... беско-неч-ность	0,1 ... 10 ⁴	0 ... 10 ⁵	0,01 ... 2000

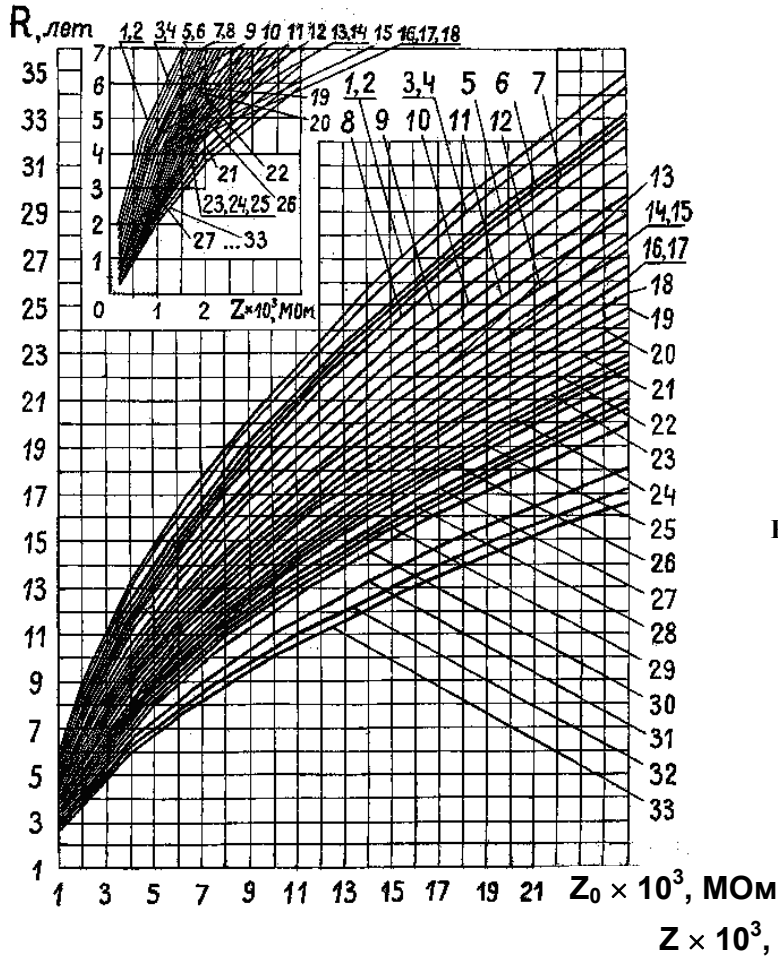


Рис. 2. Зависимости полного ресурса изоляции обмоток электродвигателей от величины начального ее электрического сопротивления для разных условий эксплуатации

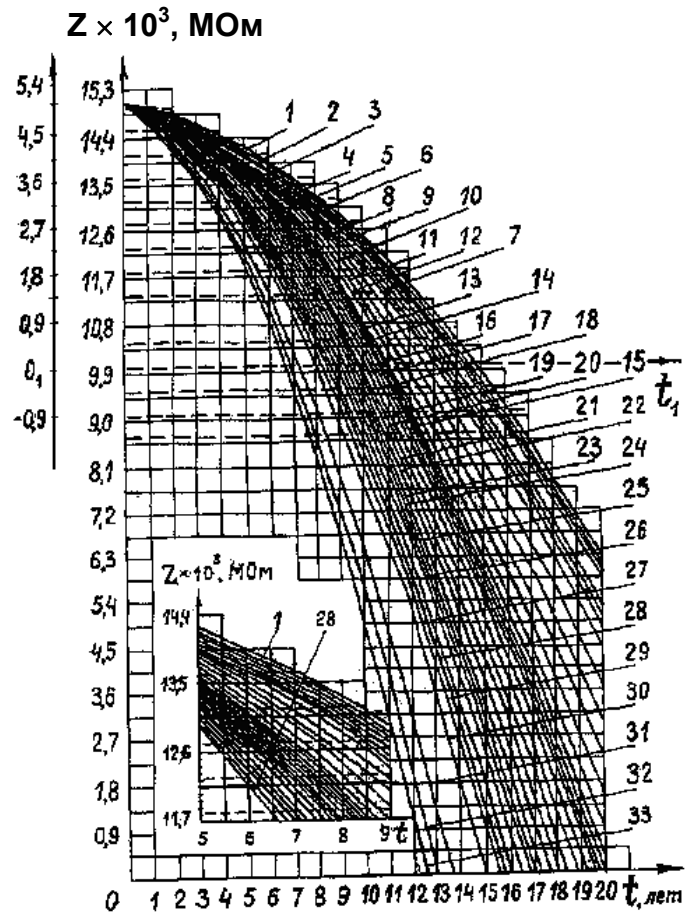


Рис. 3. График взаимосвязи сопротивления изоляции обмоток электродвигателей и длительностью их эксплуатации для разных сочетаний эксплуатационных факторов ($Z_0=15000 \text{ MOhm}$)

Поскольку начальные участки кривых рис. 2 и 3 в основном графике располагаются весьма густо и неудобны для практического применения, они изображены в увеличенном масштабе на малом дополнительном графике. Рис. 3 универсален: он может использоваться для оценки при разных Z_0 величин $Z(t)$, R и $R(\tau)$.

В работе принят одинаковый характер изменения $Z(t)$ во времени для конкретных условий эксплуатации при разных Z_0 , поскольку в АД одной серии различных типов изоляция того или иного класса и ее реакция на воздействие эксплуатационных факторов практически одни и те же. При других $Z_{0ф}$ соответствующая кривая смещается по оси ординат от базисного 0 до нового 0_3 начала координат на величину $(Z_{0б}-Z_{0ф})$ – рис. 4. Так же меняются все текущие значения. Таким образом, базисную параболу можно использовать для любых $Z_{0ф}$.

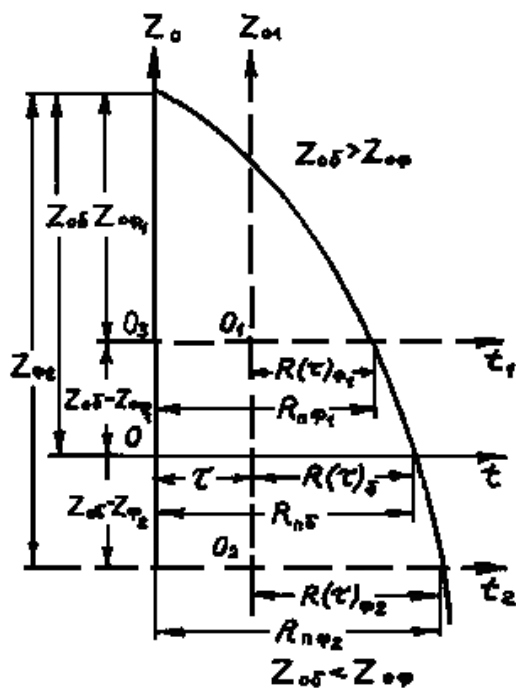


Рис. 4. Использование базисной кривой изменения во времени сопротивления изоляции для оценки ее текущих значений и ресурсов

В случае оценки остаточного календарного ресурса изоляции $R(\tau)$ для любого фактического $Z_{0ф}$ при конкретных типовых условиях эксплуатации АД, отраженных соответствующей

кривой, и заданным значением τ перемещают начало координат 0 в точку 0_1 или 0_2 , определяемую координатами: абсцисса – τ , ордината – разность $(Z_{0б} - Z_{0ф})$, которая может быть положительной или отрицательной. Этим как бы смещаем кривую. Масштабы осей Z и t остаются прежними, но новые отсчеты производятся уже не от точки 0, а от точки 0_1 или 0_2 . Теперь можно применять ту же кривую базисного $Z_{0б}$ для определения нужных характеристик для $Z_{0ф}$ и τ . Эти рекомендации применимы и для текущих значений сопротивления изоляции, когда сравниваются теоретические и фактические (измеренные) $Z(t)$.

Пример

Электропривод с АД серии 4А общепромышленного исполнения работает, в основном, при $\theta=22^\circ\text{C}$, $W=80\%$, $K=2$, $G=0,2 \text{ мг/м}^3$. Требуется оценить полный и остаточный по окончании $\tau=3$ года календарные сроки службы, а также ожидаемое $Z(\tau)$ если $Z_0=5500 \text{ МОм}$.

Решение

Исходя из указанных значений эксплуатационных факторов, имеем их сочетание W502K2G2. В табл. 1 и на рис. 2 и 3 ему соответствует зависимость 11 с $a=0,18$ и $b=9,48$. Возможно расчетное, графическое и графоаналитическое решение:

1. По формулам (2) и (3) самые точные значения

$$R = [(9,48^2 + 4 \times 0,18 \times 5500)^{1/2} - 9,48] / 2 \times 0,18 = 150,44 \text{ мес.} = 12,54 \text{ года.}$$

$$R(\tau=3) = 150,44 - 36 = 114,44 \text{ мес.} = 9,54 \text{ года.}$$

Ожидаемое текущее значение сопротивления изоляции в соответствии с формулой (1) $Z(3 \text{ года}) = 5500 - 0,18 \times 36^2 - 9,48 \times 36 = 4925 \text{ МОм}$.

2. Откладываем по осям координат рис. 3 заданное $\tau=3$ года и $(Z_{0б}-Z_{0ф})=15000 - 5500=9500 \text{ МОм}$, получаем новое начало координат ($Z=9500 \text{ МОм}$ и $t=\tau=3$ года), аналогичное точке 0_1 на рис. 4. Проведя из нее горизонтальную линию (новая ось абсцисс) до пересечения с кривой 11, получаем $R(\tau=3 \text{ года})=9,6$ года. Возводя вертикаль из точки $t=\tau=3$ года в новой системе координат до пересечения с той же кривой, получаем ординату в новой системе координат $Z(3 \text{ года}) = 4855 \text{ МОм}$. Расхождения в ре-

зультатах составляют: 0,6% для $R(\tau=3)$ года и $-1,4\%$ – для $Z(t=\tau=3)$ года). Полученное $Z(\tau)$ можно сравнить с реальным измеренным $Z(\tau)_{\text{ф}}$, при необходимости скорректировать кривую и уточнить любым из приведенных способов $R(3\text{года})$. Если же $Z_{06} < Z_{0\text{ф}}$, то нужно продолжить кривую 11 вниз до значения $(Z_{06} - Z_{0\text{ф}})$, имея началом координат точку O_2 на рис. 4, либо взять график с $Z_{06}=25000$ МОм и провести аналогичную работу.

3. По графику рис. 2 для $Z_{0\text{ф}}=5500$ МОм, проведя вертикаль от этого значения на оси абсцисс до пересечения с кривой 11, сразу находим $R=12,6$ лет и $R(3\text{года})=12,6-3=9,6$ года. Погрешности по сравнению с точными значениями R и $R(\tau)$ не превышают 0,6%. Величину $Z(\tau=3)$ вычисляют любым из указанных способов. Во всех расчетах используется просто калькулятор, работа с которым доступна сельским товаропроизводителям даже с самой низкой квалификацией.

Изложенные сведения относятся ко всем современным АД, поскольку изоляция у них в увязке с типами практически одинакова.

В соответствии с «Правилами...» при техническом обслуживании и текущем ремонте АД обязательным является измерение электрического сопротивления их изоляции мегаомметром [1]. Характеристики основных из них приведены в табл. 2.

Мегаомметры на напряжение 2500 В рекомендуются, главным образом, для проверки электрической прочности изоляции [1].

По окончании монтажа АД перед вводом его в эксплуатацию замеряется $Z_{0\text{ф}}$, которое фиксируется в предпусковом акте, причем дата его составления служит началом отсчета времени. Эти обстоятельства способствуют дальнейшему накоплению статистической информации по Z_0 и $Z(t)$ из протоколов и актов работы сервисных служб страны. Ее сбор, обработка и анализ позволяют получить значения искомых параметров с очень высокой достоверностью и

точностью, что практически невозможно для информации об отказах АД. В последнем случае необходимо организовывать специальные исследования.

Предложенная инженерная методика оценки и прогнозирования численных значений полного и остаточного ресурсов, текущего электрического сопротивления изоляции обмоток АД позволяет оперативно следить за состоянием изоляции.

Литература

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – С.-Петербург: ДЕАН, 2007.
2. Сырых Н.Н., Борисов Ю.С., Левашов В.Г., Стецюк У.Г. Эксплуатационная надежность электродвигателей серии 4А и пути ее повышения. // Автоматизированный электропривод в сельскохозяйственном производстве: Сб. научн. трудов. Том 63. М.: ВИЭСХ, 1985.
3. Пястолов А.А., Хоменко О.В., Хомутов О.И. Определение сроков службы электродвигателей и межремонтных периодов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1988. № 6.
4. Кандалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976.
5. Драйлер П. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973.
6. Каишьян Р.Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. М.: Наука, 1983.
7. Эйхгоф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975.
8. Бокс Д. Анализ временных рядов. М.: Мир, 1974.
9. Борисов Ю.С., Некрасов А.И., Некрасов А.А. Методические рекомендации по определению остаточного ресурса электрооборудования в сельском хозяйстве / Под ред. Стребкова Д.С. – М.: Росинформагротех, 2006.
10. Борисов Ю.С., Некрасов А.А. Прогнозирование сопротивления и ресурса изоляции обмоток электродвигателей // Техника в сельском хозяйстве. 2010. № 3.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА

Асп. А.М. Мамхегов (ГНУ ВИЭСХ)

В статье рассмотрены результаты расчетно-экспериментального определения температуры токоведущих элементов дугогасительного устройства коммутационного аппарата, работающего в кратковременном режиме. Показана возможность сокращения габаритов дугогасительного устройства выключателя нагрузки по сравнению с существующей конструкцией за счет оптимизации рабочих параметров токоведущих элементов.

Ключевые слова: дугогасительное устройство, выключатель нагрузки, температура, эксперимент, токоведущий элемент.

В коммутационных аппаратах, наряду с главным контуром, часто используют параллельный (шунтирующий) контур при отключении нагрузки. На этом принципе построены конструкции практически всех выключателей нагрузки. В параллельный контур встраивают дугогасительное устройство, часто последовательно с ним устанавливают резистор (сопротивление) для облегчения отключения тока. В такой схеме реализуется автоматически разделение функции: главные контакты осуществляют включение и проведение номинального тока, а шунтирующий контур с дугогасительным устройством – отключение. Таким образом, на шунтирующий контур с дугогасительным устройством полная нагрузка цепи, в которой установлен коммутационный аппарат, воздействует кратковременно, только в момент отключения тока. Это обстоятельство позволяет выполнять токоведущие элементы дугогасительного устройства с уменьшенным сечением, а значит, минимизировать габаритные размеры дугогасительного устройства в поперечном сечении. Малые размеры позволяют использовать в выключателях нагрузки таких прогрессивных способов гашения дуги, как вакуумные и элегазовые. При оптимизации размера сечения токоведущих элементов дугогасительного устройства встает вопрос о тепловой задаче, так как размер сечения, в первую очередь, определяется из условия неперевышения допустимого нагрева то-

In article results of settlement-experimental definition of temperature of current carrying elements arc control device of the circuit breakers working in a short-term mode are considered. Possibility of reduction of dimensions arc control devices of the circuit breakers of loading in comparison with an existing design at the expense of optimization of working parameters of current carrying elements is shown.

Keywords: arc control device, circuit breakers, experiment, temperature, current carrying element.

коведущего элемента при прохождении тока. Различают допустимый ток при длительном включении и допустимый ток при кратковременном включении. Для характеристики кратковременного режима существует понятие коэффициента перегрузки, который показывает, во сколько раз может возрасти допустимая нагрузка по току при кратковременном режиме по сравнению с длительным режимом [1].

Следует отметить, что существует большое количество методов теоретического определения температуры токоведущего элемента при прохождении тока. Однако подавляющее большинство известных методов расчета дают значительные погрешности, часто сопоставимые, в процентном отношении, с величинами ожидаемой экономии. В этой ситуации теряется смысл постановки и решения задачи оптимизации размеров сечения токоведущих элементов дугогасительного устройства только теоретическим путем. Изложенное обстоятельство обусловило проведение экспериментального подтверждения значений величин, полученных расчетным способом. Испытания проводились с образцами из меди и стали. Нагрузка составляла: напряжение – 12 кВ, ток – 630 А.

Испытуемые материалы имели стандартную форму образцов, используемых при определении зависимости физико-технических характеристик материала от изменения температуры. Это прямоугольная пластина с боковыми

вырезами (рис. 1). Боковые вырезы расположены симметрично и формируют контролируемое сечение в виде квадрата со стороной b . Контролируемое сечение приходится на серединную часть образца и имеет длину не менее $5b$. По концам образца наблюдается плавное увеличение поперечного сечения, что дает возможность исключить влияние температуры, развивающейся в контактных соединениях на нагрев контролируемой части образца. Ряд типоразмеров квадратного сечения, рассчитанных с различными коэффициентами запаса, составлял: 3×3 , 4×4 , 5×5 , 6×6 , 7×7 мм².

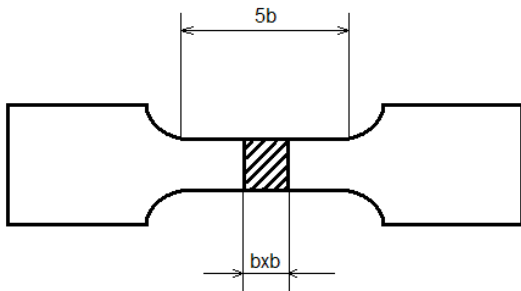


Рис. 1. Схема образца материала для испытания

В контролируемой части образца были установлены хромель-копелевые термопары для измерения температуры нагрева образца проходящим током.

Время воздействия полной нагрузки на образец определялось как сумма времени гашения дуги и времени движения главного контакта на заданное расстояние по формуле

$$T_{\text{в}} = K (T_1 + T_2), \quad (1)$$

где T_1 – время движения главного контакта на заданное расстояние после выхода из контакта (определяется экспериментально, в данном случае это расстояние составляет 30 мм); T_2 – время гашения дуги, то есть время с момента размыкания дугогасительных контактов и до полного гашения дуги; K – коэффициент запаса.

Расчетом, с учетом коэффициента запаса, были определены два значения времени воздействия полной нагрузки на испытуемый образец: 1 и 3 секунды.

Испытания проводили на специально разработанной установке с имитацией отключения заданной нагрузки (рис. 2).

Установка имеет автоматический привод, позволяющий дистанционное управление и

снабженный измерителем скорости для определения скорости расхождения главных контактов. На установке предусмотрена возможность контролировать во время испытания следующие параметры: напряжение, ток, сопротивление, температура, время. Также во время испытаний фиксировали влажность и температуру окружающей среды.

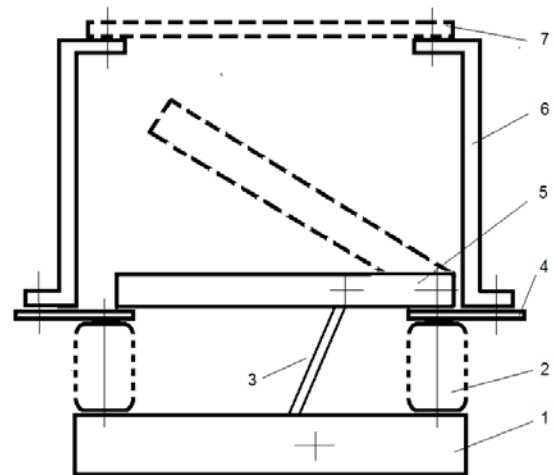


Рис. 2. Схема установки для экспериментального определения температуры образца материала от токовой нагрузки:

1 – рама; 2 – изолятор; 3 – тяга; 4 – главный неподвижный контакт; 5 – главный подвижный контакт; 6 – стойка; 7 – образец

Число испытаний для каждого режима определялось в данном случае необходимым количеством измерений [2]. Необходимое количество измерений для достижения требуемых точности E и надежности P можно определить заранее только в том случае, когда известна среднеквадратическая ошибка измерений или хотя бы ее порядок (измерения предполагаются равноточными и независимыми). В этом случае количество измерений для получения достоверной оценки точности E

$$|a - x| < E, \quad (2)$$

с заданной надежностью P определяется с помощью формулы

$$n \approx \left[\frac{t(P)}{E} \right]^2 \sigma^2, \quad (3)$$

где $t = t(P)$ находится из равенства

$$2\Phi(t) = P \quad ([2], \text{табл. 2}),$$

где $\Phi(t)$ – интеграл вероятностей; a – измеряемая величина; x – среднее квадратическое значение.

Рассчитаем доверительный интервал по формуле (2), используя результаты предварительных экспериментов, по которым определялось время нарастания средней температуры для каждого режима

$$E = |a - x| = t(P). \quad (4)$$

Среднеквадратическую ошибку находим по формуле

$$S = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.

Далее уточняем необходимое количество измерений исходя из тех соображений, что уменьшение доверительного интервала в k раз обеспечивается увеличением количества измерений в k^2 . Таким образом был рассчитан доверительный интервал с надежностью $P = 0,97$ и количеством измерений $k = 3$. Максимальная погрешность равна 12,8 %.

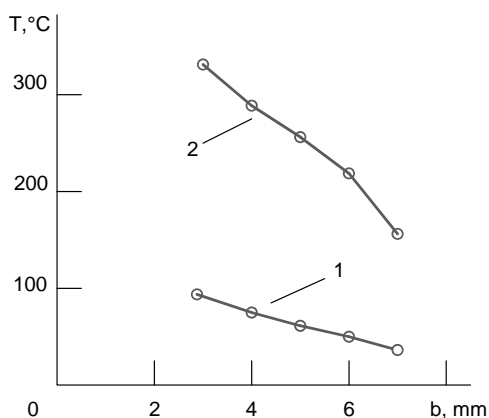


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры от характерного размера образца:
1 – медь; 2 – сталь

Полученные в ходе проведения испытаний результаты были сведены в таблицу и обработаны. На рис. 3 приведен график зависимости максимальной температуры от характерного размера сечения образца.

Допустимый нагрев токоведущего контура при длительном протекании тока регламентируется ГОСТ 8024-73. При кратковременном режиме согласно расчету, основанному на принципе коэффициента перегрузки, нагрузка может быть повышена, но не более чем на 20 %. Коммутация выключателей нагрузки происходит крайне редко (5 – 10 раз в год), а время воздействия полной нагрузки на контур дугогасительного устройства составляет 1 – 3 секунды. В данном случае будет правомочно рассматривать процесс нагрева материала, по результатам воздействия, как нагрев при токе короткого замыкания, где стандарт допускает существенное повышение температуры токоведущего элемента. Этот подход подтверждается анализом результатов, полученных при испытании материалов кратковременной токовой нагрузкой. Сечение токоведущего элемента может быть уменьшено значительно (в 1,5 – 1,7 раза) по сравнению с существующей конструкцией для вышеприведенной нагрузки.

Выводы

1. Проверена экспериментально реальная картина процесса нагрева токоведущего элемента в кратковременном режиме.
2. Показана аналогия процесса нагрева токоведущего элемента дугогасительного устройства с процессом нагрева при токе короткого замыкания.
3. Установлена возможность значительного уменьшения площади сечения токоведущего элемента дугогасительного устройства в сравнении с существующей конструкцией.

Литература

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. М.: Энергия, 1967.
2. Румицкий Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. М.: Наука, 1971.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА И ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА ДЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ

Канд. техн. наук Е.Н. Камайданов (ГНУ ВИЭСХ)

Изучены комплексные решения по снабжению энергией и кормами малых и средних животноводческих ферм. Установлено, что биологическая и термохимическая энергия навоза и растительных остатков может быть эффективно утилизирована в газообразной форме в двигателях внутреннего сгорания и паровом цикле с целью получения электрической и тепловой энергии. Рассмотрена модельная ферма на 1200 свиней. При полном самообеспечении энергией, расчетное значение товарной когенерации оценивается в 45-65 % от произведенной энергии. Приблизительно 16% покупных кормов может быть заменено (по обменной энергии) за счет использования удобрительной смеси на основе продуктов биологической и термохимической газификации.

Ключевые слова: биоэнергия, биогаз, термохимическая газификация, паровые и внутреннего сгорания силовые циклы, самообеспечивающиеся корма фермы, эффлюент, органические удобрения, навоз, растительные остатки.

Для подтверждения возможности эффективного внутрихозяйственного и межхозяйственного использования биоэнергетического потенциала бесподстилочного навоза и отходов растениеводства в современных условиях применительно к малым и средним животноводческим фермам рассмотрим некоторое модельное хозяйство.

Поголовье свиней на откорме $N_{св}=1200$ обеспечивает годовой выход органического вещества $G_{орг}=295234$ кг/год, что соответствует следующим располагаемым биогенным ресурсам:

- выход биогаза (до 65% метана) $V_{бр}=230$ м³/сут, что при удельном энергосодержании $q_{бр}=23$ МДж/ м³ и КПД когенерационной установки $\eta_{кгу} = 90\%$ обеспечивает генерирование $N_{эб}=32$ кВт электрической мощности и $Q_{тб}=64$ кВт тепловой мощности;

- годовой выход с эффлюентом азота общего $N_{общ} = 21600$ кг, фосфора Р(по Р₂O) = 8160 кг, калия К(по К₂O)=9000 кг [1]. Биоэнергетическая установка обеспечивает подготовку навоза к утилизации практически без потерь биогенных элементов.

При удельной норме внесения азота $g_a = 200$ кг/Га [2] удобряемая под зерновые куль-

The complex solution of energy and feed delivery for small and medium animal farms was investigated. It was found that bio- and thermochemical energy of manure and plant remains can be utilized in gaseous form in steam and internal combustion cycles for electric and heat power generation. Model farm of 1200 pigs was considered. With full self-providing for all kinds of energy, calculated value of commodity output of farm cogeneration unit estimated as 45-65 % of total generation. Nearly 16% of imported feed has been replaced (on bond energy) due to use of mixed fertilizer consisting of products of biological and thermochemical gasification.

Keywords: bioenergy, biogas, thermochemical gasification, steam and internal combustion cycles, self-feed farms, effluent, organic fertilizer, manure, plant remains.

туры площадь составит $F_3=108$ Га. Данный показатель соответствует рекомендуемым нормам внесения при 100% покрытии потребности зерновых в азоте за счет органических удобрений и норме внесения по массе навоза $m_n = 30$ т/Га [1].

При использовании в качестве фона урожайности дерново-подзолистой почвы без удобрения 10 ц/Га и прибавке урожайности от применения удобрения в 50%, валовый сбор зерна с удобряемой площади составит $G_3=162$ т [3]. Данный показатель обеспечивает сбалансированное кормление концентратным рационом из расчета введения в него 0,37 кг зерна в сутки на голову.

Полученные соотношения соответствуют рекомендациям [4], согласно которым удельный показатель расхода зерна (пшеницы) составляет 0,4 кг/гол. · сут.

Таким образом, за счет внутренних ресурсов хозяйства обеспечивается 16% от общей потребности в обменной энергии (0,48 кормовых единиц из общей потребности в 3 к.е.).

При этом следует учитывать, что, согласно рекомендациям НПО «Прогресс», для утилизации только жидкой фракции свиного навоза от данного поголовья требуется не менее 27 га [1].

ности хозяйства), годовой выход калия составит $K_{\text{доп}} = 2,73$ т/год, что позволяет повысить относительное содержание калия в эффлюенте до 54% от содержания азота. При использовании на энергетические нужды всей массы соломы, данный показатель увеличивается до 53%.

Для получения золы надлежащего качества и с учетом технического уровня энергетического хозяйства свиноферм предлагается низкотемпературная газификация соломы с последующим сжиганием образовавшихся газов в типовых водогрейных или паровых котлах.

В рамках концепции повышения энергетической безопасности и снижения себестоимости продукции свиноферм наибольший интерес представляет генерация пара для выработки механической (электрической) и тепловой энергии в замкнутом пароконденсатном цикле [5] «паровой котел 9 с пароперегревателем 6 – паропоршневая машина 7 – теплофикационный (конденсационный) блок 10» (рис. 1).

При удельном энергосодержании соломы $q_c = 12$ МДж/кг и суммарном КПД сопряженного процесса газификации – сжигания продуктов газификации $\eta_{гз} = 70\%$ располагаемая тепловая мощность составит $Q_{п} = 103$ кВт. Данный показатель реализуется в виде отпускаемого из котельной перегретого пара давлением 0,13 МПа и температурой 300 °С, что соответствует стандартным условиям [6].

Применение паропоршневой машины с указанными параметрами пара и эффективным КПД $\eta_{пз} = 17\%$ позволяет получить до $N_{эп} = 18$ кВт электроэнергии. Использование теплоутилизационного блока с КПД $\eta_{тб} = 73\%$ обеспечивает получение $Q_{тб} = 75$ кВт тепловой мощности.

Указанной тепловой и электрической мощности достаточно для обеспечения энергетической потребности свинофермы 1 и биоэнергетической установки 2.

Образовавшаяся в процессе низкотемпературной газификации зола в количестве 8,3 т/год используется для приготовления скорректированного по калию органического удобрения.

Товарная электрическая энергия $N_{эб} = 32$ кВт и товарная тепловая энергия $Q_{тб} = 64$ кВт могут быть направлены для обеспечения энергетических потребностей различных подразделений хозяйства, жилого сектора, а также использованы внешними потребителями.

Выводы

Показана принципиальная возможность на основе типового оборудования:

- частичного самообеспечения (до 16% по обменной энергии) свиноводческого хозяйства

кормами за счет использования удобрительного потенциала анаэробно переработанного навоза и продуктов низкотемпературной газификации отходов растениеводства (соломы);

- полного обеспечения электрической и тепловой энергией системы «свиноферма-биоэнергетическая установка»;

- получения товарной электрической энергии (до 64%) и товарной тепловой энергии (до 46%) для обеспечения вспомогательных подразделений хозяйства и жилого сектора.

Указанные преимущества, при условии их реализации, будут способствовать повышению устойчивости функционирования малых и средних ферм в современных условиях хозяйствования и при возникновении непредвиденных перебоев в энергоснабжении.

Сопоставление автономного и централизованного генерирования энергии по коэффициенту использования теплоты свидетельствует о большей эффективности автономных когенерационных источников (90 и 75% по газообразному топливу соответственно). Известные ценовые преимущества централизованной когенерации могут быть декомпенсированы отсутствием или минимальным уровнем цен на первичное топливо (навоз, солома), высоким уровнем автоматизации современных когенерационных установок в совокупности с тенденцией снижения их стоимости.

Литература

1. Андреев В.А., Новиков М.Н., Лукин С.М. Использование навоза свиней на удобрение. М.: Росагропромиздат, 1990.
2. Агрономические рекомендации по подготовке и использованию бесподстилочного навоза на удобрение. М.: Колос, 1982.
3. Ненайденко Г.Н., Сергеев В.А. Рациональное применение удобрений и других средств в интенсивных технологиях. Иваново, 1992.
4. Шкункова Ю.С., Постовалов А.П. Кормление свиней на фермах и комплексах. Л.: Агропромиздат, 1988.
5. Дубинин В.С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России // Промышленная энергетика. 2005. №11.
6. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности». М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Визла Р.Р. Эффективность действия сброженного навоза // В кн.: Удобрение полевых культур в системе интенсивного земледелия. Рига: Зинатне, 1990.

Внимание!

**С 2012 г. теоретический и научно-практический журнал
«Вестник ВИЭСХ»
выходит 4 раза в год.**

**Со второго полугодия 2012 г. на журнал
можно оформить подписку.**

**Подписной каталог Агентства «Роспечать»
«ИЗДАНИЯ ОРГАНОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ».**

**Подписной индекс
66059.**
