

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,  
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ПРОСТОГО  
И КАСКАДНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА  
ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2023 г. О. J. Eyenubo<sup>a</sup>, S. O. Otuagoma<sup>a</sup>, D. O. Ofotoku<sup>b</sup>, N. U. Enyinnaya<sup>c</sup>, K. Owebor<sup>d</sup>, \*

<sup>a</sup>The Department of Electrical/Electronics Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria

<sup>b</sup>The Department of Mechanical Engineering, Afe Babalola University, PMB 5454, Ado-ekiti, Ekiti, Nigeria

<sup>c</sup>The Department of Mechanical Engineering, University of Port Harcourt, PMB 5323, Choba, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria

<sup>d</sup>The Department of Mechanical Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria

\*e-mail: kesiena\_owebor@uniport.edu.ng

Поступила в редакцию 10.06.2022 г.

После доработки 03.09.2022 г.

Принята к публикации 12.09.2022 г.

В работе предложены, смоделированы, проанализированы и сопоставлены с технической и экономической точек зрения две системы для распределенной энергетики: простая и каскадная, работающие по органическому циклу Ренкина (Organic Rankine Cycle – ORC). В качестве топлива предлагается использовать рисовую шелуху с типовой мельницы в Нигерии, в то время как рабочими жидкостями для исследуемых ORC-установок являются хладагенты толуол и R245fa. Моделирование энергетических установок проводилось с помощью фундаментальных технических и экономических подходов. Ключевыми техническими параметрами при исследовании служили выработка электроэнергии, энергетическая и эксергетическая эффективность, искомым экономическим параметром являлась удельная стоимость энергии. Установлено, что при использовании рисовой шелухи в качестве возобновляемого источника энергии ORC-электростанция может обеспечить 27–38 МВт · ч суточной потребности в электроэнергии самой рисовой фабрики и находящихся поблизости объектов. Представлены результаты анализа энергетической и эксергетической эффективности простой и каскадной ORC-электростанции, свидетельствующие о перспективности последней. Проанализированы рабочие/тепловые мощности элементов установок и потери эксергии в них. Определены направления повышения эффективности работы электростанции на рисовой шелухе, это прежде всего совершенствование высокотемпературных теплообменных аппаратов. Представлены результаты экономического анализа жизнеспособности проектов на основе простого и каскадного циклов Ренкина. У простой ORC-установки экономические показатели лучше: удельная стоимость энергии составляет 0.115 дол/(кВт · ч), тогда как у каскадной – 0.124 дол/(кВт · ч). Однако при комплексном исследовании технических, экономических, социальных и экологических показателей обоих циклов установлено, что необходимо разрабатывать каскадные ORC-установки. В работе приводятся также результаты анализа зависимости производительности установок от объемов образования рисовой шелухи в течение года, температуры уходящих газов на устье дымовой трубы и таможенных тарифов. Представлено технико-экономическое обоснование перспективности предлагаемого технического решения для слабо электрифицированных стран.

**Ключевые слова:** рисовая шелуха, биомасса, органический цикл Ренкина, распределенная энергетика, каскадная электростанция, толуол, R245fa, эксергия

**DOI:** 10.56304/S0040363623120044

Для слабо электрифицированных стран характерно несоответствие между спросом на электроэнергию и ее предложением. Например, при общей установленной мощности электростанций 13 ГВт Нигерия не в состоянии удовлетворить даже четверть своих потребностей в электроэнергии, поскольку из национальной энергосистемы доступно только около 4 ГВт для обеспечения более

200 млн потребителей [1]. Столь ограниченный доступ к электроэнергии (уровень электрификации в Нигерии составляет 55.4% [2]) усугубляется истощением запасов ископаемого топлива и изменением климата [3]. Для удовлетворения растущих потребностей в энергии слабо электрифицированных стран необходимы поиск и безотлагательное принятие альтернативных технологи-

ческих решений. Одним из таких решений может быть организация производства электроэнергии в непосредственной близости от места ее потребления с использованием установок, работающих на возобновляемых источниках энергии, которые, в отличие от ископаемых, не представляют угрозы для окружающей среды [4].

Рисовая шелуха – это возобновляемый источник энергии, который может использоваться на объектах распределенной генерации в Нигерии. Этот ресурс имеется в стране в изобилии, поскольку Нигерия – аграрная страна и одной из основных отраслей ее экономики является сельское хозяйство. Федеральное правительство Нигерии прилагает усилия к увеличению производства сельскохозяйственной продукции, и выращивание риса становится главной целью, поскольку это один из основных продуктов питания в стране, при том что существует огромный разрыв между спросом на него и предложением [5]. Без устойчивого энергоснабжения развивающееся сельское хозяйство еще более обострит существующую ситуацию с электрификацией. Кроме того, без надлежащего регулирования увеличение объемов производства риса может оказать негативное воздействие на окружающую среду и экосистему в целом, а именно привести к загрязнению водоемов, отчуждению и деградации земель. Такие последствия могут быть связаны с неправильным обращением с рисовыми отходами. В местах, предназначенных для обработки риса, образуются кучи рисовой шелухи, которые необходимо немедленно эвакуировать или утилизировать, чтобы освободить пространство для мукомолов. Иногда в сухой сезон эти кучи сжигают на открытом воздухе. Следствием этого является увеличение выбросов парниковых газов и других вредных веществ вместо получения полезного продукта – энергии сгорания. Утилизация этой энергии на фабриках в Нигерии позволит частично или полностью удовлетворить энергетические потребности предприятий по переработке риса и, по возможности, увеличить доходы от экспорта избыточной энергии, как это происходит в других странах [6–9].

Рисовая шелуха может быть использована в различных технологиях преобразования и производства энергии, включая газификацию, сжигание, пиролиз с целью получения водорода и жидкого топлива. В работе [8] описана технология сжигания в паротурбинной когенерационной энергетической установке рисовой шелухи, образующейся при обработке риса на одной из мельниц в Южной Индии. Такое решение позволяет не только увеличить производственные мощности мельницы, но и получить дополнительный доход от экспорта излишков произведенной электроэнергии.

В работе [9] представлены результаты исследования газификации рисовой шелухи и гранул из

нее. Производительность установки 1.5 т/сут. Топливо из газификатора использовалось далее для выработки электроэнергии в газопоршневом двигателе. Такое топливо имеет теплоту сгорания 4542–5506 МДж/м<sup>3</sup> (при нормальных условиях), что позволяет обеспечить выдаваемую электрическую мощность 8–10 кВт.

Авторы работы [7] показали, что использование рисовой шелухи в качестве топлива может помочь удовлетворить потребности Пакистана в электроэнергии. При этом стоимость электроэнергии, вырабатываемой при сжигании рисовой шелухи, составляет 0.47 дол/(кВт · ч), что меньше, чем удельная стоимость электроэнергии при сжигании угля [0.55 дол/(кВт · ч)]. Кроме того, в [7] отмечено, что утилизация 70% рисовой шелухи позволит обеспечить ежегодную выработку 1328 ГВт · ч электрической энергии с дополнительным преимуществом в виде сокращения выбросов метана на 36 тыс. т (экв. CO<sub>2</sub>). Также было высказано предположение, что благодаря использованию рисовой шелухи в энергетике может быть создано 4.5 тыс. новых рабочих мест.

Широкие возможности для выработки электроэнергии с использованием рисовой шелухи открывают низкопотенциальные системы преобразования энергии. Эти системы универсальны, в них применяются низкотемпературные источники (солнечная и геотермальная энергия, отходящее тепло технологических процессов). Примером такой системы может служить электростанция с бинарным циклом с геотермальным теплоносителем. Такая электростанция считается экологически чистой, поскольку при выработке электроэнергии не образуются парниковые газы и уровень теплового загрязнения окружающей среды минимален [10]. В бинарных энергетических циклах возможно использовать более 300 рабочих жидкостей, однако только 15 из них были предложены для практического применения благодаря их низкой температуре кипения [10]. Но до сих пор ни одна рабочая жидкость не признана оптимальной для использования в бинарных циклах, в том числе по таким показателям, как эффективность, безопасность и экологичность [11].

В работе [12] указан ряд преимуществ теплосилового цикла на органической рабочей жидкости (ORC) по сравнению с традиционным циклом паротурбинной установки. Среди этих преимуществ можно выделить: отсутствие рисков заморозки рабочего тела, меньшие размеры оборудования, более эффективный термодинамический цикл для конденсаторов, охлаждаемых воздухом, высокую эксплуатационную надежность турбин (исключается эрозия лопаток, более эффективная работа в режиме частичной нагрузки и при переходных процессах и пр.).

В настоящее время использование ORC в низкопотенциальных энергетических системах становится весьма популярным в связи с растущей обеспокоенностью мирового сообщества, вызванной истощением запасов ископаемых видов топлива и глобальной деградацией окружающей среды [13]. При этом следует отметить, что простой ORC имеет более низкий КПД по сравнению с паровым циклом Ренкина или газотурбинным циклом [14]. Однако организация многоступенчатого (каскадного) ORC позволяет более полно использовать тепловую энергию источника и повысить эффективность процесса. Исследования [15, 16] показали, что при двухступенчатом ORC с геотермальным теплоносителем температурой 180°C передача тепла в цикл увеличивается на 15% по сравнению с одноступенчатой схемой, а при трехступенчатом ORC с геотермальным теплоносителем температурой 120°C передача тепла к рабочей жидкости R-600 повышается на 36.5%.

В данной работе представлены результаты анализа как простой, так и каскадной ORC-энергоустановок, в которых для выработки электроэнергии, направляемой на собственные нужды типовой мельницы, используется рисовая лузга. Традиционно же такие мельницы оснащаются резервными дизельными генераторами. Такие генераторы сильно загрязняют окружающую среду, их обслуживание характеризуется высокими эксплуатационными расходами. Вследствие этого товары, произведенные в Нигерии, не могут конкурировать на мировом рынке. Авторы полагают, что эта работа поможет подтвердить правильность курса на использование низкопотенциальной энергии для распределенной выработки электроэнергии не только в сельскохозяйственных поселениях Нигерии, но и в странах с сопоставимыми экономическими условиями и доступностью электроэнергии.

## МЕТОДОЛОГИЯ

Подход к проведению исследования в данной работе довольно прост. Сначала приводятся схемы тепловых энергоустановок, сжигающих рисовую шелуху и работающих по простому (одноконтурному) и каскадному (двухконтурному) органическому циклу Ренкина, с описанием происходящих в них процессов, затем – термодинамические (технические) и экономические модели предлагаемых электростанций. Среди технических параметров электростанций интерес представляют выработка электроэнергии, а также энергетическая и эксергетическая эффективность, тогда как важным экономическим параметром является удельная стоимость энергии. Поскольку вырабатываемой электроэнергией обеспечиваются потребности мельницы и находящейся рядом общины, то ее удельная стоимость служит экономическим критерием для

сравнения ORC-установки с уже используемыми здесь другими источниками электроэнергии. За этим следуют обсуждение полученных результатов и выводы из проведенного исследования. Вычисления по моделям производятся в программе решения инженерных уравнений (Engineering Equation Solver) и затем обрабатываются с помощью электронной таблицы MS Excel.

В качестве рабочей жидкости как в простом ORC, так и в высокотемпературном цикле каскадной ORC-установки предлагается использовать толуол. Выбор толуола обусловлен его применимостью для рекуперации тепла от средне- и низкопотенциального источника. Более того, он считается биоразлагаемым веществом и может легко распадаться на простые составляющие в процессе фотоокисления. Авторы [17] показали, что толуол является одной из наиболее подходящих жидкостей для эксплуатации в ORC.

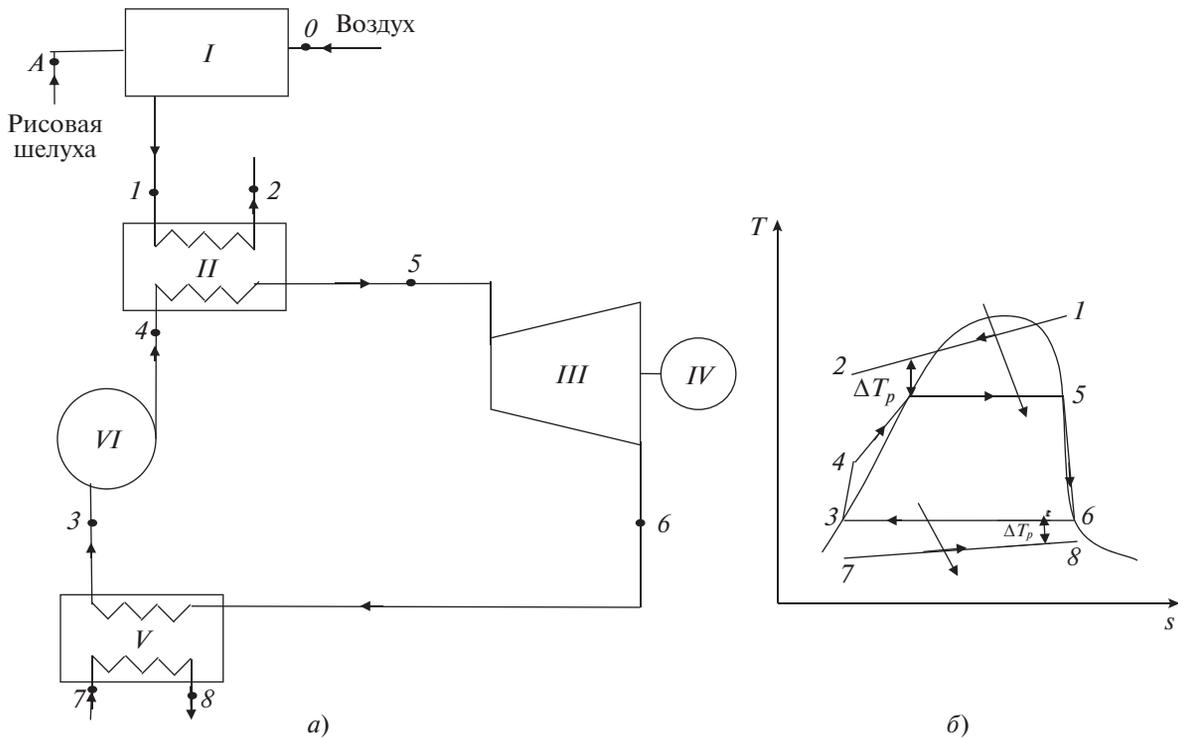
Был проведен тщательный отбор рабочей жидкости для низкотемпературного цикла каскадной ORC. Был выбран пентафторпропан R245fa, поскольку он не способствует разрушению озонового слоя и глобальному потеплению. Кроме того, R245fa негорюч, термостабилен и имеет малый срок существования в атмосфере [18].

## ОПИСАНИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

На рис. 1 представлена принципиальная тепловая схема энергоустановки для сжигания рисовой шелухи, в которой реализуется простой ORC.

На рисунке показано, что рабочая жидкость (толуол) перекачивается из состояния 3 в состояние 4 насосом для органической жидкости до достижения определенного давления в парогенераторе (при температуре испарения толуола). Жидкость высокого давления в состоянии 4 испаряется до состояния 5 в парогенераторе с рекуперацией тепла от дымовых газов, образующихся при сгорании рисовой шелухи и охлаждающихся от состояния 1 до состояния 2. Пар с высокой энтальпией, выходящий из парогенератора в состоянии 5, расширяется в турбине до давления в конденсаторе в состоянии 6. Пар, выходящий из турбины, конденсируется в конденсаторе пара до насыщенной жидкости в состоянии 3, нагревая циркуляционную воду от состояния 7 до состояния 8. Далее процессы повторяются.

Принципиальная тепловая схема и реализуемый в ней каскадный ORC при сжигании рисовой шелухи представлены на рис. 2. Цикл установки состоит из высоко- и низкотемпературного контуров. Рабочим веществом высокотемпературного контура является толуол. В жидком состоянии он перекачивается из точки 3 в точку 4 насосом, а затем испаряется до состояния 5, забирая тепло от дымовых газов, охлаждающихся в парогенераторе



**Рис. 1.** Технологическая схема энергоустановки для сжигания рисовой шелухи (а) и реализуемый в ней простой ORC в  $T,s$ -диаграмме (б):  
 I – камера сгорания; II – парогенератор с рекуперацией тепла; III – расширитель (турбина); IV – электрогенератор; V – конденсатор; VI – насос;  $\Delta T_p$  – минимальный температурный напор в парогенераторе и конденсаторе

от состояния 1 до состояния 2. Далее он расширяется до состояния 6 в высокотемпературной турбине, а затем конденсируется до состояния 3 в теплообменнике конденсатор – испаритель. В процессе конденсации толуола тепло отводится рабочему веществу низкотемпературного контура (R245fa), которое, в свою очередь, переходит из состояния 7 в состояние 8. Затем выпаренная жидкость расширяется в низкотемпературной турбине до состояния 9 при самом низком давлении в установке. На выходе из турбины жидкость конденсируется до состояния 10, прежде чем ее перекачивают обратно в точку 7, и цикл завершается. Конденсация R245fa происходит вследствие нагрева циркуляционной воды в конденсаторе от состояния 11 до состояния 12.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

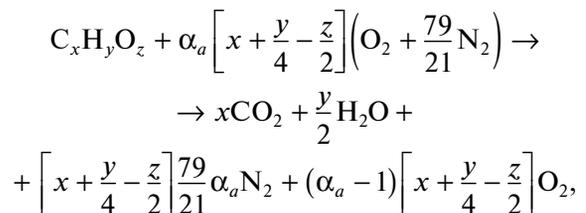
Для упрощения анализа энергоустановок, в которых реализуется как простой, так и каскадный ORC, при разработке их моделей были сделаны следующие основные допущения:

режим работы установок стационарный;

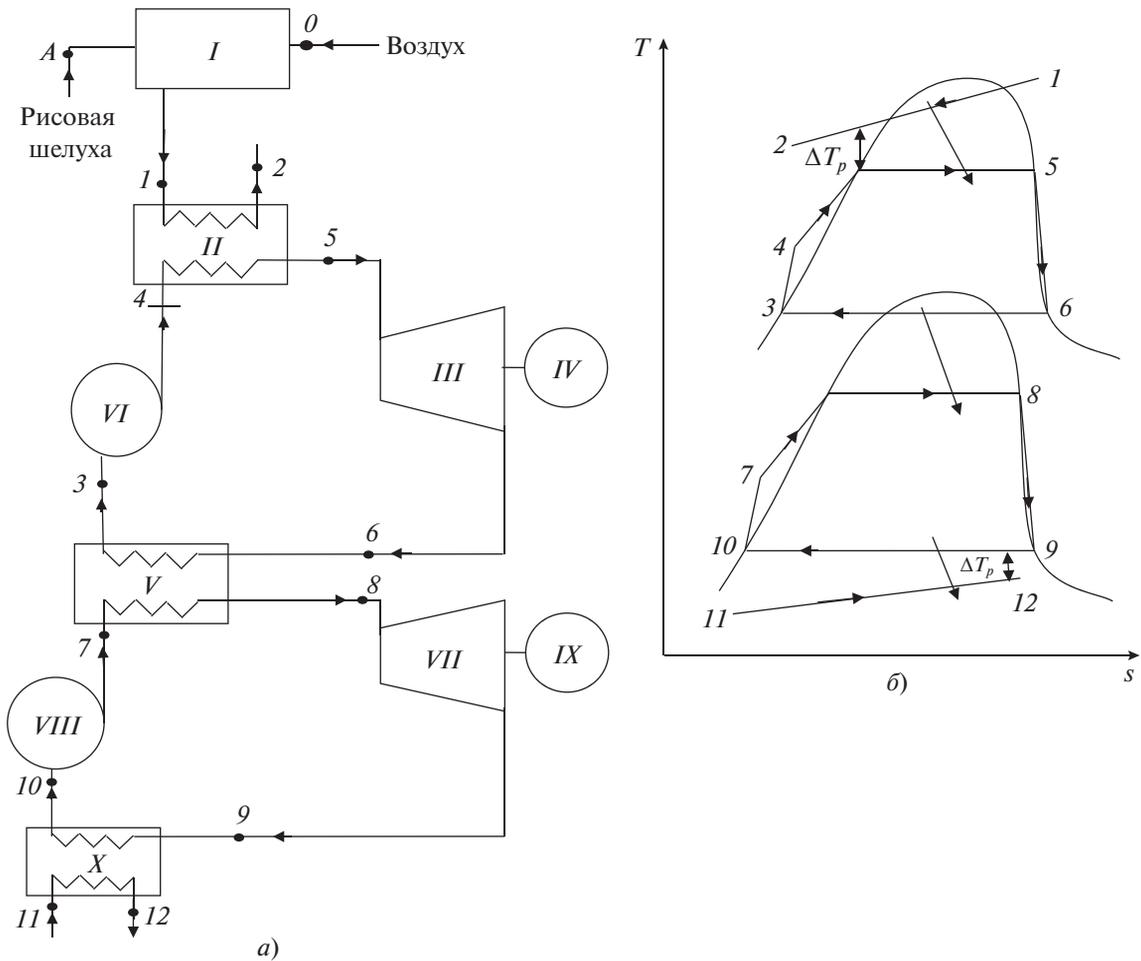
для полного сгорания рисовой шелухи достаточно наличия избытка воздуха 20%;

кинетическая и потенциальная энергии и эксергии потоков пренебрежимо малы.

Термодинамический анализ подчиняется законам сохранения массы и энергии и потерь эксергии. Модели разработаны в соответствии с [5, 19]. Содержание в рисовой шелухе углерода, водорода и кислорода приводится в молярных долях [20]. Принимая во внимание, что образование CO и NO<sub>x</sub> в дымовых газах незначительно, схему реакции процесса горения можно представить в виде [21]:



где  $C_xH_yO_z$  – химическая формула рисовой шелухи;  $x, y$  и  $z$  – числа атомов углерода, водорода и кислорода соответственно, полученные с помощью метода, предложенного в [22], и окончательного анализа, приведенного в [23];  $\alpha_a$  – избыток воздуха.



**Рис. 2.** Технологическая схема энергоустановки для сжигания рисовой шелухи (а) и реализуемый в ней каскадный ORC в  $T,s$ -диаграмме (б):

$I$  – камера сгорания;  $II$  – парогенератор с рекуперацией тепла;  $III, IV$  и  $VI$  – расширитель (турбина), электрогенератор и насос высокотемпературного контура;  $V$  – конденсатор-испаритель;  $VII, VIII$  и  $IX$  – расширитель (турбина), насос и электрогенератор низкотемпературного контура;  $X$  – конденсатор;  $\Delta T_p$  – минимальный температурный напор в парогенераторе и конденсаторе

Температура продуктов сгорания задается в виде

$$T_{ad} = (1 - \varphi) \left[ T_R + \frac{r'_{f/a} \text{LHV}}{(1 + r'_{f/a}) \bar{c}_{p,g}} \right],$$

где  $T_R$  – температура реагента, К;  $r'_{f/a}$  – коэффициент эквивалентности фактического и стехиометрического соотношения топлива и воздуха; LHV (lower heating value) – низшая теплота сгорания рисовой шелухи, кДж/кг;  $\bar{c}_{p,g}$  – средняя удельная теплоемкость дымовых газов, кДж/(кг · К);  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий диссоциацию продуктов при повышенной температуре ( $\varphi \approx 0.15$ ).

Массовый расход дымовых газов задается как

$$\dot{m}_g = \dot{m}_f \left[ (1 - \beta) + \frac{1}{r'_{f/a}} \right],$$

где  $\beta$  – доля золы в рисовой шелухе;  $\dot{m}_f$  – массовый расход рисовой шелухи, кг/с.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Энергетический анализ позволяет оценить работу и тепловые взаимодействия в каждой части силовой установки и, следовательно, определить чистую выработку электроэнергии. В то время как в насосе для органической жидкости и в турбине, рабочим телом в которой является органи-

ческий пар, осуществляются рабочие взаимодействия (совершение работы), парогенератор и конденсатор – это устройства теплового взаимодействия. При рабочих взаимодействиях насосом ORC-установки потребляется мощность

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{m}_r (h_e - h_i)}{\eta_p},$$

турбиной вырабатывается мощность

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_r (h_e - h_i) \eta_{exp},$$

тогда как тепловое взаимодействие характеризуется нагрузками парогенератора с рекуперацией тепла и конденсатора:

$$\dot{Q}_{HRVG} = \dot{m}_r (h_e - h_i); \quad \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r (h_i - h_e),$$

где  $\dot{m}_r$  – расход хладагента, кг/с;  $h_i, h_e$  – удельная энтальпия хладагента на входе и выходе части силовой установки соответственно, кДж/кг;  $\eta_p$  и  $\eta_{exp}$  – изоэнтروпийный КПД насоса и турбины соответственно, %.

### ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Эксергетический анализ проводится для того, чтобы определить направления повышения эффективности работы электростанции на рисовой шелухе, оценив степень необратимости процессов в ее элементах. На основании второго закона термодинамики для процесса с контрольным объемом можно записать уравнение баланса эксергии:

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_i \dot{m} ex_i - \sum_j \dot{m} ex_j - \dot{E}x_d = 0,$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, К;  $\dot{Q}_k$  – скорость передачи тепла на  $k$ -й границе контрольного объема при температуре  $T_k$ , кВт;  $\dot{W}$  – мощность, кВт;  $\dot{m}$  – массовый расход рабочего тела, кг/с;  $ex_i, ex_j$  – удельная эксергия потока на входе и выходе, кДж/кг;  $\dot{E}x_d$  – потери эксергии в пределах контрольного объема, кВт.

В общем случае полная эксергия потока в контрольном объеме задается как

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{kin} + \dot{E}x_p + \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch},$$

где  $\dot{E}x_{kin}, \dot{E}x_p, \dot{E}x_{ph}, \dot{E}x_{ch}$  – кинетическая, потенциальная, физическая и химическая эксергия, кВт, соответственно. Но кинетическая и потенциальная эксергии приняты пренебрежимо малыми. Тогда

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}_l [(h_l - h_0) - T_0 (s_l - s_0)], \quad \dot{E}x_{ch,f} = \dot{m}_f ex_{ch,f},$$

где  $\dot{m}_l$  – массовый расход рабочей жидкости, кг/с;  $h_l, s_l$  – удельные энтальпия, кДж/кг, и энтропия, кДж/(кг · К), в состоянии  $l$ ;  $\dot{m}_f, ex_{ch,f}$  – массовый расход, кг/с, и удельная химическая эксергия топлива (рисовой шелухи), кДж/кг, соответственно.

Формула для определения удельной химической эксергии биомассы, заимствованная из работы [24], имеет вид

$$ex_{ch,f} = 1812.5 + 295.606 C + 587.354 H + 17.506 O + 17.735 N + 95.615 S - 31.8A,$$

где C, H, O, N, S и A – массовое содержание в топливе углерода, водорода, кислорода, азота, серы и золы соответственно, %.

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Анализ проводится с целью определить параметры установки, необходимые для ее экономической жизнеспособности. К таким параметрам относятся: стоимость жизненного цикла (life cycle cost – LCC), дол. США; годовая стоимость жизненного цикла (annualized life cycle cost – ALCC), дол/год; удельная стоимость энергии (unit cost of energy – UCOE), дол/(кВт · ч), и точка безубыточности (break-even point – BEP), годы [25]:

$$LCC = Z_{EC} + \sum Z_{eq},$$

где  $Z_{EC}$  – затраты на проектирование и неподвижные расходы, дол.;  $Z_{eq}$  – стоимость оборудования, дол.;  $eq = comb, eva, exp, cond, p$  для камеры сгорания, испарителя, турбины, конденсатора и насоса ORC-контура соответственно.

Подробные уравнения для определения затрат на компоненты установки приведены в [14]. Тем не менее, общие удельные затраты на сжигание биомассы, дол/(кВт · ч), на ORC-электростанции (включая камеру сгорания) оцениваются по формуле

$$Z_{ORC} = \sum_{y=1}^2 36390 (1 + \omega) (\dot{W}_{exp,y})^{-0.244},$$

где  $y$  – порядковый номер контура установки (1 – высокотемпературный, 2 – низкотемпературный);  $\dot{W}_{exp,y}$  – мощность турбины, кВт;  $\omega$  – коэффициент, учитывающий тариф на импорт, который применяется к конкретному населенному пункту Нигерии.

Годовая стоимость жизненного цикла рассчитывается как

$$ALCC = F(i, n) LCC,$$

**Таблица 1.** Технические характеристики простого и каскадного ORC

Показатель	Органический цикл Ренкина	
	простой	каскадный
Полезная мощность $\dot{W}_{net}$ , МВт	1.154	1.599
КПД, %:		
термодинамический $\eta_t$	15.53	21.51
эксергетический $\eta_{ex}$	20.38	28.23

где  $F(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$  – коэффициент возмеще-

ния капитала;  $i$  – процентная ставка, %;  $n$  – количество лет.

Удельная стоимость энергии определяется по выражению

$$UCOE = \frac{ALCC}{365 \times 24 \dot{W}_{net}},$$

а точка безубыточности

$$BER = \frac{LCC}{\tau_{op} \dot{W}_{net} UCOE_{MC}},$$

где  $\tau_{op}$  – число часов работы установки;  $\dot{W}_{net}$  – полезная мощность электростанции, кВт;  $UCOE_{MC}$  – удельная стоимость электроэнергии в муниципальной сети, дол/(кВт · ч).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ предложенных моделей был выполнен при использовании следующих исходных данных:

Температура рабочего вещества, К:	
в испарителе высокотемпературного контура $T_5$ .....	580
промежуточная $T_3$ .....	363
в конденсаторе низкотемпературного контура $T_{10}$ .....	308
Массовый расход топлива (рисовой шелухи) $\dot{m}_f$ , кг/с.....	0.57
Избыток воздуха $\alpha_a$ , %.....	20
КПД турбины $\eta_{exp}$ , %.....	90
КПД насоса $\eta_p$ , %.....	90
Коэффициент, учитывающий тариф на импорт $\omega$ .....	0.05
Коэффициент диссоциации дымовых газов $\phi$ .....	0.15
Доля золы в топливе $\beta$ .....	0.14
Годовое число часов работы установки $\tau_{op}$ , ч.....	7500
Процентная ставка $i$ .....	0.12

Жизненный цикл установки  $n_{yrs}$ , лет.....20

Температура окружающей среды  $T_0$ , К.....298

Атмосферное давление  $p_0$ , кПа.....101.325

Рабочее тело контура:

высокотемпературного.....Толуол

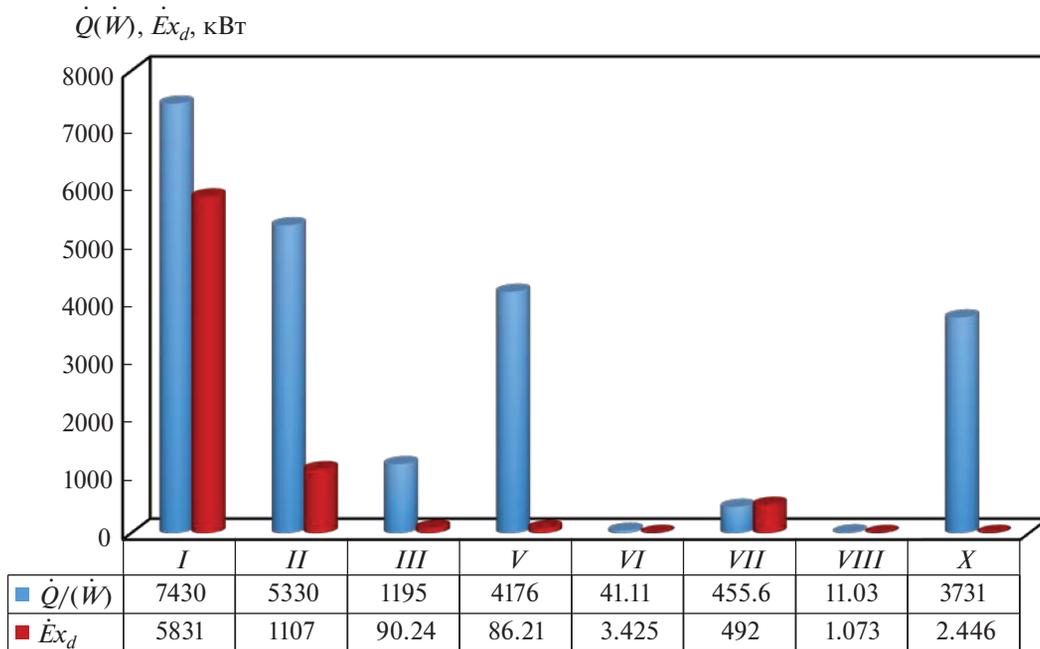
низкотемпературного..... R245fa

Кроме того, установлено, что для работы каскадной ORC-установки необходимо, чтобы соотношение расхода толуола в высокотемпературном контуре и R245fa в низкотемпературном составляло примерно 0.25.

В табл. 1 приведены термодинамические характеристики энергоустановки, работающей по простому и каскадному ORC. Эффективность простого ORC аналогична той, что получена в [26]. Результаты расчета показывают, что технические характеристики каскадной ORC-установки лучше, чем простой. Установлено, что при выработке электроэнергии 1.15–1.60 МВт и работе 7500 ч в год такие электростанции способны удовлетворить суточную потребность в электроэнергии рисовой мельницы и находящегося по соседству поселка в размере 27–38 МВт · ч.

На рис. 3 показаны соотношения тепловой/рабочей мощности и потерь эксергии в частях каскадной установки. Как и следовало ожидать, наибольшие потери эксергии наблюдаются в нагревательных элементах установки: камере сгорания (77%) и парогенераторе с рекуперацией тепла (15%), наименьшие потери – в насосе низкотемпературного контура. Полученное распределение потерь эксергии согласуется с литературными данными [14, 26, 27].

В результате экономического анализа (табл. 2) было получено, что стоимость жизненного цикла простого и каскадного ORC составит 5.54 и 8.24 млн дол. США соответственно, а их точка безубыточности – 7.11 и 7.47 года соответственно. В отличие от технических характеристик, согласно которым каскадный ORC представляется предпочтительным, экономические показатели свидетельствуют об обратном. Удельная стоимость электроэнергии простого ORC составляет 0.115 дол/(кВт · ч), что ниже, чем у каскадного ORC, на 0.009 дол/(кВт · ч). При этом, что немаловажно, удельная стоимость электроэнергии,



**Рис. 3.** Соотношение тепловой/рабочей  $\dot{Q}(\dot{W})$  мощностей и потерь эксергии  $\dot{E}x_d$  в элементах установки. Обозначения *I–III, V–VIII, X* см. рис. 2

производимой установками на основе как простого, так и каскадного ORC, ниже, чем средний тариф на электроэнергию в муниципальной сети [0.13 дол/(кВт · ч)], не говоря уже о стоимости эксплуатации бензиновых и дизельных генераторов, составляющей 0.3–0.6 дол/(кВт · ч) [28, 29].

К тому же, если исходить из текущей тенденции и будущего развития энергетического сектора, экономические показатели могут быть не лучшим средством для оценки систем выработки электроэнергии. Наиболее результативным, скорее всего, является комплексное исследование технических, экономических, социальных и экологических показателей [25]. Если верно последнее, то, рассматривая экологические и социальные издержки в перспективе, можно отметить, что общие экономические показатели каскадного ORC, скорее всего, будут лучше, чем простого, за исключением единственного преимущества по-

следнего — технических характеристик, рассмотренных ранее. Однако это может явиться темой будущих исследований.

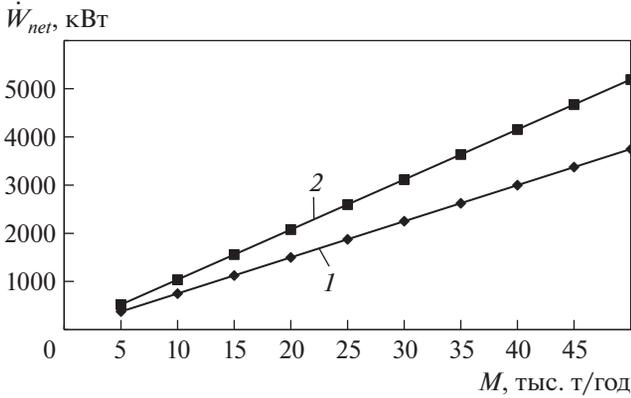
### МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Было проведено исследование влияния на производительность простого и каскадного ORC таких важных факторов, как масса рисовой шелухи, образующейся за год, температура уходящих газов на устье дымовой трубы, соотношение температур окружающей среды и дымовых газов и тарифы на импорт.

На рис. 4 показано влияние массы ежегодно получаемой рисовой шелухи на мощность нетто  $\dot{W}_{net}$  установок, работающих по простому и каскадному ORC. Как и ожидалось, суммарная мощность и тех, и других повышается с увеличением

**Таблица 2.** Экономические характеристики простых и каскадных электроустановок на основе ORC

Показатель	Органический цикл Ренкина	
	простой	каскадный
Стоимость жизненного цикла LCC, млн дол. США	5.54	8.24
Годовая стоимость жизненного цикла ALCC, млн дол/год	0.743	1.104
Удельная стоимость энергии UCOE, дол/(кВт · ч)	0.115	0.124
Точка безубыточности BEP, лет	7.11	7.47



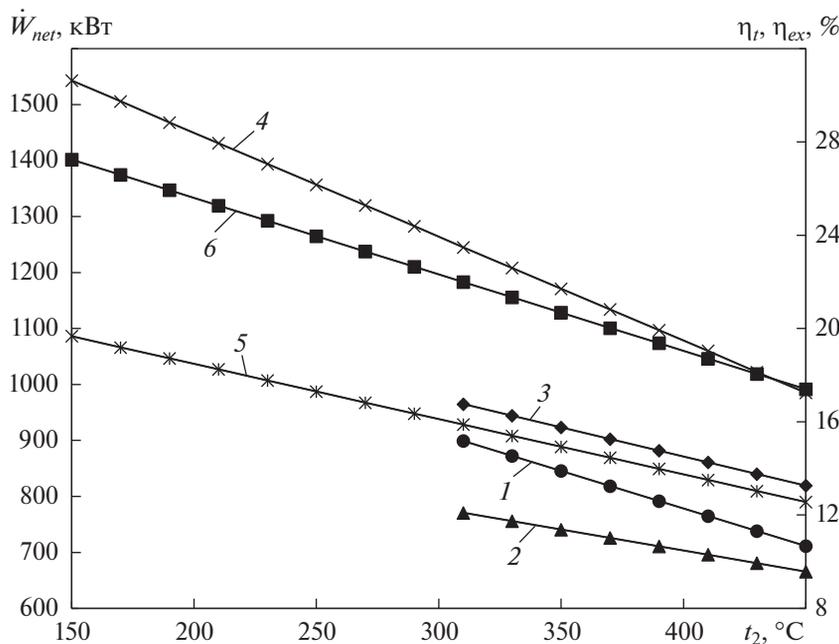
**Рис. 4.** Зависимость полезной мощности  $\dot{W}_{net}$  электростанций, работающих по простому (1) и каскадному (2) ORC, от массы ежегодно производимой рисовой шелухи  $M$

массы рисовой шелухи. Это означает, что при увеличении урожайности риса, являющемся следствием заинтересованности правительства в приросте производства сельскохозяйственной продукции, будет получено больше рисовой шелухи для выработки электроэнергии. При этом следует учитывать, что если не будут предприняты срочные меры по использованию рисовой шелухи для выработки электроэнергии, большое ко-

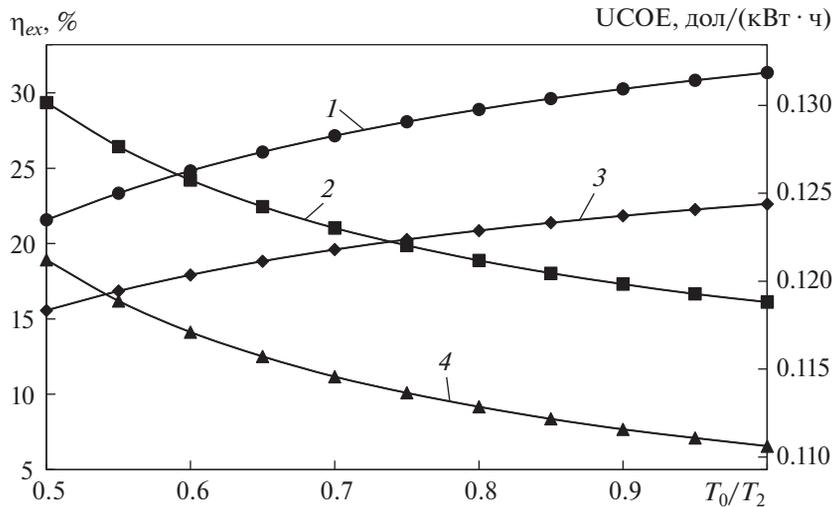
личество накопленной рисовой шелухи может привести к возникновению экологических проблем, таких как пожары, привлечение вредителей, выброс парниковых газов (например, метана) в окружающую среду.

Влияние температуры на устье дымовой трубы (в точке 2 на рис. 1, 2) на полезную мощность  $\dot{W}_{net}$ , энергоэффективность  $\eta_t$  и эксергетический КПД  $\eta_{ex}$  простых и каскадных ORC-установок показано на рис. 5. Нижняя граница диапазона температуры газов на выходе из дымовой трубы для простого ORC установлена на уровне  $310^\circ\text{C}$ , так как температура кипения рабочей жидкости в парогенераторе задана  $307^\circ\text{C}$ . Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что высокая температура дымовых газов отрицательно сказывается на суммарной энергетической и эксергетической эффективности установки. Следовательно, ее работа должна осуществляться таким образом, чтобы была обеспечена минимальная температура дымовых газов. В [30] было высказано предположение, что такой подход может дать дополнительные преимущества в защите окружающей среды от теплового загрязнения.

Рисунок 6 иллюстрирует, как изменяются эксергетический КПД  $\eta_{ex}$  и USOE в зависимости от соотношения температур окружающей среды  $T_0$  и дымовых газов на выходе из дымовой трубы  $T_2$ . Можно отметить, что полезная эксергия возрас-



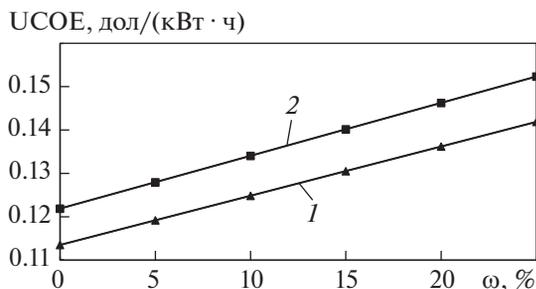
**Рис. 5.** Влияние температуры газов на выходе из дымовой трубы  $t_2$  на энергетические характеристики электростанции: полезную мощность (1), термодинамический (2) и эксергетический (3) КПД простого ORC; полезную мощность (4), термодинамический (5) и эксергетический (6) КПД каскадного ORC



**Рис. 6.** Влияние соотношения температур окружающей среды и дымовых газов  $T_0/T_2$  на эксергетическую эффективность (1, 3) и удельную стоимость энергии (2, 4) для каскадной (1, 2) и простой (3, 4) ORC-установки

тает с увеличением отношения температуры окружающей среды к температуре дымовых газов. Этот эффект можно объяснить лучшим использованием энергии при приближении температуры дымовых газов к температуре окружающей среды. В то же время наблюдается обратный эффект для УСОЕ. Желательно иметь как можно более низкий УСОЕ, однако приближение температуры уходящих газов к температуре окружающей среды нежелательно, так как это способствует образованию углекислоты [31].

На рис. 7 показано влияние тарифов на импорт на удельную стоимость энергии. При высоких таможенных тарифах увеличивается удельная стоимость энергии для обоих вариантов цикла, при этом ожидаются более высокие значения УСОЕ для каскадного ORC. Таким образом, чтобы сделать такую электростанцию привлекательной и конкурентоспособной, очень важно правильно оценить приемлемые таможенные пошлины.



**Рис. 7.** Изменение удельной стоимости энергии УСОЕ в зависимости от тарифа на импорт для простой (1) и каскадной (2) ORC-установки

### ВЫВОДЫ

1. Слабо электрифицированные экономики не в состоянии стабильно обеспечивать электроэнергией некоторые из своих производств. Это оказывает негативное влияние на развитие бизнеса, заставляя предприятия зависеть от дизель-генераторных установок, которые загрязняют окружающую среду и требуют высоких эксплуатационных расходов. Примером таких производств в Нигерии являются рисовые фабрики.

2. При обработке риса образуется большое количество шелухи, неправильное обращение с которой может привести к загрязнению окружающей среды. Однако рисовая шелуха может служить возобновляемым источником для устойчивой выработки электроэнергии как для нужд самого предприятия, так и его ближайшего окружения.

3. На типовой рисовой фабрике в Нигерии ежегодно образуется 15.39 тыс. т сырья (рисовой шелухи). Сжигание этого сырья в энергоустановке, работающей по простому ORC с толуолом в качестве рабочего тела позволит вырабатывать 1154 кВт электроэнергии при энергетической и эксергетической эффективности 15.5 и 20.4% соответственно. Переход на использование каскадного ORC при том же количестве сырья даст возможность вырабатывать 1600 кВт электроэнергии при энергетической и эксергетической эффективности 21.5 и 28.2% соответственно. Количество вырабатываемой электроэнергии может помочь удовлетворить 27 и 38 МВт·ч суточных потребностей в энергии рисовой фабрики и прилегающего к ней района, если используется простой и каскадный ORC соответственно.

4. Несмотря на то что реализация каскадного ORC стоит дороже при общей стоимости электростанции 8.25 млн дол. США против 5.54 млн дол.

для простого ORC, полезная выдаваемая мощность в первом варианте выше. Кроме того, комплексное исследование технических, экономических, социальных и экологических показателей энергоустановок на обоих циклах позволяет сделать вывод о перспективности каскадного ORC для распределенной энергетики.

5. Информация, представленная в данной статье, может способствовать разработке в Нигерии и других слабо электрифицированных странах стратегии реализации и развития объектов распределенной энергетики на возобновляемых источниках энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Power** situation and renewable energy potentials in Nigeria: A case for integrated multi-generation technology / K. Owebor, E. O. Diemuodeke, T. A. Briggs, M. Imran // *Renewable Energy*. 2021. V. 177 (C). P. 773–796. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.017>
2. **World Bank** (2022). Access to electricity (% of population). <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=NG>
3. **Integration** of perennial grass into energy mix as alternative to fuelwood in selected Niger Delta communities, Nigeria / M.U. Ajieh, K. Owebor, L.C. Edomwonyi-Otu, I.F. Okafor // *Biomass Conv. Bioref.* 2021. V. 13. P. 4149–4160. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01570-2>
4. **Potentials** of small hydro power in Nigeria: The current status and investment opportunities / R. Kela, K.M. Usman, A. Usman, A. Tijjani // *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2012. V. 3. No. 5. P. 1–5.
5. **Diemuodeke O. E., Mulugetta Y., Imran M.** Techno-economic and environmental feasibility analysis of rice husks fired energy system for application in a cluster of rice mills // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2021. V. 149. P. 111365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111365>
6. **Potentials** of electricity generation from rice husk – a case study of rice mill / T.A. Memon, K. Harijan, M.I. Soomro, S. Meghwar, G.D. Valasai, H. Khoharo // *Sindh Univ. Res. J.* 2017. V. 49. No. 3. P. 495–498. <https://doi.org/10.26692/surj/2017.09.05>
7. **Electricity** production potential and social benefits from rice husk, a case study in Pakistan / O. Mohiuddin, A. Mohiuddin, M. Obaidullah, H. Ahmed, S.A. Sarkodie // *Cogent Eng.* 2016. V. 15. No. 1. P. 1177156. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1177156>
8. **Mujeebu M.A., Abdullah M.Z., Sas A.** Husk-fueled steam turbine cogeneration for a rice mill with power export – A case study // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, Environ. Effects.* 2011. V. 33. No. 8. P. 724–734. <https://doi.org/10.1080/15567030903226298>
9. **Gasification** and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier / S.J. Yoon, Y. Son, Y. Kim, J. Lee // *Renewable Energy*. 2012. V. 42. P. 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.028>
10. **Tomarov G.V., Shipkov A.A.** Modern geothermal power: Binary cycle geothermal power plants // *Therm. Eng.* 2017. V. 64. No. 4. P. 243–250. <https://doi.org/10.1134/S0040601517040097>
11. **Tomarov G.V., Shipkov A.A., Sorokina E.V.** Choice of optimal working fluid for binary power plants at extremely low temperature brine // *Therm. Eng.* 2016. V. 63. No. 12. P. 887–895. <https://doi.org/10.1134/S0040601516120065>
12. **Improving** geothermal power plants with a binary cycle / G.V. Tomarov, A.A. Shipkov, E.V. Sorokina, M. Ban // *Therm. Eng.* 2015. V. 62. No. 12. P. 878–885. <https://doi.org/10.1134/S0040601515120101>
13. **Low-grade** heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications / B.F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, G. Papadakis // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2011. V. 15. No. 8. P. 3963–3979. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>
14. **Thermo-environmental** and economic analysis of an integrated municipal waste-to-energy solid oxide fuel cell, gas-, steam-, organic fluid- and absorption refrigeration cycle thermal power plants / K. Owebor, C.O.C. Oko, E.O. Diemuodeke, O.J. Ogorure // *Appl. Energy*. 2019. V. 239 (C). P. 1385–1401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.032>
15. **Tomarov G.V., Shipkov A.A.** Multistage geothermal ORC power units: Utilization of high temperature (180°C) geothermal fluid // *Therm. Eng.* 2022. V. 69. No. 4. P. 259–266. <https://doi.org/10.1134/S0040601522030107>
16. **Tomarov G.V., Shipkov A.A.** Multistage organic Rankine cycles: utilization of medium temperature (120°C) geothermal fluid // *Therm. Eng.* 2022. V. 69. No. 5. P. 354–361. <https://doi.org/10.1134/S0040601522050068>
17. **Saha B.K., Chakraborty B., Pundeer P.** Thermodynamic and thermo economic analysis of organic Rankine cycle with multi-objective optimization for working fluid selection with low-temperature waste sources in the Indian industry // *Proc. of the 5th Intern. Seminar on ORC Power Systems*. Athens, Greece, September 9–11, 2019. P. 5–12.
18. **Thermodynamic** performance of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator / R. Kong, T. Deethayat, A. Asanakhan, N. Vorayos, T. Kiatsiriroat // *Case Studies Therm. Eng.* 2019. V. 13. P. 100385.
19. **Dincer I., Rosen M.A.** Exergy – energy, environment and sustainable development. 2nd ed. Elsevier, 2013.
20. **Madhiyanon T., Sathitruangsak P., Soponronnarit S.** Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor // *Fuel*. 2009. V. 88. P. 132–138.
21. **Roman M., Bobasu E., Selisteanu D.** Modelling of biomass combustion process // *Energy Procedia*. 2011. V. 6. P. 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.050>
22. **Chandruppa R., Das D.B.** Waste quantities and characteristics waste // *Solid waste management. Environmental Science and Engineering*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. P. 47–63. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-2868-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-2868-0_2)
23. **Andrew N.E., Gbabo A.** The physical, proximate and ultimate analysis of rice husk briquettes produced from a vibratory block mold briquetting machine // *Int. J. Innovative Sci., Eng. Technol.* 2015. V. 2. No. 5. P. 818–820.
24. **Jack T.A., Oko C.O.C.** Exergy and exergoeconomic analysis of a municipal waste-to-energy steam reheat power plant for Port Harcourt city // *Int. J. Ambient*

- Energy. 2017. V. 39. No. 4. P. 352–359.  
<https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1305447>
25. **Owebor K., Diemuodeke E.O., Briggs T.A.** Thermo-economic and environmental analysis of integrated power plant with carbon capture and storage technology // Energy. 2022. V. 240. P. 122748.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122748>
26. **Energy**, exergy, environmental and economic analysis of an agricultural waste-to-energy integrated multigeneration thermal power plant / O.J. Ogorure, C.O.C. Oko, E.O. Diemuodeke, K. Owebor // Energy Convers. Manage. 2018. V. 171. No. 6. P. 222–240.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.093>
27. **Haseli Y., Dincer I., Naterer G.F.** Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power system with a solid oxide fuel cell through exergy // Thermochimica Acta. 2008. V. 480. No. 1–2. P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.09.007>
28. **NERC (2020).** Licensing, Tariff and Market Rules. Nigerian Electricity Regulatory Commission. Retrieved from [www.nerc.gov.ng](http://www.nerc.gov.ng)
29. **Roche M.Y., Ude N., Donald-Ofoegbu I.** Comparison of costs of electricity generation in Nigeria // The Nigerian Economic Summit Group and Heinrich Böll-Stiftung Nigeria, Abuja. June 2017. P. 20–34.
30. **Multi-criteria** optimisation of integrated power systems for low-environmental impact / K. Owebor, O.E. Diemuodeke, T.A. Briggs, O.J. Eyenubo, O.J. Ogorure, M.O. Ukoba // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, Environ. Effects. 2022. V. 44. No. 2. P. 3459–3476.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2064565>
31. **4E** analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) and ORC (organic Rankine cycle) system / A.H. Mamaghani, B. Najafi, A. Shirazi, F. Rinaldi // Energy. 2015. V. 82. P. 650–663.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.074>

## Techno-Economic Comparison of Simple and Cascade Organic Rankine Cycle for Distributed Energy

O. J. Eyenubo<sup>a</sup>, S. O. Otuagoma<sup>a</sup>, K. Owebor<sup>b</sup>, N. U. Enyinnaya<sup>c</sup>, and D. O. Ofotoku<sup>d</sup>, \*

<sup>a</sup>The Department of Electrical/Electronics Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria

<sup>b</sup>The Department of Mechanical Engineering, Afe Babalola University, PMB 5454, Ado-ekiti, Ekiti, Nigeria

<sup>c</sup>The Department of Mechanical Engineering, University of Port Harcourt, PMB 5323, Choba, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria

<sup>d</sup>The Department of Mechanical Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria

\*e-mail: [kesiena\\_owebor@uniport.edu.ng](mailto:kesiena_owebor@uniport.edu.ng)

**Abstract**—In this paper, two power plant configurations for distributed energy, simple and cascaded Organic Rankine Cycle (ORC), were proposed, modeled, analyzed and compared from a technical and economic point of view. It is proposed to use rice husks from a typical mill in Nigeria as fuel for the operation of the power plant, while the working fluids for the studied ORC plants are toluene and R245fa refrigerants. Power plants are modeled on the basis of fundamental technical and economic approaches. At the same time, power generation, as well as energy and exergy efficiency were selected as key technical parameters for the study. The desired economic parameter determines the cost of a unit of energy. It has been established that with proper use of rice husks as a renewable energy source, the energy generated by the ORC power plant can help to meet 27–38 MWh daily needs of the rice factory and its surroundings. The results of the analysis of the energy and exergy efficiency of a simple and cascade ORC power plant as presented indicates a better prospect for the latter. The working/thermal capacities of the plant elements and the loss of exergy in them are analyzed. The directions of increasing the efficiency of the rice husk power plant have been identified, primarily by improving high-temperature heat exchangers. The results of an economic analysis of the viability of the simple and cascade ORC power plants are presented. A simple ORC demonstrates the best economic performance with a unit energy cost of \$0.115 per kWh compared to \$0.124 per kWh of a cascade ORC. However, a holistic study of technical, economic, social and environmental indicators creates prerequisites for the research and development of a cascade ORC installation. The paper also presents the results of an analysis of the sensitivity of plant performance on the volume of annual production of rice husks, the temperature of the exhaust gases at the outlet of the chimney and the coefficient of the import tariff. A feasibility study of the prospects of the proposed technical solution for poorly electrified countries is presented.

**Keywords:** rice husk, biomass, organic Rankine cycle, distributed energy, cascade power plant, toluene, R245fa, exergy