

УДК 621.11; 620.97

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-356-370

**Для цитирования:** Конверсионное использование моделей рабочих процессов турбоустановок ракетных двигателей в приложении к локальной энергетике / В. А. Аброськин, В. А. Чернорот, А. А. Кишкин и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 356–370. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-356-370.

**For citation:** Abroskin V. A., Chernorot V. A., Kishkin A. A., Delkov A. V., Zhuravlev V. Yu. Conversion use of models of working processes of rocket engine turbine installations in the application to local power engineering. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 356–370. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-356-370.

## **Конверсионное использование моделей рабочих процессов турбоустановок ракетных двигателей в приложении к локальной энергетике**

В. А. Аброськин<sup>1</sup>, В. А. Чернорот<sup>1</sup>, А. А. Кишкин<sup>2\*</sup>, А. В. Делков<sup>2</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО ИТЦ «СОЮЗ-ЭНЕРГО»

Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 39а

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: spsp99@mail.ru

*В настоящей работе рассмотрена концепция использования методов расчета и проектирования энергетических установок ракетных двигателей для конверсионного моделирования локальной энергетики арктических и северных районов Красноярского края с очевидным обобщением на соседние административные формирования со сходными климатическими и структурно логистическими условиями. Предложенная структура содержит блоки электрогенерации, привязанные как к промышленным отходам деревообработки, так и к природным и промышленным тепловым хвостам, идентифицируемым как источники низкопотенциального тепла, а также в качестве источника предложены современные реакторные установки малой мощности блочного необслуживаемого исполнения. Объединяющим элементом энергоустановок является турбогенератор, спроектированный с учетом использования нетрадиционного, часто бросового и природного низкопотенциального тепла.*

*Ключевые слова:* турбины реактивные, центробежные и центростремительные, энергетические технологии, низкопотенциальное тепло, геотермальное тепло, тепловые сбросы, атомные станции малой мощности.

## **Conversion use of models of working processes of rocket engine turbine installations in the application to local power engineering**

V. A. Abroskin<sup>1</sup>, V. A. Chernorot<sup>1</sup>, A. A. Kishkin<sup>2\*</sup>, A. V. Delkov<sup>2</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО ITC "SOYUZ-ENERGO"

39a, Lenin St., Zheleznogorsk, 662971, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: spsp99@mail.ru

*In this paper, we consider the concept of using methods for calculating and designing rocket engine power plants for conversion modeling of local energy in the Arctic and northern regions of the Krasnoyarsk Territory, with an obvious generalization to neighboring administrative formations with similar climatic and structural and logistical conditions. The proposed structure contains power generation units linked to both industrial woodworking waste and natural and industrial heat tailings, identified as sources of low-potential heat, as well as modern low-power reactor plants of block maintenance-free design. The unifying element of power plants is a turbo generator, designed with the use of unconventional, often waste and natural low-potential heat.*

*Keywords: jet turbines, centrifugal and centripetal, energy technologies, low-potential heat, geothermal heat, thermal discharges, low-power nuclear power plants.*

## **Введение**

Накопленный опыт расчетов параметров газотурбинных установок ракетных двигателей позволяет применить цифровые модели к технологиям утилизации низкопотенциального тепла для создания энергетических установок малой мощности.

В мировой постановке проблем малой энергетической генерации, использующей нетрадиционные виды топлива, источников энергии, возобновляемой и ветровой энергетики [1; 2], рассматриваются аспекты совершенствования, характеристик [3], за счет детального исследования рабочих процессов в энергетическом оборудовании, использующем нетрадиционные редкие циклы [4]. В Российской Федерации задачи малой распределенной энергетики ставятся и определяются с не меньшим охватом.

Согласно докладу главы регионального министерства промышленности, энергетики и ЖКХ Евгения Афанасьева на 10 Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее», проходившем в г. Санкт-Петербурге, энергосистема Арктической зоны Красноярского края включает в себя две гидроэлектростанции – Усть-Хантайская и Курейская, три газовых ТЭЦ, обеспечивающие электроэнергией Норильский промышленный район, а также более 60 дизельных электростанций и 48 котельных в энергоизолированных поселках. Основными проблемами энергосистемы северных районов является значительный износ оборудования, высокая стоимость доставки топлива, а также ограничения поставки топлива, связанные с коротким периодом северного завоза. Из краевого бюджета выделяется значительная доля средств на субсидирование затрат на выработку энергии.

Для развития северных регионов и создания инфраструктуры, позволяющей создать достойные социальные условия жизни местного населения и развития промысловых хозяйств, принимаемые меры в области обеспечения энергией недостаточны.

С целью повышения эффективности энергообеспечения, на территории поселка Тура Эвенкийского района в настоящее время внедрена утилизация сбросного тепла на трех дизельных электростанциях с получением тепловой энергии в виде горячей воды. В России в целом и Красноярском крае имеются современные энергетические технологии, позволяющие значительно уменьшить эксплуатационные затраты [5–8].

В ООО «ИТЦ «Союз-Энерго» совместно с СибГУ им. М. Ф. Решетнева разработана уникальная технология преобразования низкопотенциальной тепловой энергии (теплая вода, теплый воздух и отходящие горячие газы и т. д.) в органическом цикле Ренкина в электроэнергию. Данная технология основана на использовании в цикле органического низкокипящего рабочего тела (фреона), в сочетании как типового мощностного ряда турбин, так и экспериментальной конструкции центробежной реактивной турбины, позволяющей, в отличие от типовых конструкций, работать в области насыщенного (конденсирующегося) пара, без нарушения работы

соплового аппарата и турбины, а также конструктивно объединяющего часть функции циркуляционного нагнетателя [9; 10] и турбины, что обеспечивает снижение энергетических потерь за счет уменьшения механических потерь ротора и повышения общего КПД турбины [11]. В качестве электрогенератора применен высокооборотный генератор на постоянных магнитах.

Математическое моделирование и инженерные расчеты выполнены ИТЦ «СОЮЗ-ЭНЕРГО» и кафедрой холодильной и криогенной техники СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

**Математическое моделирование**

Принципиальная структурная схема установки утилизатора тепловых выбросов на основе паротурбинной установки (ПТУ) представлена на рис. 1.

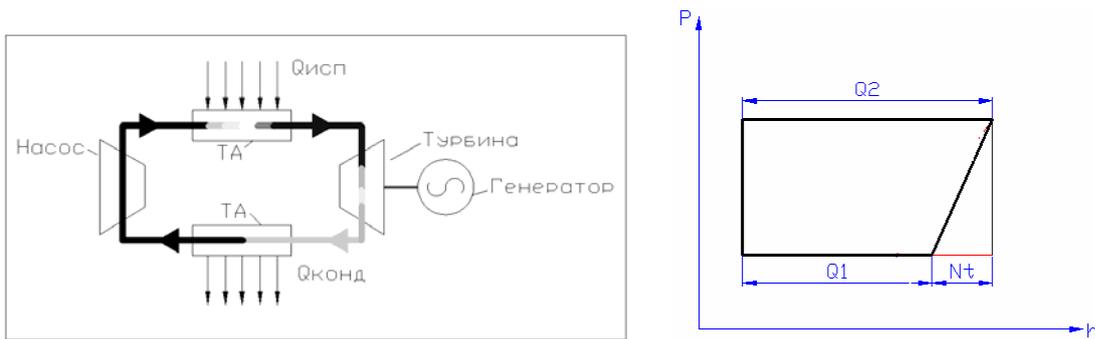


Рис. 1. Структурная схема установки и цикл работы:  
 ТА – теплообменный аппарат;  $Q_2$  – теплота, подведенная в испарителе;  
 $Q_1$  – теплота, отведенная в конденсаторе;  $Nt$  – мощность турбины

Fig. 1. Block diagram of the installation and its operation cycle

Математическая модель ПТУ на органических рабочих телах (ОРТ) строится на четырех основных уравнениях, в различных интерпретациях составляющих основу технической гидромеханики и рассматривающей течение сжимаемых жидкостей с теплообменом. Ниже эти уравнения представлены для одномерного потока в двух формах – дифференциальной и интегральной:

– уравнение движения (уравнение Эйлера):

$$\rho \frac{d\bar{W}}{dt} = \rho \bar{F} - grad(p); \tag{1}$$

– уравнение механической энергии (уравнение Бернулли):

$$\frac{\rho W^2}{2} + p = const; \tag{2}$$

где  $\rho$  – плотность;  $W$  – скорость;  $t$  – время;  $F$  – сила;  $p$  – давление;

– уравнение неразрывности в дифференциальной форме:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div(\bar{W}) = 0; \tag{3}$$

– уравнение неразрывности в интегральной форме:

$$\rho S W = const, \tag{4}$$

где  $S$  – площадь проходного сечения канала;

– уравнение сохранения энергии в термодинамических параметрах в дифференциальной форме:

$$\rho \frac{du}{dt} = -p \operatorname{div} \bar{W} + \mu D - \operatorname{div} \bar{q} + \rho \frac{dq}{dt}; \quad (5)$$

– уравнение сохранения энергии в термодинамических параметрах в интегральной форме (первый закон термодинамики):

$$\Delta U = A + \Delta Q, \quad (6)$$

где  $\mu D$  – работа сил вязкости;  $u$ ,  $U$  – внутренняя энергия;  $q$ ,  $Q$  – тепловой поток;

– уравнение состояния (в общем виде) (см. рис. 1):

$$f(p, \rho, T) = 0. \quad (7)$$

Четыре уравнения содержат четыре независимых физических величины:  $p$ ,  $\rho$ ,  $q$ ,  $T$ . Таким образом, система является замкнутой. Эти уравнения универсальны и могут быть применены к описанию любых процессов в турбоустановках теплоэнергетических систем. Систему этих уравнений можно конкретизировать для различных уровней в соответствии с принятой иерархией модели:

– уровень конечных объемов. Рассматривает геометрический объем, настолько малый, чтобы иметь возможность применения дифференциальных уравнений;

– уровень элементов системы. Рассматривает конкретный элемент (компонент сложной системы) – теплообменник, насос, капиллярную трубку. Соответственно уравнения интегральные. На этом уровне получаются уравнения, получившие название компонентных уравнений элемента;

– уровень системы. Рассматривает систему в целом, уравнения интегральные. Эти уравнения в литературе получили название топологических уравнений системы.

Процедура вычислений отражена на диаграмме рабочего цикла (рис. 2). Перепад давлений (1) задает высоту цикла на диаграмме, тепловой поток (6) задает ширину цикла. Балансировка цикла происходит по расходу и температуре. Система уравнений решается численно методом итерации расхода на балансе уравнения энергии. Результат решения системы уравнений определяет положение цикла на диаграмме с привязкой к свойствам рабочего тела (2), (4); (6), (7).

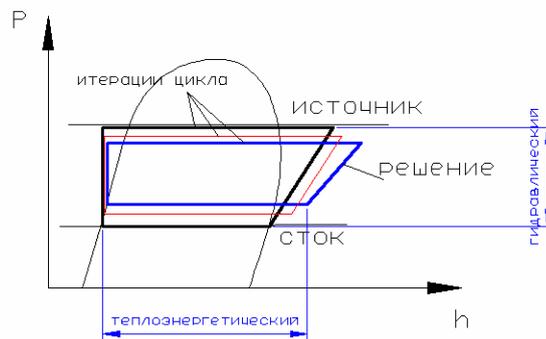


Рис. 2. Определение параметров цикла по системе уравнений

Fig. 2. Determination of the cycle parameters by the system of equations

Для учета изменяющихся свойств рабочего тела была разработана поверхность состояния рабочего тела. Математическая поверхность состояния (рис. 3) органического рабочего тела в координатах давления  $p$ , удельного объема  $v$  ( $v = 1/\rho$ ) и температуры  $T$  позволяет проводить

расчеты циклов энергоустановок численными методами с учетом непрерывного изменения свойств. Кроме того, с использованием поверхности возможно получение основных параметров тела (энтальпия, энтропия, теплоемкость, скорость звука и т. д.) с использованием дифференциальных уравнений термодинамики.

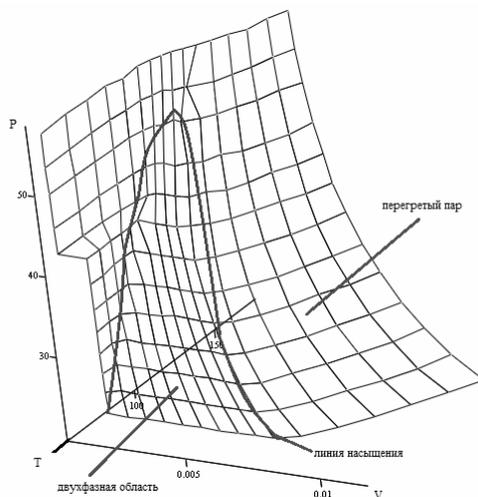


Рис. 3. Поверхность состояния фреона R22

Fig. 3. The surface condition of freon R22

Расчетная характеристика по адиабатной мощности турбины хорошо согласуется с теоретическими результатами. При повышении напора насоса увеличивается перепад давлений в системе, а значит и перепад температур (рис. 4). Увеличивается удельная работа турбины, растет массовый расход.

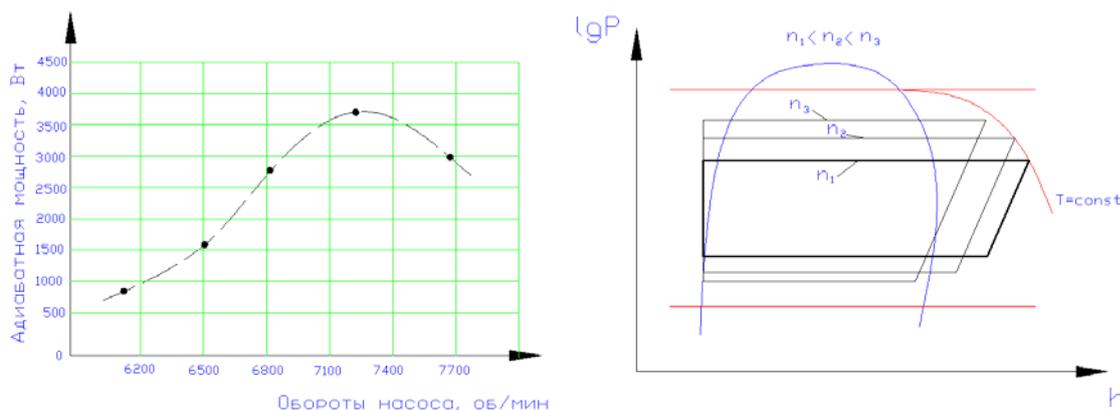


Рис. 4. Реакция ПТУ ОРТ на изменение оборотов насоса

Fig. 4. Reaction of the steam turbine unit on the change of pump speed

Вышеприведенные результаты численных экспериментов наряду с отражением адекватности математической модели теоретическим сведениям о работе ПТУ позволяют сформулировать следующее: вследствие неоднозначности влияния (в том числе и взаимовлияния) управляющих параметров на работу ПТУ ОРТ оптимизация, конструкторская и режимная, подобных паротурбинных установок – задача комплексная, предполагающая рассмотрение широкого спектра возможных состояний системы. Один из эффективных способов решения такой

задачи – разработка алгоритмов и методик ее решения на основе математической модели с проведением численных исследований.

Для верификации модели был спроектирован испытательный стенд установки (рис. 5). Для оценки мощности турбины требуются параметры сообщенного воде количества энергии, что оценивается посредством данных о давлении и температуре воды на входе и на выходе из насоса. Основным элемент лабораторной установки – паровая турбина.



Рис. 5. Испытательный стенд ПТУ на ОРТ

Fig. 5. The test stand of the steam turbine unit

### Предлагаемые решения

Анализ результатов работы экспериментального турбогенератора «Термоэл», конструктивная проработка и расчеты показывают, что турбогенератор может обеспечить выработку электроэнергии от единиц до нескольких тысяч кВт, обеспечивая КПД от 20 до 40 % при температуре теплоносителя (вода, газ) от 20 °С и выше.

В настоящее время разрабатывается два турбогенератора модульного исполнения для исследовательского стенда переплавки металлических радиоактивных отходов на одном из предприятий концерна «Росатом» [12]. Трехмерные модели электрогенераторов мощностью 100 кВт на единой раме и 1 МВт в 20 футовом контейнере приведены на рис. 6.



Рис. 6. Турбогенераторы мощностью 100 и 1000 кВт

Fig. 6. 100 kW and 1000 kW turbo generators

Предлагается рассмотреть следующие технические решения по созданию или модернизации существующих локальных энергетических систем:

– утилизация тепла с выработкой дополнительной электроэнергии существующих дизельных электростанций;

- местное производство по выработке бытового жидкого топлива и пироугля из местной древесины санитарной очистки леса и отходов переработки древесины;
- мини ТЭЦ на местных отходах древесины (опилки, стружка, щепа, ветки деревьев и кустарников);
- использование тепла геотермальных вод для выработки электроэнергии;
- использование атомной энергии атомных электростанций малой мощности для получения электроэнергии и горячей воды.

В большинстве своем для выработки электроэнергии в Северных районах используются дизельные электростанции. При работе этих станций выбрасывается в атмосферу большое количество бросового тепла, так называемые тепловые хвосты. Тепловые хвосты образуются из отходящих газов продуктов сгорания, системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания и системы охлаждения масла. На 1 МВт вырабатываемой электроэнергии образуется 1–2 МВт тепла.

В последнее время для утилизации тепловых хвостов используются когенерационные установки, обеспечивающие комбинированный процесс – выработку электроэнергии и тепла в виде горячей воды. Установка утилизации тепла отходящих газов и получения горячей воды приведена на рис. 7.



Рис. 7. Установка утилизации тепла отходящих газов

Fig. 7. Waste gas heat recovery unit

Одним из перспективных и экономически выгодным техническим решением является создание комплексного энергоцентра с комбинированной выработкой электроэнергии, горячей воды и электроэнергии из тепла горячей воды. Для этого к когенерационной установке необходимо добавить турбогенераторный модуль «Термоэл».

При мощности дизель-генератора 1 МВт можно дополнительно получить 0,5 МВт электроэнергии и 0,5 МВт тепла в виде горячей воды.

При годовой выработке электроэнергии  $500 \text{ кВт} \cdot 8000 \text{ час} = 4\,000\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  в год выручка от реализации электроэнергии при стоимости 1 кВт·ч электроэнергии 10 руб. составит 4 млн кВт·ч·10 = 40 млн руб. Срок окупаемости по расчетам составляет 1,1 года. Схема турбогенератора «Термоэл» с использованием тепловых хвостов приведена на рис. 8.

Самой северной точкой переработки древесины является г. Лесосибирск, где деревоперерабатывающие предприятия расположились вдоль р. Енисей на протяжении 40 км. На протяжении многих лет своей деятельности накоплено большое количество отходов лесопиления.

Древесина является одним из сырьевых топливных источников. Теплотворная способность древесины составляет 4600 ккал/кг при насыпной массе 550–600 кг/м<sup>3</sup>. Теплотворная способ-

ность древесных брикетов составляет 7800 ккал/кг при насыпной массе 600 кг/м<sup>3</sup>. Теплотворная способность дизельного топлива в среднем 10000 ккал/кг при объемной массе 800 кг/м<sup>3</sup>. Анализ характеристик различных видов древесных брикетов и дизельного топлива показывает что, древесные брикеты в полной мере могут заменить дизельное топливо.

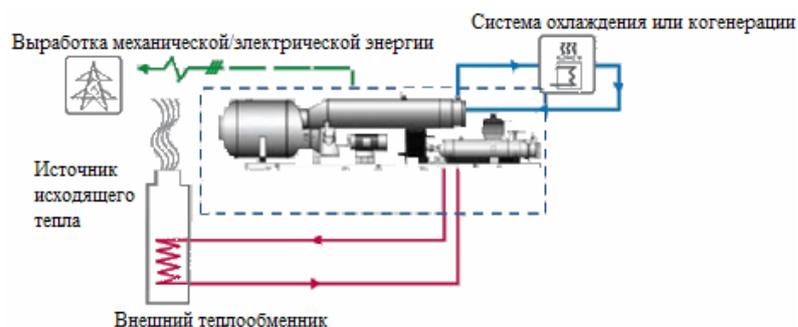


Рис. 8. Схема утилизации тепловых хвостов

Fig. 8. Heat tailings utilization scheme

В последнее десятилетие российские ученые, конструкторы и производители оборудования разработали технологию быстрого пиролиза древесинных отходов с получением бытового жидкого топлива и пироугля. На базе разработанной технологии изготавливается модульные комплексы.

Трехмерная модель комплекса установки быстрого пиролиза приведена на рис. 9.

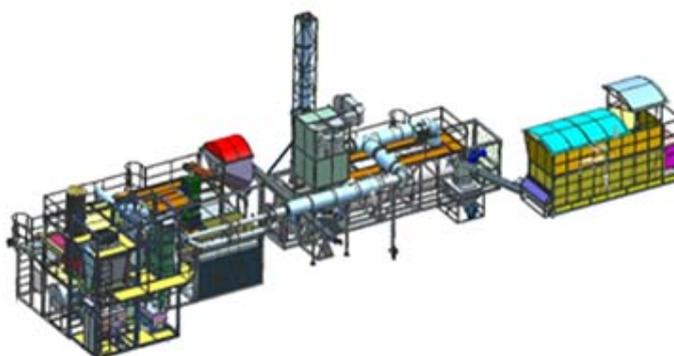


Рис. 9. Общий вид установки быстрого пиролиза с габаритными размерами 31,5×7×9,1 [м]

Fig. 9. General view of the rapid pyrolysis plant

Технические характеристики установки:

- производительность, кг/ч – 500, по сухому;
- энергопотребление, кВт\*ч – 25;
- режим работы – непрерывный;
- максимальная температура в реакторе, °С – 650;
- максимальная температура в топке, °С – 1000.

Выход продуктов пиролиза:

- газ, кг/ч – 130;
- углерод, кг/ч – 100;
- бионефть, кг/ч – 270.

Жидкое бытовое топливо (бионефть) может быть использовано в котельных в отдаленных северных районах, углерод (пироуголь) тоже может быть использован как твердое топливо с вдуванием углеродного порошка в топку.

При дальнейшей перегонке бионефти можно получить:

- фенол-формальдегидный клей для производства фанеры и клееной древесины;
- древесную уксусную кислоту – антисептик и удобрение для обработки почв.

В настоящее время в России изготавливаются и реализуются котельные мощностью от 100 кВт до 50 МВт, работающие на древесных отходах. При совместной работе котельных с турбогенераторами «Термоэл» есть возможность создать эффективную энергетическую систему выработки тепла в виде горячей воды и электроэнергии, а также освободиться от могокилометровых завалов древесных отходов в г. Лесосибирске.

На рис. 10 приведена трехмерная модель модульной котельной мощностью 1–3 МВт.

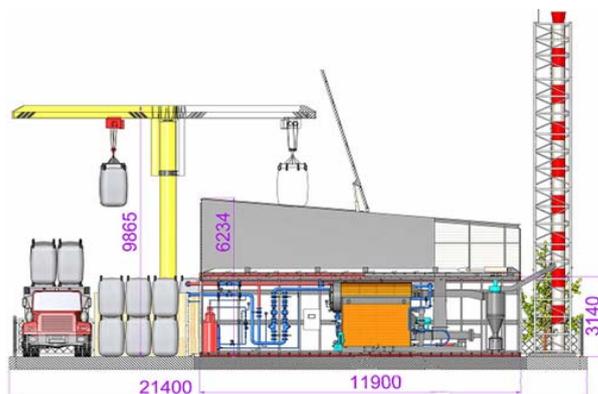


Рис. 10. Модульно-двухблочная котельная ООО «СОЮЗ» тепловой мощностью от 1 до 3 МВт с многотопливными котлами (щепа, пеллеты, брикеты, уголь)

Fig. 10. Modular-2-block boiler house of SOYUZ LLC with a thermal capacity of 1 to 3 MW with multi-fuel boilers (wood chips, pellets, briquettes, coal)

Одним из неиссякаемых источников энергии являются геотермальное тепло, выделяющееся в результате ядерных процессов внутри нашей планеты.

Известно, что внутри Земли находится количество воды, превышающее её количество на поверхности и за счет водного теплообмена происходит выделение тепла в атмосферу [9].

Красноярский край частично располагается на территории Западно-Сибирской равнины. Геологические исследования поиска нефтяных месторождений, а также гидрологические исследования на огромной территории еще в 50-е гг. прошлого столетия показали, что под нами на глубине от нескольких сотен до нескольких тысяч метров располагается источник горячей воды с объемом, превышающим Средиземное море.

Под Бийском, Семипалатинском или Кустанаем температура воды достигает лишь +5...+10 градусов Цельсия, дальше на север, на широте Павлодара, Петропавловска, Томска, где глубина составляет уже 500–600 м, термометр в буровой скважине показывает +25 градусов по Цельсию (рис. 11).

Еще более горячая вода (+75 градусов Цельсия) выявлена на глубине 1,5 км близ города Тюмень. А там, где приходится бурить буровые скважины на глубину 2,5–3 км, временами на высоту до 50 м вырываются фонтаны настоящего кипятка. Температура одного из таких искусственных гейзеров (в Колпашеве) достигает +125 градусов Цельсия!

В России имеется опыт использования геотермального тепла для выработки электроэнергии. В 1965 г. институтом «Теплофизика» СО АН СССР была построена на Среднепаратунском месторождении фреоновая геотермальная электростанция мощностью 1 МВт при температуре геотермальной воды 80 °С. В качестве агрегата для выработки электроэнергии была применена лопаточная турбина, КПД которой составил не более 7 %, остальное тепло горячей воды использовалось на нужды теплоснабжения [13; 14].



Рис. 11. Геотермальное теплое море

Fig. 11. Geothermal warm sea

Используя центробежную турбину модели «Термоэл» можно создать в местах наличия термальных вод локальные системы электро- и теплоснабжения с высокой энергетической эффективностью без ущерба окружающей среде. Для поиска геотермальных горизонтов с относительно высокой температурой 40–70 °С необходимо провести инженерно-геологические и гидрологические изыскания. Принципиальная схема использования геотермальных вод для производства электроэнергии приведена на рис. 12.

По опыту строительства геотермальных электростанций в Европе стоимость капитальных вложений составляет 3 000 дол. за 1 кВт вырабатываемой электроэнергии.

Для обеспечения надежной автономной системой тепло- и электроснабжения небольших поселений и производств малой мощности стоит рассмотреть возможность строительства атомных станций малой мощности (АСММ) до 400 МВт. Разработки по созданию АСММ велись еще 50 лет назад. Однако они не завершились конкретным внедрением.

В настоящее время разработаны энергоисточники на базе реакторной установки (РУ) КЛТ-40С мощностью 35 МВт, РУ АБВ-6Э мощностью 6 МВт и РУ РИТМ 200 мощностью 50 МВт [15–17].

Плавающий энергоблок с РУ КЛТ-40С построен и введен в эксплуатацию, остальные два проекта пока не реализованы.

Основные преимущества АСММ: возможность создания необходимой мощности АСММ в зависимости от требования потребителей; небольшой срок строительства; экологически чистый вид энергии; длительный срок эксплуатации (более 35–40 лет).

Трёхмерная модель плавучей АСММ и АСММ с РУ РИТМ 200 приведена на рис. 13.

Схема модульной конструкции АСММ с двумя реакторами «Мастер» с тепловой мощностью 30 МВт каждый приведена на рис. 14.



Рис. 12. Принципиальная схема использования геотермальных вод для производства электроэнергии

Fig. 12. Schematic diagram of the use of geothermal water for electricity generation



Рис. 13. Модель плавучей АСММ

Fig. 13. Model of the floating ASMM

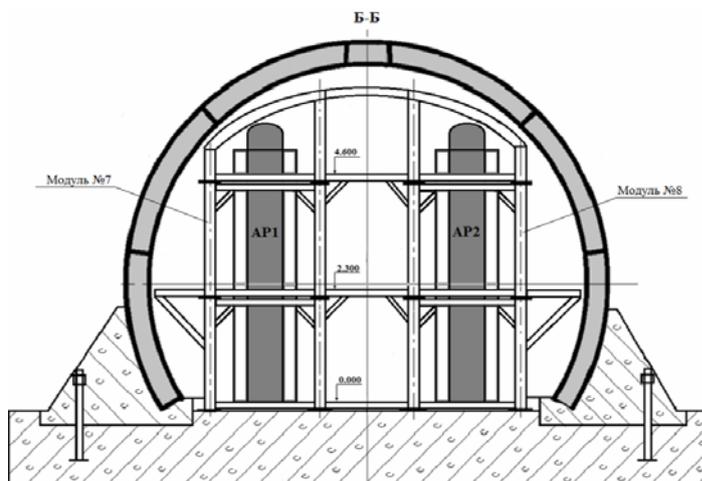


Рис. 14. Схема модульной конструкции АСММ

Fig. 14. Diagram of the modular design of the ASMM

### Заключение

Накопленный опыт математического моделирования тепломассообменных и теплоэнергетических процессов в проточной части двигателей летательных аппаратов позволяет использовать результаты для отдельных элементов турбин, насосов, теплообменных аппаратов в цикле Ренкина для энергогенерирующего оборудования с возможностью проектной оптимизации параметров как элементов, так и системы с последующим расчетом проточной части элементов конструкции.

Перспективным способом использования низкопотенциальных источников энергии является применение преобразователей-утилизаторов на основе паротурбинных установок с применением органических рабочих тел с температурой конденсации ниже 100 °С.

Рассмотренная структура распределенной электрогенерирующей системы малой мощности учитывает лишь отдельные источники и возможности северных и малодоступных территорий и определяется общим требованием к источникам тепла: относительно низкий температурный потенциал, что требует разработки и производства специального оборудования для турбоэлектрогенерации, определяемой удовлетворительной возможностью блочной транспортировки и монтажа, а также минимального технического обслуживания на длительном сроке эксплуатации. Несомненно, низкий потенциал, повышенные требования по безопасности и длительный срок эксплуатации при минимальном техническом обслуживании делают эту область электрогенерации достаточно проигрышной по показателям энергетической эффективности с большой электрогенерацией. Однако только такое исполнение по нашему мнению формирует нишу низкопотенциальной энергетики в труднодоступных субарктических районах. В материалах не рассмотрены другие элементы возобновляемой энергетики, хотя когенеративно возможно их применение.

### Библиографические ссылки

1. Fates of heavy organics of bio-oil in hydrotreatment: The key challenge in the way from biomass to biofuel / L. Zhang, X. Hu, C. Li, V. Esmaeili, M. Gholizadeh // *Science of the Total Environment* . 2021. Vol. 778, 146321.
2. Economic-environmental analysis of combined heat and power-based reconfigurable microgrid integrated with multiple energy storage and demand response program / M. Hemmati, M. A. Mirzaei, M. Abapour et al. // *Sustainable Cities and Society*. Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 69, 102790.
3. Research and applications of drag reduction in thermal equipment: A review (Review) / W. Gong, J. Shen, W. Dai et al. // *View Correspondence (jump link)*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 172. 121152.
4. Romei A., Binotti M. Off-design performance of closed OTEC cycles for power generation (Article) *View Correspondence (jump link)* // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 170. P. 1353–1366.
5. Разработка установок-утилизаторов низкопотенциального тепла на основе органического цикла Ренкина / А. А. Кишкин, Д. В. Черненко, А. А. Ходенков и др. // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 14 (136). С. 57–63.
6. Разработка установок-утилизаторов низкопотенциального тепла на основе органического цикла Ренкина / А. А. Кишкин, Д. В. Черненко, А. А. Ходенков и др. // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 3 (4). С. 35–36.
7. Проектирование паровых микротурбинных установок малой распределенной энергетики / М. А. Ермаков, В. С. Галимов, Ю. Н. Шевченко и др. // *Сб. материалов Междунар. семинара,*

проводимого в рамках подготовки IX Междунар. науч.-практ. конф. «Горные территории : приоритетные направления науки Российской Федерации». 2018. С. 77–79.

8. Прямолинейное равномерное течение газов с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов / М. И. Толстопятов, А. А. Зуев, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 134–139.

9. Белоусов В. И., Эрлих Э. Н. Становление геотермальной энергетики Камчатки : проблемы и решения // Вопросы истории естествознания и техники. 2015. Т. 36, № 2. С. 306–321.

10. Проектная оптимизация теплотехнических систем, работающих по замкнутому контуру / А. А. Кишкин, А. В. Делков, А. А. Ходенков и др. // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 34–38.

11. Теплоотдача вращательных течений в турбомашинах на основе двухслойной модели турбулентного пограничного слоя / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, М. И. Толстопятов и др. // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 127–129.

12. Бутузов В. А., Амерханов Р. А., Григораши О. В. Геотермальное теплоснабжение в мире и в России: состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 45–49.

13. Васильев Ю. С., Амосов Н. Т. Атомные станции малой мощности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. 2014. № 2 (195). С. 26–34.

14. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России / Н. И. Воропай, Б. Г. Санеев, И. Ю. Иванова, А. К. Ижбулдин // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. Т. 2. М. : Академ-Принт, 2015. С. 59–72.

15. Численное исследование газодинамики сопел малоразмерных газогенераторов вытекающих из них струй / И. Э. Иванов, И. А. Крюков, С. А. Шустов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. № 1 (43) / 2014. С. 112–122.

16. Пат. 2697274 Российская Федерация, <sup>МПК</sup> В09В 3/00. Способ переработки твердых коммунальных и промышленных отходов / Чернорот В. А., Лапшин Б. М., Аброськин В. А. № 2018141008 ; заявл. 21.11.2018 ; опубл. 13.08.2019 Бюл. № 23. 7 с.

17. Пат. 181361 Российская Федерация, <sup>МПК</sup> F01D 1/32. Центробежная турбина / Аброськин В. А. № 2017144390 ; заявл. 18.12.2017 ; опубл. 11.07.2018 Бюл. № 20. 7 с.

## References

1. Zhang L., Hu X., Li C., Esmaeili V., Gholizadeh M. Fates of heavy organics of bio-oil in hydrotreatment: The key challenge in the way from biomass to biofuel. *Science of the Total Environment*. 2021, Vol. 778, No. 146321.

2. Hemmati M., Mirzaei M. A., Abapour M., Zare K., Mohammadi-ivatloo B., Mehrjerdi H., Marzband M. Economic-environmental analysis of combined heat and power-based reconfigurable microgrid integrated with multiple energy storage and demand response program. *Sustainable Cities and Society*. 2021, Vol. 69, No. 102790.

3. Gong W., Shen J., Dai W., Li K., Gong M. Research and applications of drag reduction in thermal equipment: A review (Review). View Correspondence (jump link). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021, Vol. 172, No. 121152.

4. Romei A., Binotti M. Off-design performance of closed OTEC cycles for power generation (Article). View Correspondence (jump link). *Renewable Energy*. 2021, Vol. 170, P. 1353–1366.

5. Kishkin A. A., Chernenko D. V., Khodenkov A. A., Delkov A. V., Tanasienko F. V. [Development of low-grade heat recovery units based on the organic Rankin cycle]. *Alternative Energy and ecology*. 2013, No. 14 (136), P. 57–63 (In Russ.).

6. Kishkin A. A., Chernenko D. V., Khodenkov A. A., Delkov A. V., Tanasienko F. V. [Development of low-grade heat recovery units based on the organic Rankin cycle]. *Alternative Energy and ecology*. 2014, No. 3 (4), P. 35–36 (In Russ.).
7. Ermakov M. A., Galimov V. S., Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Melkozerov M. G. [Design of steam microturbine installations of small distributed power engineering]. *Collection of materials of the International seminar held in preparation for IX International Scientific and Practical Conference Mountainous Territories: Priority Areas and Sciences of the Russian Federation*. 2018, P. 77–79.
8. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. [Rectilinear uniform flow of gases with heat transfer in power plants of aircraft]. *Vestnik SibSAU*. 2012, No. 4 (44), P. 134–139 (In Russ.).
9. Belousov V. I., Erlikh E. N. [Formation of geothermal energy in Kamchatka: problems and solutions]. *Problems of the history of natural science and technology*. 2015, Vol. 36, No. 2, P. 306–321. (In Russ.)
10. Kishkin A. A., Delkov A. V., Khodenkov A. A., Zuev A. A., Zhuikov D. A. [Design optimization of heat engineering systems operating in a closed loop]. *Vestnik SibSAU*. 2012, No. 5(45), P. 34–38 (In Russ.).
11. Zuev A. A., Kishkin A. A., Tolstopyatov M. I., Zhuikov D. A. [Heat transfer of rotational flows in turbomachines on the basis of a two-layer model of a turbulent boundary layer]. *Vestnik SibSAU*. 2012, No. 5 (45), P. 127–129 (In Russ.).
12. Butuzov V. A., Amerkhanov R. A., Grigorash O. V. Geothermal heat supply in the world and in Russia: state and prospects. *Teploenergetika*. 2018, No. 5, P. 45–49 (In Russ.).
13. Vasiliev Yu. S., Amosov N. T. [Nuclear plants of low power]. *Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University*. 2014, No. 2 (195), P. 26–34 (In Russ.).
14. Voropai N. I., Saneev B. G., Ivanova I. Yu., Izhbuldin A. K. Comparative efficiency of the use of low-power nuclear power plants in local power systems in the east of Russia. *Nuclear power plants of low power: a new direction of energy development*. Vol. 2. Moscow, Akadem-Print Publ., 2015, P. 59–72.
15. Ivanov I. E., Kryukov I. A., Shustov S. A. [Numerical study of gas dynamics of small-size gas generators and the jets flowing from them]. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*. 2014, No. 1 (43), P. 112–122 (In Russ.).
16. Chernorot V. A., Lapshin B. M., Abroskin V. A. *Method of processing solid municipal and industrial waste*. Patent RF, no. 2697274, mpk B09B 3/00 No. 2018141008. 2019.
17. Abroskin V. A. *Centrifugal turbine*. Patent RF, IPC F01D 1/32. No. 2017144390. 2018.

© Аброськин В. А., Чернорот В. А., Кишкин А. А., Делков А. В., Журавлев В. Ю., 2021

---

**Аброськин Василий Алексеевич** – директор; ООО «Союз-Энерго». E-mail: megahol64@mail.ru.

**Чернорот Владимир Алексеевич** – заместитель директора; ООО «Союз-Энерго». E-mail: megahol64@mail.ru.

**Кишкин Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: spsp99@mail.ru.

**Делков Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. E-mail: delkov-mx01@mail.ru.

**Журавлев Виктор Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева.

**Abroskin Vasily Alekseevich** – Director; Soyuz Energo LLC. E-mail: megahol64@mail.ru.

**Chernorot Vladimir Alekseevich** – Deputy Director; Soyuz Energo LLC. E-mail: megahol64@mail.ru

**Kishkin Aleksandr Anatolevich** – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies. E-mail: spsp99@mail.ru.

**Delkov Aleksandr Viktorovich** – Ph. D., associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies. E-mail: delkov-mx01@mail.ru.

**Zhuravlev Viktor Yurievich** – Ph. D. assistant Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies.

---