

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ПАРА ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РАЙОНА БАЧАКЕРО В ВЕНЕСУЭЛЕ

В.А. Кузнецова¹, Р.В. Пугачев¹, М.Е. Росендо Чакон^{1,2}, А.С. Лопес Сааб^{1,2}

¹ΦΓБОУ ВПО Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» РФ 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 тел.: 8(495)362-72-51; e-mail: nvie@fee.mpei.ac.ru ² Национальный экспериментальный политехнический университет национальных вооруженных сил Венесуэла 02101, Маракай, ул. Маракай–Марияра тел.: +58(243)554-64-21; e-mail: ingresopregrado@unefa.edu.ve

doi: 10.15518/isjaee.2015.10-11.013

Заключение совета рецензентов: 06.05.15 Заключение совета экспертов: 20.05.15 Принято к публикации: 03.06.15

В статье рассматривается возможность использования технологий, основанных на солнечной энергии, для обеспечения требований теплового метода повышения нефтеотдачи пластов на основе пара (П-ПНП) и описывается методика определения параметров солнечной тепловой установки с параболоцилиндрическими концентраторами только с дневным нагнетанием пара. Для исследования типового месторождения, где применяется метод непрерывного нагнетания пара, в соответствии с солнечной радиацией, характерной для района Бачакеро республики Венесуэла, был выбран тип и ориентация ПЦ концентратора, тип и температура рабочей жидкости, рассчитано общее число ПЦ концентраторов.

Ключевые слова: повышение нефтеотдачи пластов (ПНП), солнечная тепловая установка, параболоцилиндрический концентратор, Венесуэла.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF STEAM PRODUCTION SYSTEMS FOR OIL PRODUCTION USING SOLAR ENERGY FOR BACHAKERO'S REGION IN VENEZUELA

V.A. Kuznetsova¹, R.V. Pugachev¹, M.E. Rosendo Chacon^{1,2}, A.C. Lopez Saab^{1,2}

Referred 6 May 2015 Received in revised form 20 May 2015 Accepted 3 June 2015

The article discusses the possibility of the use of solar energy technologies meeting the requirements of Steam Based Enhanced Oil Recovery and describes the methods of obtaining parameters of solar steam plant with parabolic trough concentrator considering day steam injection. In order to study standard oil deposit where is used continuous steam injection method in accordance with the solar radiation characteristic for the Bachaquero region of the Republic of Venezuela, the type and orientation of parabolic trough collector, the type and temperature of the working fluid were chosen, the total number of parabolic trough concentrators was calculated.

Keywords: enhanced oil recovery (EOR), solar steam plant, parabolic trough concentrator, Venezuela.







Валентина Андреевна Кузнецова Valentina A. Kuznetsova

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: НИУ Московский Энергетический институт (1972).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная и ветровая энергетика, гидроэнергетика.

Публикации: более 60.

Information about the author: senior lecturer of the "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: NRU Moscow Power Engineering Institute (1972).

Research area: renewable energy, solar and wind energy, hydropower.

Publications: more than 60.



Роман Викторович Пугачев Roman V. Pugachev

Сведения об авторе: доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: НИУ Московский Энергетический институт (1999).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

Публикации: 40.

Information about the author: professor of the "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: NRU Moscow Power Engineering Institute (1999).

Research area: renewable energy. Publications: 40.





Милица Елена Росендо Чакон Militza E. Rosendo Chacon

Сведения об авторе: аспирантка кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: Экспериментальный политехнический национальный университет национальных вооруженных сил, Венесуэла (2009).

Область научных интересов: зобновляемые источники энергии, солнечная энергетика.

Публикации: 5.

Information about the author: postgraduate student of the "Hydropower and Renewable energy" department.

Education: Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional (2009).

Research area: renewable energy, solar energy.

Publications: 5.



Андрес С. Лопес Сааб Andres C. Lopez Saab

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: Экспериментальный политехнический национальный университет национальных вооруженных сил, Венесуэла

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика.

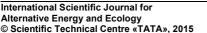
Публикации: 5.

Information about the author: postgraduate student of the "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional (2009).

Research area: renewable energy, solar energy.

Publications: 5.





Введение

Венесуэла обладает огромными запасами нефтяных ресурсов, при этом 70 % составляет тяжелая нефть, что приводит к необходимости использования методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП). Пар — отличный проводник тепла и часто используется в тепловых ПНП проектах. Основная цель тепловой нефтедобычи — сократить вязкость пластовой нефти в месторождении и ускорить нефтедобычу. В основном это достигается увеличением температуры сырья при нагревании.

Для того чтобы определить термические параметры пара, необходимые для теплового метода повышения нефтеотдачи пластов (температура, давление, качество и количество), нужно учесть основные характеристики нефтяного месторождения: давление, глубина, пористость и неоднородность коллекторов; структура грунта, подвижность нефти и другие.

При увеличении глубины залегания нефти требуется повысить давление нагнетаемого пара и производительность парогенератора. В случае неглубокого месторождения эффективность нагнетания пара увеличивается за счет меньших потерь тепла и более низкого уровня требуемого давления пара.

С целью экономии органического топлива для получения пара можно вместо парового генератора использовать солнечную энергию, устанавливая параболоцилиндрические концентраторы (ПЦ концентраторы), где жидкость нагревается и образуется насыщенный пар.

По определенным для данного месторождения объему и параметрам нагнетаемого пара определяется количество ПЦ концентраторов. При этом только часть потока солнечной энергии перейдет в тепловую энергию, передаваемую жидкости. Часть энергии теряется из-за оптических характеристик концентратора, часть — в связи с тем, что угол падения θ не равен 0, часть рассеивается при нагревании теплоносителя.

В целом для определения количества ПЦ концентраторов необходимо вычислить объем и параметры нагнетаемого пара, массовый расход и скорость движения жидкости в ПЦ концентраторе, общее количество и схему соединения ПЦ концентратора; рассчитать потери энергии в ПЦ концентраторе и температуру на выходе ПЦ концентратора.

Обзор технических характеристик

В этой статье рассматриваются технологии, основанные на солнечной энергии, и их возможность обеспечивать требования теплового метода повышения нефтеотдачи пластов на основе пара (П-ПНП).

Существует много причин считать, что пар, произведенный с помощью солнечной тепловой установки, является альтернативой постоянному паронагнетанию, и что короткие перерывы подачи пара не окажут большого влияния на процесс нефтедобычи ПНП [1]. Поэтому циклическое использование солнечной энергии, позволяющее получить определенный объем пара, так же эффективно, как и непрерывное нагнетание.

Для проектирования солнечной тепловой установки, заменяющей парогенератор мощностью 50 МВtu/ч было выбрано типичное месторождение, где используется метод непрерывного нагнетания пара в соответствии с солнечной радиацией, характерной для местности Бачакеро (Венесуэла). Пар производится при 80 % качества, 70 Бар и 285 °C.

Солнечная тепловая установка была рассчитана на обеспечение суммарной энергии 1 200 Вtu/сутки при максимальном и среднем приходе солнечной радиации, равном суммарному количеству пара, который вырабатывается парогенератором при постоянном нагнетании.

Таким образом, пар должен вырабатываться при максимальных уровнях в течение дня, когда солнечная энергия максимальна для восполнения отсутствия подачи пара в ночное время.

Исследование предполагает наличие современных парогенераторов и системы распределения пара, к которым может быть подключена солнечная тепловая установка.

Параметры, необходимые для проектных значений ПЦ концентратора

Для производства необходимого количества пара с помощью имеющейся солнечной энергии разрабатываются солнечные паровые установки. Эффективность работы ПЦ концентратора зависит от следующих факторов:

Иеждународный издательский дом научной периодики "Спейс"

- дата (месяц и день) и время расчетной точки;
- прямое солнечное излучение и температура воздуха для выбранных даты и времени;
- географическое положение установки (широта и долгота);
 - ориентация ПЦ концентратора;
- тепловая мощность, поступающая от солнечното поля:
- входная/выходная температура жидкости (теплоносителя);
 - тип теплоносителя;
 - тип ПЦ концентратора;
- угол падения прямого солнечного излучения на ПЦ концентратор.

Ресурсы солнечной энергии в районе Бачакеро

В качестве примера рассчитываются параметры поля ПЦ концентраторов для месторождения нефти в районе Бачакеро республики Венесуэла.

Бачакеро расположен в северо-западной части Венесуэлы между 08° и 10° северной широты и 70° и





72° западной долготы. Географические координаты солнечного поля для данного исследования: широта 09° 56' 24" С, долгота 71° 07' 48" В.

Географическое положение Бачакеро показано на рисунке 1.

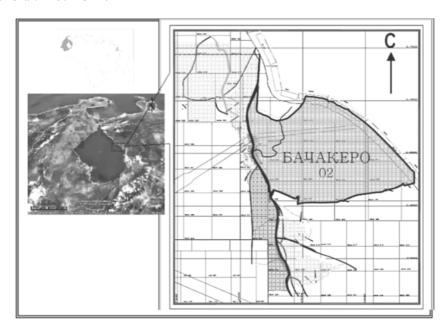


Рис. 1. Географическое положение Бачакеро (Венесуэла) Fig. 1. Bachaquero's geografical position in Venezuela

В связи с недостаточным количеством гидрометеорологических (актинометрических) (ГМС) в Венесуэле для оценки потенциала солнечной энергии используются мировые базы данных (БД) "NASA" и "METEONORM".

Ниже приводятся сравнительные данные, полученные из БД "METEONORM" с данными БД "NASA".

Сравнение проводится по следующим показателям:

- среднемесячный приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную площадку $(\kappa B_{T} \cdot \Psi/M^2/c_{YT});$
- среднемесячный приход прямого солнечного излучения (кBт·ч/м 2 /сут);
- среднемесячная продолжительность солнечного сияния Тсс (час);
- среднемесячная температура воздуха на уровне 10 м выше поверхности Земли (°С).

Сравнение данных БД "NASA" и БД "METEONORM"

Данные о приходе солнечной радиации, поступающей в течение года, приведены на рисунках 2-4.

Отклонения значений по данным БД "NASA" и БД "METEONORM" определяются по формуле:

$$\Delta = \frac{\Im_{B\Pi^{"NASA"}} - \Im_{B\Pi^{"METEONORM"}}}{\Im_{B\Pi^{"NASA"}}} 100\%, \qquad (1)$$

где ЭБД "NASA"/"МЕТЕОNORМ" – данные по БД "NASA" или "METEONORM".

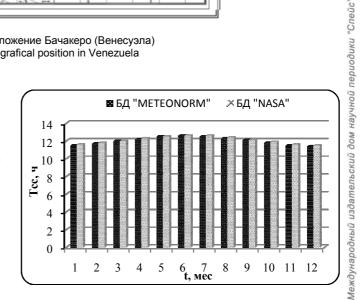


Рис. 2. Сравнение среднемесячной продолжительности солнечного сияния T_{cc} по данным БД "NASA" и БД "METEONORM" в течение года Fig. 2. Comparison of monthly sunshine duration from databases NASA and METEONORM during the year

Анализ данных наблюдений показывает, что продолжительность солнечного сияния Т_{сс} в районе, расположенном недалеко от экватора, довольно высока и равномерна в течение года: составляет примерно 50 % от общего количества часов в месяц. При этом относительные расхождения данных по Тсс, полученных по БД "NASA" и БД "МЕТЕОNORM", не превышает 1 %.

В таблице 1 приводятся данные о среднемноголетней, минимальной и максимальной температуре воздуха ПО данным БД "NASA" И





"METEONORM" в течение года, значения которой оказывают влияние на колебания тепловых потерь солнечной установки.

Из таблицы следует, что минимальное значение по данным БД "NASA" и БД "METEONORM" составляет 20,1 °C, т.е. в течение года температура не будет опускаться ниже этого значения, что позволяет использовать выбранное для данного исследования в качестве рабочей жидкости синтетическое масло, так как минимальная температура воздуха значительно выше точки его замерзания.

Таблица 1

Среднемесячная температура воздуха на высоте 10 м над поверхностью Земли (°C)

Table 1

Monthly average air temperature at 10 m above the ear	Monthly a	verage air to	emperature	at 10	m above	the eart
---	-----------	---------------	------------	-------	---------	----------

		Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне - годовое
NASA		Среднемноголетнее	24,0	25,3	26,3	25,3	24,5	24,1	24,1	24,3	24,2	23,8	23,5	23,2	24,4
	\mathbf{AS}_{A}	Минимум	20,3	21,3	22,5	22,1	21,5	21,1	20,8	20,8	20,8	20,8	20,6	20,1	21,1
	Z	Максимум	27,9	29,3	30,1	28,3	27,4	27,1	27,5	27,9	27,6	26,9	26,5	26,6	27,7
		Среднемноголетнее	28,2	28,2	28,6	29,2	29,4	29,5	29,7	30	29,3	28,7	28,4	28	28,9
	MET.	Минимум	21,4	21,5	22,3	22,5	23	23	23,1	23,2	21,8	22,9	22,6	22	22,4
Σ	2	Максимум	35,5	35	35,8	35,7	36,7	36,3	37,2	37,6	36,3	35,8	35,5	35,4	36,1

На рисунке 3 приведены данные о приходе суммарной солнечной радиации согласно БД "NASA" и БД "METEONORM" [2, 3].

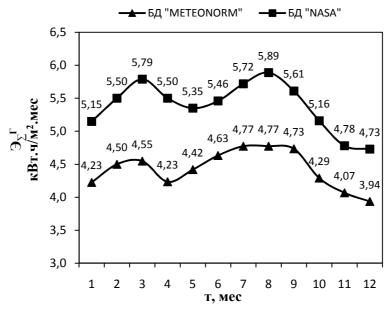


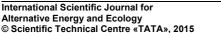
Рис. 3. Сравнение среднемесячного суммарного поступления СР по БД "NASA" и БД "METEONORM" Fig. 3. Monthly average global solar radiation comparison from databases NASA and METEONORM

Отклонения от БД "NASA" по годовому поступрадиации (CP) лению солнечной "METEONORM" составляют 17,81 %.

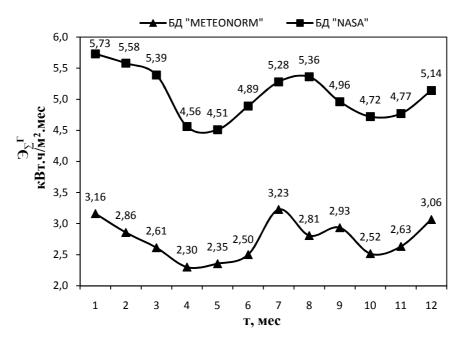
На рисунке 3 видно, что максимальное значение СР в течение года находится в промежутке с 1 июля по 31 августа, а минимальное значение с 1декабря по 31 декабря.

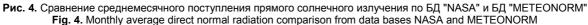
Разница между среднемесячными данными по БД "METEONORM" и БД "NASA" превышает 14 % для всех месяцев года. В марте и апреле отклонение Δ составляет более 21 % и 23 % соответственно.

На рисунке 4 приведены данные о приходе прямой солнечной радиации согласно БД "NASA" и БД "METEONORM".









Отклонения от БД "NASA" по годовым поступлениям прямого солнечного излучения по БД "METEONORM" составляют 45,69 %.

На рисунке 4 видно, что максимальное значение прямой солнечной радиации (ПСР) в течение года приходится на январь и февраль, а минимальное значение - на апрель и май.

Разница между среднемесячными данными по БД "METEONORM" и БД "NASA" превышает 38 % для всех месяцев года. В марте и апреле отклонение Δ более 51 % и 49 % соответственно.

Таким образом, значения прихода суммарной и, особенно, прямой СР, полученных из рассмотренных баз данных, отличаются весьма значительно. В отсутствие данных измерений метеостанций Венесуэлы было принято решение использовать в расчетах

данные из БД "METEONORM", которые покажут более низкий уровень эффективности использования солнечной энергии.

В случае если реальные данные будут ближе к значениям, полученным из БД "NASA", техническая и экономическая эффективность проекта повысится.

Дата и время, выбранные для расчетной точки

Для проведения данного исследования первоначально была выбрана дата с максимальным значением суточной прямой солнечной радиации для расчетной точки. Конкретной датой для расчетной точки было выбрано 18 августа – день с максимальным приходом прямой солнечной радиации (рис. 5).

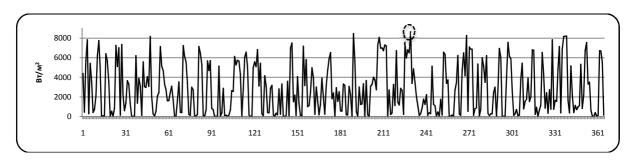


Рис. 5. Суточная удельная интенсивность потока прямой солнечной радиации $R_{
m np}^{
m yq}$ в течение года Fig. 5. Direct normal radiation daily intensity during the year



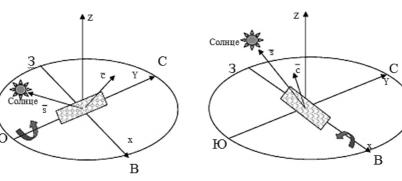
В качестве времени расчетной точки выбирается, как правило, 12:00 по солнечному времени, когда солнце находится в зените и прямое солнечное излучение достигает максимума.

Выбранный день представляет благоприятные условия, такие как достаточная продолжительность солнечного сияния, доступное от восхода до заката, низкий угол падения солнечного излучения над активной поверхностью ПЦ концентратора и максимальная удельная интенсивность потока ПСР для всего года.

Определение ориентации ПЦ концентраторов

После выбора даты расчетной точки, необходимо определить направление ПЦ концентраторов, которые обычно устанавливаются таким образом, чтобы их ось вращения была ориентирована в направлении восток-запад или север-юг. Рисунок 6 показывает две наиболее распространенные ориентации.

Наибольшая выработка энергии обеспечивается при ориентации ПЦ концентратора на север-юг, поэтому ПЦ концентраторы солнечных тепловых установок обычно ориентированы в этом направлении [4].



б) направление восток-запад

Рис. 6. Два основных направления оси вращения ПЦ концентратора Fig. 6. Two main rotation axes of parabolic trough concentrator

а) направление север-юг

Угол падения прямого солнечного излучения над активной поверхностью ПЦ концентратора

Существуют ПЦ концентраторы, которые могут следить за солнцем по двум осям так, чтобы в любое время солнечный вектор был перпендикулярен плоскости открытия ПЦ концентратора. Однако такие ПЦ концентраторы имеют более сложную механическую

конструкцию, требуют дорогостоящего обслуживания. Кроме того, возрастает длина пассивных трубок внутри ПЦ концентратора, что ведет к увеличению тепловых потерь и снижению выдаваемой тепловой мощности. Поэтому на практике используются ПЦ концентраторы, осуществляющие слежение за солнцем по одной оси. На рисунке 7 показана работа такого ПЦ концентратора.

Международный издательский дом научной периодики "Спейс

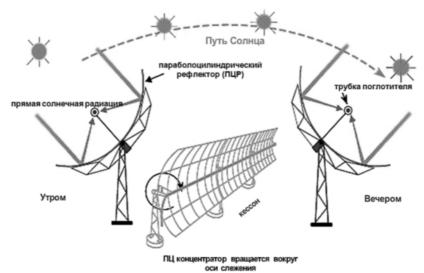


Рис. 7. Схема работы системы слежения за солнцем по одной оси Fig. 7. Principal operation pattern of single axis solar tracking system



Таким образом, с системой слежения за солнцем по одной оси возникает угол, который образуют солнечный вектор и нормаль к плоскости открытия ПЦ концентратора. Этот угол называется углом падения и имеет большое значение при расчете полезной энергии, которую поставляет ПЦ концентратор. Угол падения θ не только определяет, какая часть прямой солнечной радиации попадает на ПЦ концентратор, но также области полезного открытия ПЦ концентратора (потери на конце ПЦ концентратора; потери из-за положения рядов ПЦ концентраторов относительного друг друга, т.е. потери из-за затенения, и т.д.).

Таким образом, для определения термического поведения ПЦ концентратора расчет угла падения является существенным. При этом необходимо иметь в виду, что угол падения, среди прочих факторов, зависит от географических координат (широта и долгота) того места, где расположены ПЦ концентраторы, а также года, дня и времени суток.

При расчете угла падения используются зависимости ПЦ концентраторов, ориентированных в направлении север-юг [5].

Как видно на рисунке 8, в выбранный день, а именно 18 августа в 12:00 по солнечному времени, угол падения (θ) солнечного излучения над активной поверхностью ПЦ концентратора – низкий и составляет 2,3°, что в свою очередь приводит к более низким потерям.

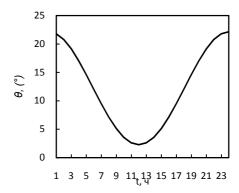


Рис. 8. Угол падения солнечного излучения в зависимости от времени суток для 18 августа

Fig. 8. Daily characteristics of the solar radiation incident angle for the 18th of August

Тип ПЦ концентратора

В приведенном расчетном исследовании рассматривался ПЦ концентратор Eurotrough-150, основные характеристики которого приведены в таблице 2 [6].

Таблица 2

Table 2

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Характеристики ПЦ концентратора Eurotrough 150

Eurothough 150 parabolic trough concentrator characteristics

ПЦ концентратор Eurotrough150					
Ширина параболы (м)	5,77				
Общая длина каждого ПЦ концентратора (м)	148,5				
Количество модулей в ПЦ концентраторе	12				
Наружный диаметр металлической трубки поглотителя (м)	0,07				
Внутренний диаметр металлической трубки абсорбера (м)	0,065				
Площадь активной поверхности ПЦ концентратора (м ²)	817,5				
Шероховатость стороны внутренней трубки поглотителя	20				
Номинальная отражательная способность параболоцилиндрического рефлектора, р	0,94				
Пропускательная способность стеклянной крышки, т	0,965				
Поглощательная способность селективной поверхности, α	0,955				
Коэффициент перехвата, ү	0,90				
Максимальная оптическая эффективность: ρταγ	0,779				



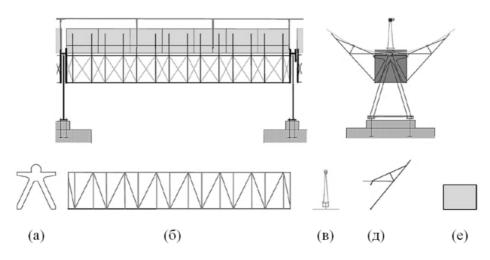


Рис. 9. Структурные элементы ПЦ концентратора Eurotrough: a) передние и задние концевые пластины для крепления на опорах, (б) кессон, (в) опоры трубки поглотителя, (д) консольная часть, (е) часть параболоцилиндрического рефлектора [7] Fig. 9. Euro trough module structural elements: (a) front and rear endplates for mounting to the pylons, (b) space frame structure, (c) receiver supports, (d) cantilever arm, (e) mirror facet [7]



Существуют различные типы синтетического масла, и выбор того или иного из них ориентирован на максимальную рабочую температуру, которая должна быть достигнута. Например, при максимальной температуре 575 °К обычно выбирается синтетическое масло Santotherm 55 (также называемое Therminol 55), которое обладает хорошими тепловыми свойствами и продаётся по доступной цене. При температурах до 672 °К часто используется другой тип масла, TherminolVP-1, которое также может работать при температуре 672 °K, но имеет один недостаток – его точка замерзания 285 °К, поэтому температура TherminolVP-1должна быть выше этого значения.

Существуют и другие масла, способные работать

при температуре 672 °K, точка замерзания которых не так высока. Так, Syltherm 800 – масло с хорошими тепловыми свойствами до 698 °К и температурой замерзания 233 °К. Однако проблема заключается в том, что стоимость Syltherm 800 в 3 раза превышает стоимость TherminolVP-1, и несмотря на то что цены за единицу колеблются в зависимости от количество масла, приобретаемого заказчиком, относительная разница в ценах все же остается.

В качестве рабочей жидкости было выбрано синтетическое масло TherminolVP-1. Отмечается, что минимальная температура воздуха для данного исследования выше его точки замерзания и не опускается ниже 20,1 °C (см. табл. 1).

Наиболее важные свойства TherminolVP-1 приведены в следующей таблице [8] (табл. 3).

Таблица 3

Основные технические характеристики рабочей жидкости TherminolVP-1

Table3

Иеждународный издательский дом научной периодики "Спейс"

Main technical characteristics of heat transfer fluid TherminolVP-1

Максимальная основная температура	400 ° C
Максимальная температура пленки	430 ° C
Кинематическая вязкость при 40 °C	2,48 mm ² / c (cCT)
Температура самовоспламенения	621 ° C
Точка замерзания	12 ° C
Коэффициент теплового расширения	0,00097 / °C
Содержание влаги	<300 частей на миллион
Общая кислотность	<0,2 мг КОН / г
Содержание хлора	<10 частей на миллион
Коррозия меди	<< 1
Средняя молекулярная масса	166

Плотность ρ в кг/м³ и вязкость μ в Па·с этого масла рассчитываются по следующим формулам [8, 9]:

$$\rho(\kappa\Gamma/M^3) = -0.90797T(^{\circ}C) + +0.00078116T^2(^{\circ}C) - 2.367 \cdot 10^{-6} T^3(^{\circ}C) + 1083.25,$$
 (2)



Теплоемкость Therminol VP-1 C_p может быть выражена функцией температуры методом линейной регрессии из таблиц данных, предоставленных производителем масла, по следующему уравнению:

$$Cp(\kappa Дж / \kappa \Gamma \cdot {}^{\circ}K) = 2,731 \cdot 10^{-3} T({}^{\circ}C) + 1,498.$$
 (4)

Масла компании THERMINOL® использовались на солнечных электростанциях с середины 80-х годов XX в, некоторые из них до сих пор используются в своем первоначальном виде. Секрет долговечности и надежности работы масел в функционировании,

отвечающем ежедневным температурным циклам, отличной тепловой стабильности и аналитической поддержке поставщика.

Входная и выходная температура жидкости

Схема генерирования пара с ПЦ концентраторами представлена на рисунке 10. Для получения желательной температуры 285 °C на выходе второго контура необходимо на входе первого контура иметь температуру на 10 °C выше, т.е. 295 °C. Это значение устанавливается при 70 бар (давление производства пара) с учетом температуры насыщения пара 285 °C и потерь примерно в 10 °C в теплообменнике.

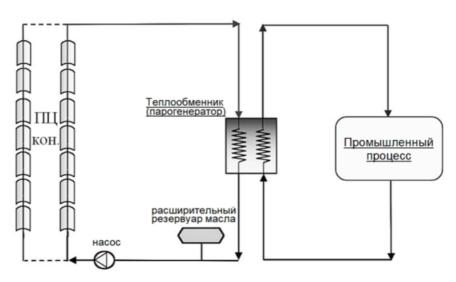


Рис. 10. Генерирующая система пара с ПЦ концентраторами **Fig. 10.** Parabolic trough concentrator steam generating system

Температура на выходе из ПЦ концентратора должна быть немного ниже, чем максимальная рабочая температура, которой может достигать это масло (400 °C). В этом случае температура устанавливается на 390 ° C.

Определение параметров солнечного поля

Типичное солнечное поле ПЦ концентраторов состоит из определенного количества параллельных рядов этих концентраторов. Каждый ряд, в свою очередь, состоит из нескольких ПЦ концентраторов, соединенных последовательно так, что рабочая жидкость циркулирует по трубке поглотителя и нагревается, проходя от входа к выходу каждого ряда.

Для конкретных координат рассматриваемого объекта и его потребности в производстве пара необходимо рассчитать:

- а) количество ПЦ концентраторов, подключенных последовательно в каждом ряду;
 - б) количество рядов, подключенных параллельно.

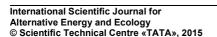
Расчет количества ПЦ концентраторов, подключенных последовательно в ряд

Количество ПЦ концентраторов (N), которые должны быть соединены последовательно в каждом ряду, зависит от повышения температуры (ΔT), требуемого в производственном процессе. Как описано в предыдущем разделе, входная и выходная температура солнечного поля составляет 295 °C и 390 °C соответственно. Таким образом, необходимое колебание температуры в этом случае $\Delta T = 95$ °C.

После расчета ΔT , количество необходимых ПЦ концентраторов определяется отношением [10]:

$$N = \frac{\Delta T}{\Delta T_C} \,, \tag{5}$$

где N — количество ПЦ концентраторов, подключенных последовательно в каждом ряду; C — повышение температуры промышленного применения П-ПНП; ΔT_C — повышение температуры между входом и вы-





 ΔT_C рассчитывается исходя из данных, предоставленных производителем ПЦ концентратора (тепловой эффективности, модификатор из-за угла падения и т.д.)

Это повышение температуры ΔT_{C} , возникающее во время циркуляции рабочей жидкости по трубке поглотителя ПЦ концентратора, будет зависеть от массового расхода масла.

Из опыта эксплуатации ПЦ концентратора известно: турбулентный поток жидкости внутри трубки поглотителя должен характеризоваться числом Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^5$, что позволит избежать деформации трубки при чрезмерном ее нагревании и повреждения ПЦ концентратора [4].

Значение скорости жидкости, необходимое для достижения $Re = 4 \cdot 10^5$, можно получить из следующей формулы:

$$v = \frac{Re \cdot \mu}{\rho D} \,, \tag{6}$$

где μ — динамическая вязкость жидкости (кг/м·с); ν — скорость жидкости (м/с); D — внутренний диаметр трубки поглотителя (м); ρ — плотность синтетического масла кг/м³.

Для определения параметров жидкости в приведенном выше уравнении (ρ , μ) в ходе предварительного расчета параметров солнечного поля необходимо вычислить среднюю температуру жидкости, равную среднему значению номинальных температур входа и выхода из солнечного поля, которая в данном случае равна 342,5 °C.

Принимая во внимание среднее значение температуры масла для солнечного поля и используя уравнение динамической вязкости и плотности (2) и (3), μ должна быть равна 1,89 Па·с 10^{-4} и ρ равна 768,81 кг/м³.

Поскольку внутренний диаметр трубки поглотителя Eurotrough-150 равен 65 мм, из приведенного выше уравнения (10) рассчитывается минимальная скорость, которую должно иметь масло внутри трубки поглотителя: $v=1,51\,\mathrm{m/c}$.

После определения скорости жидкости можно определить массовый расход q_m , исходя из площади поперечного сечения металлической трубки (s), предоставленной производителем ПЦ концентратора, и плотности жидкости:

$$q_m = vs\rho. (7)$$

В нашем случае плотность масла при 342,5 °C равна 768,81 кг/м³; металлическая трубка имеет поперечное сечение $3,32\cdot10^{-3}$ м², что эквивалентно скорости потока 1,51 м/с, а массовый расход составит 3,85 кг/с.

После того как определен массовый расход масла, гарантирующего турбулентный режим, можно рассчитать увеличение температуры испытываемой жидкости между входом и выходом ПЦ концентратора ΔT_C .

Удельные линейные тепловые потери ПЦ концентратора в зависимости от прихода солнечной радиации определяются по зависимостям, приведенным в [11]

Общая длина ПЦ концентратора в случае Eurotrough-150 составляет 148,5 метров, а полная потеря тепла в ПЦ концентраторе (Q_l) для расчетной точки $-Q_l = 45171,97$ Вт.

По зависимостям, приведенным в [11], определяется модификатор из-за угла падения $K(\theta)=0,99$ и полезная тепловая мощность, которую дает ПЦ концентратор. При максимальной оптической эффективности $\eta_{opt,0^\circ}=0,779$ и коэффициенте загрязнения

 Π Ц концентратора 0,95, полезная тепловая мощность, обеспеченная Π Ц концентратором Eurotrough-150, составляет 496,19 кВт

Эта мощность расходуется на повышение температуры масла в первом контуре установки:

$$N_{\mathcal{Q}} = \int_{T}^{T_0} C_{\mathcal{P}} dT , \qquad (8)$$

где C_P – удельная теплоемкость при постоянном давлении масла; T_i – температура масла на входе ПЦ концентратора; T_o – температура масла на выходе ПЦ концентратора.

Леждународный издательский дом научной периодики "Спейс'

Температура масла на входе равна средней температуре масла в солнечном поле (342,5 °C), и, если известно конкретное уравнение теплоемкости в зависимости от температуры (8), получается уравнение второй степени, где неизвестной является температура масла на выходе из ПЦ концентратора: $0.001366\,T_0^2+1.498\,T_0-802.05=0$.

Данное уравнение справедливо при $T_o = 393,94$ °C, поэтому повышение температуры между входом и выходом ПЦ концентратора

$$\Delta T_C = T_0 - T_i = 393,94 - 342,5 = 51,44 \,^{\circ}\text{C}.$$
 (9)

Так как необходимо получить общее повышение температуры $\Delta T = 95$ °C в каждом ряду ПЦ концентраторов, и каждый ПЦ концентратор имеет повышение температуры $\Delta T_C = 51,44$ °C, количество ПЦ концентраторов, которые должны быть соединены последовательно в каждом ряду, рассчитывается

следующем образом:
$$N = \frac{\Delta T}{\Delta T_C} = \frac{95}{51,44} = 1,85$$
 .

№ 10-11

(174-175)

В этих условиях лучше выбрать четное число ПЦ концентраторов, так чтобы ряды были расположены в виде «U» и приняли конфигурацию трубной системы с центральным снабжением (одинаковое количе-



ство ПЦ концентраторов с каждой стороны для сбалансированности схемы).

Итак, для того чтобы принять эту конфигурацию, количество ПЦ концентраторов в каждом ряду округляется до двух. При этом массовый расход несколько увеличится, но существенного влияния на число Рейнольдса не окажет.

Далее показан новый массовый расход масла TherminolVP-1, которое циркулирует внутри трубок

поглотителей:
$$q_m = 3,85 \cdot \left(\frac{2}{1,85}\right) = 4,16$$
кг / с

Это значение сохраняется в пределах рекомендуемого, которое должно быть 3–5 кг/с, следовательно, принимается конфигурация из двух ПЦ концентраторов в ряду.

Расчет количества рядов, подключенных параллельно

Следующий шаг в выборе размера солнечного поля – определение количества рядов, которые будут установлены параллельно. Это число зависит от тепловой мощности, требуемой в промышленном процессе.

Поскольку в ряду 2 параллельно соединенных ПЦ концентратора, полезная тепловая мощность, обеспеченная каждым рядом в расчетной точке,

равна удвоенной мощности, обеспечиваемой одним ПЦ концентратором, а именно: $N_O = 2 \cdot 496, 19 = 992, 38 \ \mathrm{kBt}$.

Суточная тепловая энергия, вырабатываемая одним рядом солнечного поля, рассчитывается по часовому ряду значений прихода СР и для рассматриваемых суток составляет 9408,93 кВт. Количество параллельных рядов, установленных в солнечном поле, для получения 100 % удовлетворения тепловых потребностей повышения нефтеотдачи для расчетной точки вычисляется следующим образом:

Количество параллельных рядов $14,6535 \text{ MBt} \cdot 24 \text{ y} / 9,408 \text{ MBt} = 37,38$

Для обеспечения безопасности конструкции допускается 10 % превышение, которое в свою очередь включает возможные общие потери в трубках генерирующего оборудования, КПД парогенератора (солнечного поля) и потери в результате конденсации пара. С учётом данных потерь получается 41,12, так что общее количество рядов равно 42, что обеспечивает 100 % покрытие для расчетной точки.

Таким образом, солнечное поле будет состоять из 42 параллельных рядов по 2 ПЦ концентратора в каждом ряду.

Иеждународный издательский дом научной периодики "Спейс"

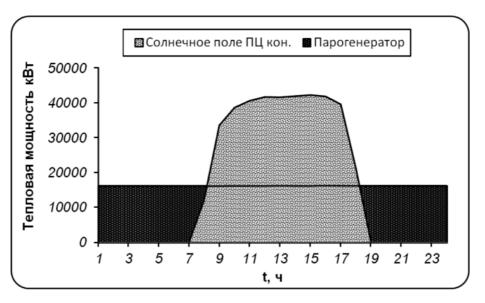


Рис. 11. Тепловая мощность, вырабатываемая в течение суток парогенератором и солнечным полем ПЦ концентраторов **Fig. 11.** Daily produced thermal power capacity of steam generator and parabolic trough concentrator

На рисунке 11 показаны результаты расчета для суток с максимальным приходом СР 395,17 МВт·ч. Для нагнетания в нефтеносные слои необходим пар с температурой 285 °С и давлением 70 бар. В случае использования обычного парогенератора пар подается постоянно в течение 24 часов (зона выделена на рисунке 12). Солнечное поле ПЦ концентраторов с рассчитанными ранее параметрами производит тот же объем пара, но в период с 7:00 до 19:00 часов.

Анализ работы солнечной тепловой установки с ПЦ концентраторами в течение года

Следует отметить, что поскольку параметры солнечного поля ПЦ концентраторов выбирались по суткам с весьма высоким приходом солнечной радиации, в целом в течение года ПЦ концентраторы обеспечат 33,77 % тепловой энергии, а это приведет к соответст-



вующей годовой экономии органического топлива. При этом по месяцам процент солнечной тепловой энергии будет варьироваться от 29 % до 42 %.

Если параметры солнечного поля ПЦ концентраторов вычислять для дня с приходом СР близким к среднему за рассматриваемый период значению, то солнечное поле концентраторов будет состоять из 20 параллельных рядов по 14 ПЦ концентраторов в каждом ряду, а производство солнечной тепловой энергии достигнет 113 %.

Результаты расчетов представлены на рисунке 12.

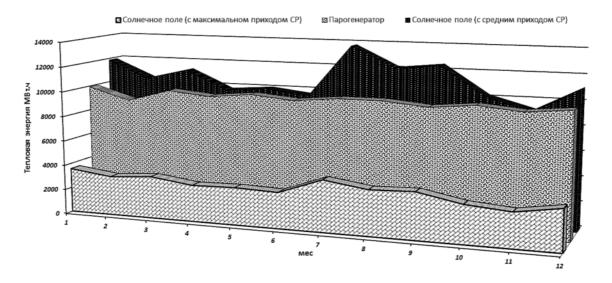


Рис. 12. Энергия, вырабатываемая солнечным полем и обычным парогенератором на базе природного газа Fig. 12. Produced energy of solar steam plant and typical gas steam generator

Заключение

Изложена методика определения параметров солнечного поля ПЦ концентраторов, обеспечивающего производство пара для метода П-ПНП.

Для исследования типового месторождения, где используется метод непрерывного нагнетания пара в соответствии с солнечной радиацией, типичной для района Бачакеро республики Венесуэла, был выбран тип и ориентация ПЦ концентраторов, тип и температура рабочей жидкости, рассчитано обще число ПЦ концентраторов.

Показано, что для условий Бачакеро 280 ПЦ концентраторов полностью обеспечивают производство пара, необходимое для применения ПНП технологий.

Эффективность использования ПЦ концентраторов для производства необходимого количества пара по сравнению с использованием органического топлива рассчитывается на основе финансово-экономического анализа.

Список литературы

- 1. Хеел А.П.Г., Ванник Дж.Н.М., Бентоуати С. и др. Влияние суточных и сезонных циклов в солнечном произведенном паре на повышении нефтеотдачи пластов // ПНП Конференция нефти и газа. Маскат, Оман, 2010.
- 2. NASA. Атмосферные исследования центра обработки данных национального управления по воз-

духоплаванию и исследованию космического пространства. [Эл. pecypc] http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/

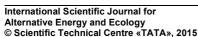
3. METEONORM Version 6.0.2.5. METEOTEST Fabrikstrasse 14 CH-3012 Bem Switzerland.

Международный издательский дом научной периодики "Спейс'

- 4. Zarza E. Captadores Cilindro Parabólicos. Componentes y parámetros principales. Tema 3 de la Asignatura 5 del Módulo I, UIMP-CSIC en Energías Renovables, Pilas de Combustible e Hidrógeno.
- 5. Rabl A. Active solar collectors and their applications. Ed. Oxford University Press, New York (EEUU). 1985. P. 1-92. ISBN: 0195035461.
- 6. Gever Michael et al. EUROTROUGH Parabolic Trough Collector eloped for Cost Efficient Solar Power Generation // 11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, Sept. 2002.
- 7. Gunther M., Joemann M., Csambor S. Advanced csp teaching materials. 2011. Chapter 5. P. 27–28.
- 8. THERMINOL VP-1. Main physical and chemical characteristics of THERMINOL VP-1. Technical Bulletin 7239115B. St Louis, 1999. [Электронный ресурс]: www.therminol.com
- 9. Mathew S., Visavale G., Mali V. CFD Analysis of a Heat Collector Element in a Solar Parabolic Trough Collector.
- 10. Goswami D.Y, Kreith F. Energy Conversion.CRC Press, 2007. P. 465-474.
- 11. Кузнецова В.А., Пугачев Р.В., Росендо Чакон М.Е., Лопес Сааб А.С. Использование солнечной тепловой установки с параболоцилиндрическими







концентраторами для повышения нефтеотдачи пластов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2015. № 10. C. 118-135.

References

- 1. Heel A.P.G., Vannik J.N.M., Bentouati S. et al. Vliânie sutočnyh i sezonnyh ciklov v solnečnom proizvedennom pare na povyšenii nefteotdači plastov. PNP Konferenciâneftiigaza, Maskat, Oman, 2010 (in Russ.).
- 2. NASA. Atmosfernye issledovaniâ centra obrabotki dannyh nacional'nogo upravleniâ povozduhoplavaniû I issledovaniû kosmičeskogo prostranstva. Available at: http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/ (in Russ.).
- 3. METEONORM Version 6.0.2.5. METEOTEST Fabrikstrasse 14 CH-3012 Bem Switzerland (in Eng.).
- 4. Zarza E. Captadores Cilindro Parabólicos. Componentes y parámetros principales. Tema 3 de la Asignatura 5 del Módulo I, UIMP-CSIC en Energías Renovables, Pilas de Combustible e Hidrógeno (in Span.).
- 5. Rabl A. Active solar collectors and their applications. Ed. Oxford University Press, New York (EEUU). 1985. P. 1-92. ISBN: 0195035461(in Eng.).

- 6. Geyer Michael et al. EUROTROUGH Parabolic Trough Collector eloped for Cost Efficient Solar Power Generation. 11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, Sept. 2002 (in Eng.).
- 7. Gunther M., Joemann M., Csambor S. Advanced csp teaching materials, 2011, Chapter 5, pp. 27-28 (in Eng.).
- 8. THERMINOL VP-1. Main physical and chemical characteristics of THERMINOL VP-1. Technical Bulle-7239115B. St Louis, 1999. Available at: www.therminol.com (in Eng.).
- 9. Mathew S., Visavale G., Mali V. CFD Analysis of a Heat Collector Element in a Solar Parabolic Trough Collector (in Eng.).
- 10. Goswami D.Y, Kreith F. Energy Conversion. CRC Press, 2007, pp. 465-474.
- 11. Kuznetsova V.A., Pugachev R.V., Rosendo Chakon M.E., Lopes Saab A.S. Ispol'zovanie solnečnoj teplovoi ustanovki parabolocilindričeskimi S koncentratorami dla povyšenia nefteotdači plastov // Scientific Journal «Al 'ternativnaâ International ènergetika i èkologià» (ISJAEE), 2015, no. 10, pp. 118-135 (in Russ.).



Иеждународный издательский дом научной периодики "Спейс'

Транслитерация по ISO 9:1995



АКЦИЯ «АРХИВНЫЕ НОМЕРА 2000–2013»:

Научно-технический центр «TATA» предлагает приобрести архивные номера журналов

- 1. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE) (2000-2013);
- 2. Международный научный журнал «Письма в «АЭЭ» (№ 1, 2014);
- 3. Международный научный журнал «Космонавтика» (№ 1, 2011; № 1-2 и № 3-4, 2012);
- Международный научный журнал «Фундаментальная и прикладная физика» (№ 1, 2012)
- Международный научный журнал «История оружия и военное искусство» (№ 1-2, 2012).

стоимость одного номера – 360 руб. (почтовые расходы на территории РФ включены); стоимость комплекта из 6 номеров (любых) – 1 860 руб. (почтовые расходы на территории РФ включены); стоимость комплекта из 12 номеров (любых) – 3 000 руб. (почтовые расходы на территории РФ включены).

количество журналов ограничено!

по вопросам приобретения обращаться e-mail: p.maximova@hydrogen.ru (Максимова Полина Александровна)



