

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ МАЛООТХОДНОГО И БЕЗОТХОДНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

А. В. Кульбякина¹, А. И. Савельева¹, Н. А. Озеров¹, П. А. Батраков²

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

²Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Внедрение малоотходных и безотходных технологий является перспективным направлением развития для предприятий нефтегазовой отрасли, в частности для нефтеперерабатывающих заводов. Разработка методологических подходов анализа и синтеза сложных энергетических систем с целью повышения эффективности и экологической безопасности исследуемых объектов посредством внедрения малоотходных и безотходных технологий, реализации приближенных к замкнутым технологическим циклов. Решение поставленной задачи выполнено в соответствии с основными принципами системного анализа сложных объектов, поэтапно: анализ структуры объекта с использованием декомпозиционно-агрегативного подхода; определение внутренних и внешних связей между элементами системы; определение закономерностей функционирования объекта и комплекса влияющих факторов. Разработана блочно-иерархическая структура предприятия переработки нефти, устанавливающая количественные и качественные связи между элементами системы на всех уровнях иерархии. Предложена система показателей эффективности, в соответствии с которой дана оценка текущему состоянию исследуемого объекта. Определены наиболее энергоемкие производства предприятия переработки нефти, рассчитаны их эксергетические балансы. Проведенный анализ позволил оценить потенциал повышения экологической и энергетической эффективности, основные направления реализации малоотходных и безотходных технологий. Определены научно обоснованные направления повышения экологической безопасности и энергетической эффективности объекта исследования. Предложены несколько вариантов схем энергообеспечения с комплексной утилизацией производственных отходов, проведена оценка энергетической и технико-экономической эффективности интеграции предложенных решений в энергетический комплекс нефтеперерабатывающих предприятий. Полученные показатели подтверждают целесообразность интеграции предложенной схемы на действующем предприятии.

Ключевые слова: углеводородное сырье, энергетический комплекс, системный анализ, безотходные технологии, энергетические ресурсы.

Введение

Внедрение малоотходных и безотходных технологий является перспективным направлением развития для предприятий нефтегазовой отрасли, в частности для нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Это обусловлено тем, что крупные НПЗ располагаются в густонаселенных промышленных районах РФ и негативно влияют на общее загрязнение атмосферы, гидросферы литосферы [1]. Кроме того, по уровню потребления первичных энергетических ресурсов (ЭР) нефтепереработка занимает ведущее место среди всех отраслей промышленности, потребление прямого топлива в технологических установках достигает 6–8 % (на массу) [2].

В связи с этим актуальной научной задачей является поиск методологических подходов синтеза оптимальных энерготехнологических схем на действующих и проектируемых НПЗ с замкнутыми технологическими и энергетическими потоками, минимизацией газообразных, жидких, твердых отходов [3, 4]. Одной из проблем при разработке

подобной методологии является сложноструктурированная топология объекта исследования: НПЗ включают в себя до десятка производств и более сотен установок и аппаратов, связанных между собой материальными и энергетическими потоками. В общем случае НПЗ топливного профиля, как правило, содержат следующие производства: первичная переработка нефти; каталитический крекинг; легкий гидрокрекинг; каталитический риформинг; производство битумов; термический крекинг; установки очистки углеводородных газов; газодифракционирующая установка; изомеризация; производство водорода; производство серной кислоты.

Необходимо отметить, что каждое из перечисленных производств содержит в себе до десяти крупных подсистем. Так, производство первичной переработки нефти (ЭЛОУ-АВТ) включает в себя: блок подготовки и обессоливания нефти; блок отбензинивания нефти; блок атмосферной перегонки отбензиниванной нефти; блок вакуумной перегонки мазута; блок стабилизации и вторичной перегонки бензина. Каждый из блоков кроме основного тех-

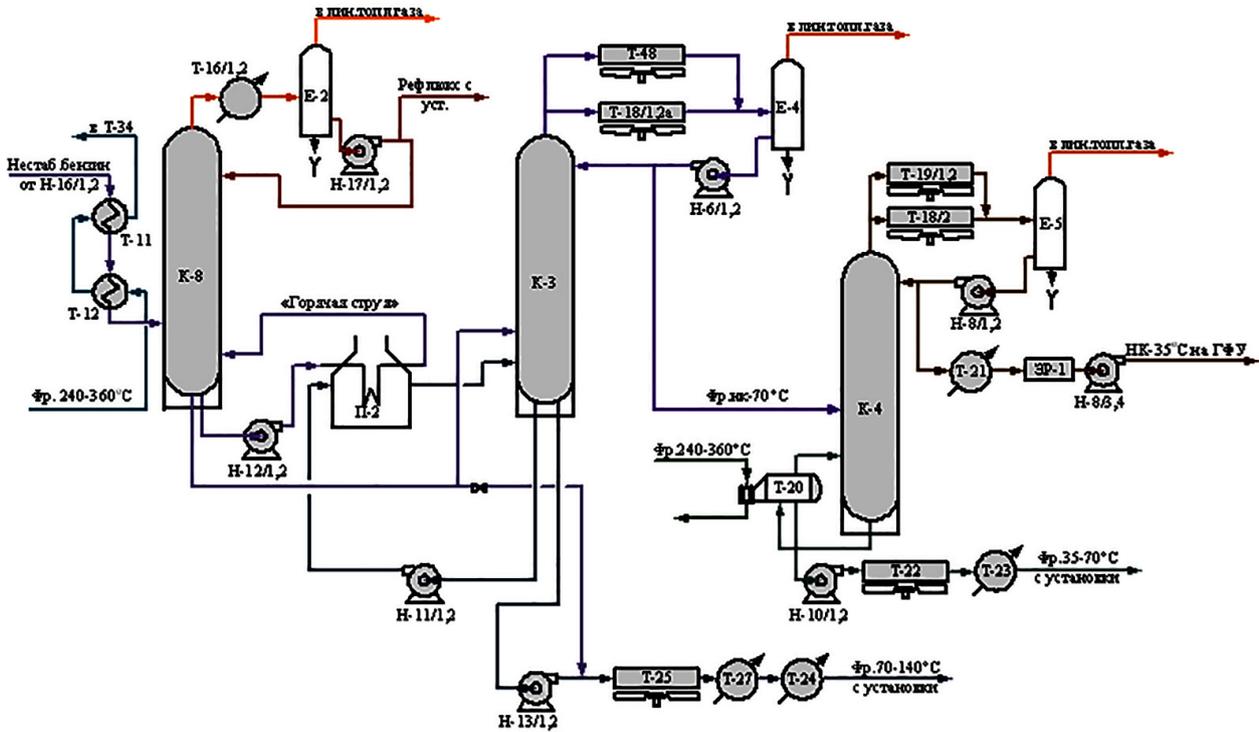


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема блока стабилизации и вторичной перегонки бензина.
 К-3, К-4, К-8 — колонны; Е-2, Е-4, Е-5 — емкости; Т-11, Т-12, Т16 / 1,2 — водяные конденсаторы; П-2 — печь;
 Т-22, Т-25 — воздушные холодильники; Т-21, Т-23, Т-24, Т-27 — водяные холодильники;
 Т-19/1,2, Т-18/2, Т-48, Т-18/1,2а — воздушные конденсаторы; ЭР-1 — электроразделитель;
 Т-20 — подогреватель; Н-6/1,2, Н-8/1,2, Н-8/3,4, Н-10/1,2, Н-11/1,2, Н-12/1,2, Н-13/1,2 — насосы
 Fig. 1. Schematic diagram of the block stabilization and secondary distillation of gasoline
 К-3, К-4, К-8 — columns; Е-2, Е-4, Е-5 — containers; Т-11, Т-12, Т16 / 1,2 — water condensers; П-2 — furnace;
 Т-22, Т-25 — air coolers; Т-21, Т-23, Т-24, Т-27 — water coolers; Т-19/1,2, Т-18/2, Т-48, Т-18/1,2а — air condensers;
 ЭР-1 — electrical separator; Т-20 — heater; Н-6/1,2, Н-8/1,2, Н-8/3,4, Н-10/1,2, Н-11/1,2, Н-12/1,2, Н-13/1,2 — pumps

нологического оборудования (печей, ректификационных колонн, сепараторов) имеет теплообменное, холодильное, насосное и др. оборудование. Для визуализации масштаба и сложности технологической структуры НПЗ на рис. 1 приведена принципиальная технологическая схема системы стабилизации и вторичной перегонки бензина (как выше сказано выше одной из подсистем первичной переработки).

Очевидно, что для анализа эффективности функционирования подобных химико-технологических систем и интеграции малоотходных и безотходных технологий перспективным инструментом является методология системного анализа сложных систем.

Литературный обзор

Вопросами системного анализа технологических процессов производств химического профиля, оптимизации параметров, синтеза рациональных технологических схем и конструктивных характеристик отдельных элементов и химических предприятий в целом посвящен целый ряд известных работ выдающихся ученых: Л. А. Мелентьева, В. М. Бродянского, А. И. Бояринова, В. В. Кафарова, В. П. Мешалкина [5–8]. В них были сформулированы основы системных исследований и термодинамического анализа в энергетике и теплоэнергетике, общие положения выбора критериев оптимальности химико-технологических процессов. Эти основы были развиты и дополнены в последующих многочисленных фундаментальных и прикладных исследованиях, в том числе в посвященных вопросам системного

анализа нефте- и газоперерабатывающих предприятий [9]; разработке математических моделей обеспечения системного анализа сложноструктурированных промышленных комплексов [10], оптимизации теплоэнергетических установок [11], сравнительному термодинамическому анализу различных схем энергообеспечения [12–14], технологии генерации всех видов ЭР на нефтегазовых предприятиях [15].

Однако, несмотря на высокий интерес научного сообщества к вопросам системного анализа сложных систем и организации малоотходных и безотходных технологий, существует ряд особенностей характерных для отечественных НПЗ, обусловленных их структурой, спецификой технологических процессов, которые рассмотрены в меньшей степени и требуют дальнейшего исследования.

Материалы и методы

Решение задачи повышения эффективности и экологической безопасности энергетического комплекса НПЗ, с применением малоотходных и безотходных технологий, с реализацией приближенных к замкнутым технологическим циклам выполнено поэтапно, с учетом всех влияющих факторов и в соответствии с основными принципами системного анализа сложных объектов.

На первом этапе была изучена структура объекта, выполнен анализ его элементов с использованием декомпозиционного подхода, определены внутренние и внешние взаимосвязи, устанавливающие закономерности функционирования объекта.

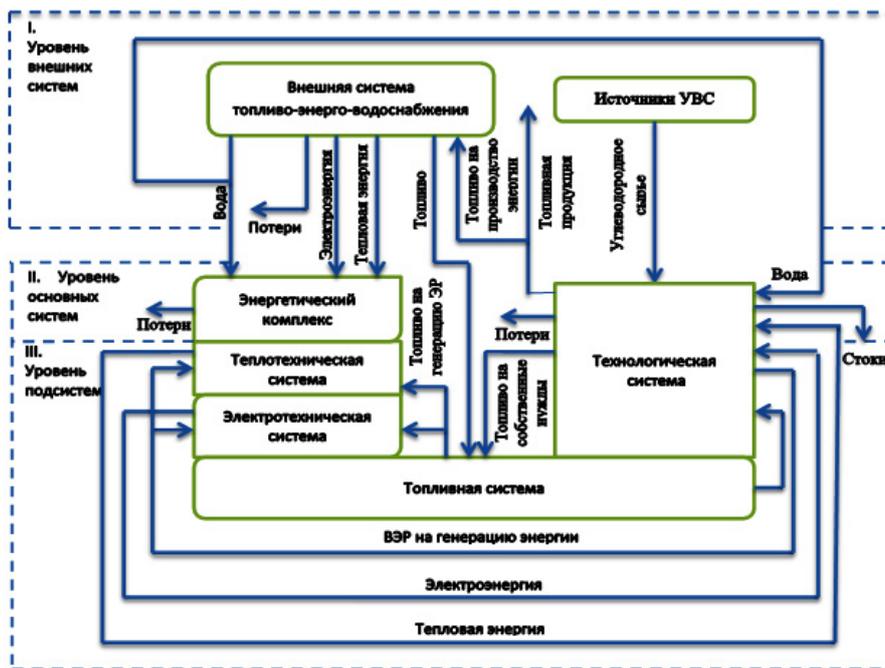


Рис. 2. Блочнo-иерархическая структура предприятия переработки нефти
Fig. 2. Block-hierarchical structure of an oil refining enterprise

На данном этапе была разработана блочно-иерархическая структура исследуемого объекта во взаимосвязи с технологической системой, подсистемами и установками на всех уровнях иерархии (рис. 2).

Приведенная схема позволяет рассмотреть структуру исследуемого объекта на всех уровнях иерархии: от систем (энергетический комплекс и технологическая система) до отдельных аппаратов, установить взаимосвязи между элементами по материальным и энергетическим потокам. Установленная взаимозависимость элементов позволяет сделать вывод о том, что изменение режима работы одного из узлов системы оказывает влияние на работу других. Также установлен ряд внешних и внутренних влияющих факторов, совокупность которых оказывает воздействие на графики энергопотребления, выход товарных и побочных продуктов, образование вторичных энергетических ресурсов и промышленных отходов.

В ходе проведенного анализа определены основные влияющие на рациональное энергопотребление факторы, которые были разделены на две укрупненные группы:

- технологические и режимные факторы (глубина переработки сырья; состав исходного УВС; коэффициент загрузки оборудования по целевым технологическим продуктам; режим загрузки оборудования согласно графикам текущего и капитального ремонта);

- эколого-климатические факторы (регион расположения объекта, температура и влажность окружающей среды);

В качестве примера на приведенных графиках (рис. 3) отражено воздействие климатического фактора и производительности по исходному сырью на абсолютное потребление первичных ЭР: электрической энергии, тепловой энергии, топлива.

Характерное снижение потребления всех видов ЭР в период с августа по октябрь коррелируется со снижением производительности в этот период, обусловленным проведением планового капита-

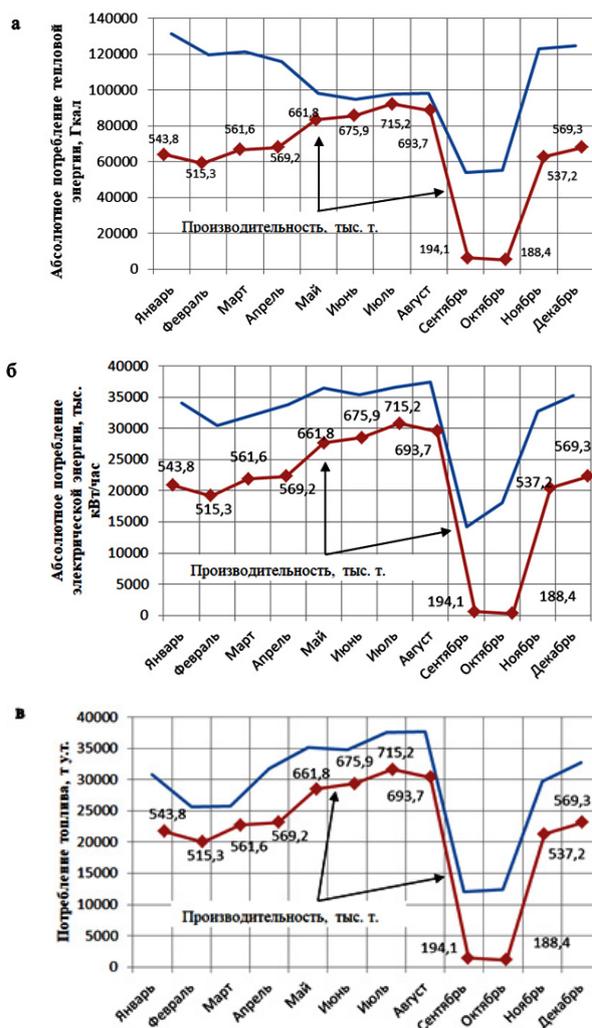


Рис. 3. Графики потребления энергии
(а — потребление тепловой энергии; б — потребление электрической энергии; в — потребление топлива)
Fig. 3. Energy consumption graphs (a — consumption of thermal energy, б — consumption of electrical energy, в — fuel consumption)

ного ремонта. По сравнению с воздействием производительности, климатический фактор, в таком разрезе, представляется менее значимым, однако хорошо видно, что потребление тепловой энергии в зимний период значительно превышает ее потребление в летний период при практически аналогичной производительности.

Для анализа эффективности исследуемой системы на всех уровнях иерархии используется система показателей эффективности (технологических, термодинамических, технико-экономических). На данном этапе определяются в том числе тепловые и эксергетические КПД элементов системы, определяются потери теплоты и эксергии в системе [16]. Рассмотрим отдельные показатели эффективности. Показатель энергоэффективности E_{yg} позволяет провести оценку внедрения малоотходных и безотходных технологий в действующие энерготехнологические схемы объектов исследования

$$E_{yg} = \frac{(E_{in,h} + E_{in,e} + (E_{in,f} - E_{rec,f}) - (E_{out,h} + E_{out,e} + E_{out,f}))}{P_i}, \quad (2)$$

где E_{in} , E_{out} — потоки подведенной и отведенной энергии (Дж); $E_{rec,f}$ — топливо, вырабатываемое в процессе получения товарных продуктов и используемое в производственном процессе (Дж); P_i — продукция i вида (кг).

Индекс энергоэффективности I_{ef} используется с целью оценки степени совершенства существующих процессов, протекающих в энерготехнологическом оборудовании и определения потенциала повышения энергетической и экологической эффективности:

$$I_{ef} = \frac{E_{yg}^H}{E_{yg}^\Phi}, \quad (3)$$

где E_{yg}^H — нормативный показатель энергоемкости рассматриваемого процесса или установки; E_{yg}^Φ — фактический показатель энергоемкости.

Учитывая сложность рассматриваемого объекта, для наиболее точного определения коэффициента энергоэффективности, запишем выражение (3) в следующем виде:

$$I_{ef} = \frac{\sum_{i=n} P_{i,j} \cdot E_{yg,j}^H}{\sum E_{yg}^\Phi}, \quad (4)$$

где $P_{i,j}$ — выпуск продукции вида j технологическим производством i за выбранный период; $E_{yg,j}^H$ — нормативное энергопотребление для вида продукции j .

Качественную оценку эффективности потребления ЭР в технологических процессах НПЗ проведем с использованием первого и второго законов термодинамики на основании известных показателей [17], в том числе эксергетического КПД

$$\eta_{ex} = \sum ex_{вых} / \sum ex_{вх} = 1 - \frac{\sum ex_{п}}{\sum ex_{вх}}, \quad (5)$$

где $\sum ex_{вх}$, $\sum ex_{вых}$ — сумма эксергий входящего и исходящего потока (Дж); $\sum ex_{п} = \sum D$ — сумма потерь в системе, (Дж).

с точки зрения потребления энергетических ресурсов на выпуск товарной продукции:

$$E_{yg} = \frac{\sum E_{in}}{P} = \frac{E_{in,h} + E_{in,e} + E_{in,f}}{P}, \quad (1)$$

где $\sum E_{in}$ — алгебраическая сумма всех первичных ЭР, подведенных к системе (Дж); P — объем произведенной товарной продукции (кг); $E_{in,h}$, $E_{in,e}$, $E_{in,f}$ — подведенные к производственному процессу тепловая энергия (Дж), электроэнергия (Дж), углеводородное топливо (Дж) для обеспечения производственного процесса и выработки продукции P . Различные виды энергии приводятся к эквиваленту.

Для НПЗ характерно потребление энергетических ресурсов, как от сторонних источников, так и за счет внутренней генерации, тогда выражение (1) может быть записано:

$$\sum ex_{п} = \sum D = \sum ex_{вх} - \sum ex_{вых} \geq 0. \quad (6)$$

Для оценки экономической целесообразности внедрения малоотходных и безотходных технологий использовались интегральные показатели экономической эффективности, в качестве основного критерия использован *чистый дисконтированный доход* (интегральный эффект) определяемый как сумма текущих эффектов за анализируемый период, приведенных к начальному шагу

$$ЧДД = \mathcal{E}_x = \sum_{t=0}^T (R_t - \mathcal{Z}_t) \cdot \alpha_t, \quad (7)$$

где R_t — результаты, достигаемые на t -м шаге расчета (руб.); \mathcal{Z}_t — затраты, осуществляемые на этом же шаге, (руб.); α_t — коэффициент дисконтирования, определяемый для постоянной нормы дисконта.

Приведенные выше отдельные этапы системного подхода к анализу эффективности сложных химико-технологических систем позволяют сделать вывод о рациональности использования первичных и вторичных энергетических ресурсов и определить научно обоснованные пути совершенствования исследуемых объектов.

Результаты

В соответствии с предложенными выше подходами дана оценка текущему состоянию наиболее значимых производств НПЗ с точки зрения их энергетической эффективности. На основании выражений (1)–(2) определены наиболее энергоемкие по удельному энергопотреблению технологические процессы переработки нефти, в т.ч. на тонну перерабатываемого сырья: каталитический реформинг — более 150; изомеризация — более 70; каталитический крекинг — более 50; первичная переработка — более 45. С использованием формул (3)–(4) определен индекс энергоэффективности отдельных технологических процессов НПЗ (табл. 1).

Кроме того, на основании (5)–(6) были рассчитаны эксергетические балансы основных производств НПЗ, рассчитана эксергия потребляемого топлива отдельными технологическими процессами

Таблица 1. Индекс энергоэффективности отдельных технологических процессов НПЗ

Table 1. Index of energy efficiency of individual technological processes of the refinery

№	Технологический процесс	Индекс энергоэффективности (по топливу)
1	Первичная переработка	0,63–0,73
2	Термический крекинг	0,80–0,90
3	Каталитический крекинг	0,74–0,86
4	Каталитический риформинг	0,51–0,56
5	Изомеризация	0,76–0,86
6	Гидроочистка	0,61–0,71

Таблица 2. Распределение потребления эксергии топлива на НПЗ

Table 2. Distribution of fuel exergy consumption at refineries

Технологические производства	Абсолютное потребление эксергии топлива, %	Удельное потребление эксергии топлива, %
Первичная переработка	35,5–36,5	5,0–6,0
Термический крекинг	12,5–13,5	11,0–12,0
Каталитический крекинг	6,4–7,4	11,0–12,0
Каталитический риформинг	18,7–21,2	20,5–21,5
Гидроочистка	12,0–13,0	1,5–2,0
Изомеризация	0,7–1,2	5,5–6,5
Производство серной кислоты	4,1–5,1	35,0–36,0
Легкий гидрокрекинг	3,9–4,9	7,0–8,0
Газофакельное хозяйство	1,5–2,5	–

Таблица 3. Состав оборудования для блока ПГУ–ТЭЦ

Table 3. Composition of equipment for CCGT-CHP unit

№	Наименование	Размерность	Значение
1	Газовая турбина: SGT–400 (Cyclone) Alstome (2 шт.)		
	Мощность	МВт	12,9
	КПД	%	34,8
2	Турбогенератор: ТС–20–2УЗ (2 шт.)		
	Мощность	МВт	20
3	Котел-утилизатор: КГТ–24/1,3–250 (2 шт.)		
	Паропроизводительность	т/ч	24
	Давление насыщенного пара	МПа	1,3
	Температура насыщенного пара	°С	250
4	Паровая турбина: КТЗ Р–2,5–2,1/0,3		
	Мощность	МВт	2,5
	Начальное давление	МПа	2,1
	Конечное давление	МПа	0,3

* Выбрана с учетом доли высокопотенциального пара после блока термической утилизации

ми, абсолютное и удельное потребление эксергии топлива в процентном соотношении дано в табл. 2.

Результаты проведенного совместного анализа представленных данных легли в основу определения наиболее энергоемких технологических процессов НПЗ и позволили провести оценку потенци-

ала повышения их эффективности. На основании анализа полученных данных для действующих и проектируемых НПЗ были разработаны и предложены схемы энергообеспечения с реализацией принципов малоотходного и безотходного производства [18, 19].

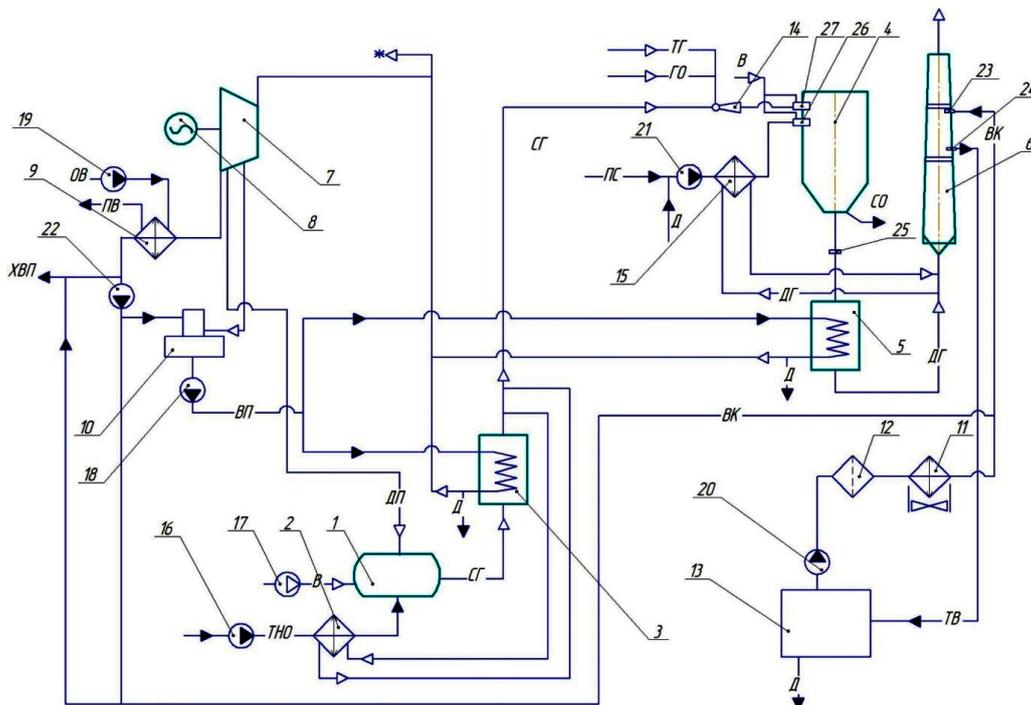


Рис. 4. Схема установки энергообеспечения с комплексной утилизацией отходов предприятий переработки нефти: 1 — газогенератор; 2 — подогреватель мазута; 3, 5 — котлы-утилизаторы; 4 — печь нейтрализации; 6 — дымовая труба; 7 — паровая турбина; 8 — электрогенератор; 9 — теплообменник конденсатор (подогреватель сетевой воды); 10 — деаэрактор; 11 — теплообменник охладитель водяного конденсата; 12 — фильтр водяного конденсата; 13 — емкость сбора конденсата; 14 — газовый эжектор; 15 — подогреватель производственных стоков; 16, 18, 19, 20, 21, 22 — насосы (мазута, питательный, сетевой, технической воды, производственных стоков, конденсата); 17 — компрессор; 23 — форсунка водяного конденсата; 24 — патрубок отвода конденсата; 25 — устройство ввода реагента; 26 — форсунка подачи жидких стоков; 27 — входной топливный патрубок; ТНО — тяжелые нефтяные остатки (мазут, гудрон, тяжелый каталитический газойль) на газификацию; В — воздух в газификатор и на горение в печь нейтрализации; СГ — синтез-газ (газ газификации); ДГ — дымовые газы; ГО — горючие газообразные отходы; ПС — производственные стоки; ДП — дутьевой пар; Д — дренаж; ВП — вода питательная; ПВ — прямая теплофикационная вода; ОВ — обратная теплофикационная вода; ВК — водяной конденсат; ТВ — техническая вода

Fig. 4. Scheme of the power supply installation with integrated disposal of waste from oil refineries: 1 — gas generator; 2 — fuel oil heater; 3, 5 — waste heat boilers; 4 — neutralization furnace; 6 — chimney; 7 — steam turbine; 8 — electric generator; 9 — heat exchanger condenser (network water heater); 10 — deaerator; 11 — heat exchanger water condensate cooler; 12 — water condensate filter; 13 — condensate collection tank; 14 — gas ejector; 15 — industrial waste water heater; 16, 18, 19, 20, 21, 22 — pumps (fuel oil, feed, network, technical water, industrial wastewater, condensate); 17 — compressor; 23 — water condensate nozzle; 24 — condensate drain pipe; 25 — reagent input device; 26 — liquid waste supply nozzle; 27 — inlet fuel pipe. ТНО — heavy oil residues (fuel oil, tar, heavy catalytic gas oil) for gasification; В — air into the gasifier and combustion into the neutralization furnace; СГ — synthesis gas (gasification gas); ДГ — flue gases; ГО — combustible gaseous waste; ПС — industrial effluents; ДП — blast steam; Д — drainage; ВП — feed water; ПВ — direct heating water; ОВ — return heating water; ВК — water condensate; ТВ — technical water

Так на рис. 4 приведена запатентованная схема установки энергообеспечения с комплексной утилизацией отходов предприятий нефтегазовой отрасли. Также была дана оценка эффективности внедрения собственного источника энергообеспечения с комплексной утилизацией отходов и выработкой ЭР, определено его влияние на эффективность энергетического комплекса в целом.

В качестве примера приведены технико-экономические показатели собственного источника энергообеспечения, интегрированного с энергетическим комплексом НПЗ для действующего отечественного предприятия переработки нефти производительностью 8 млн т в год топливного профиля (табл. 3). В рассмотренном варианте в качестве основного генерирующего оборудования принята ПГУ-ТЭЦ электрической мощностью 28 МВт, тепловой мощностью 31,4 Гкал/час. Состав основного генерирующего оборудования (за исключением блока термической утилизации и блока газификации, рис. 3) представлен в табл. 3.

Основные показатели эффективности инвестиционного проекта реализации собственного источника энергообеспечения в структуре энергетического комплекса НПЗ в сопоставлении с базовым вариантом с использованием внешних источников обеспечения ресурсами показан в табл. 4.

Таким образом, с использованием предложенных методологических подходов, на основании анализа блочно-иерархической структуры объекта исследования была предложена схема энергообеспечения, реализующая принципы внедрения малоотходных и безотходных технологий и организации приближенных к замкнутым технологическим циклов. На основании предложенной системы показателей эффективности дана оценка текущего уровня энергопотребления в количественном и качественном выражении. Так же, с использованием приведенных зависимостей, была проведена оценка энергетической и экономической целесообразности интеграции схемы комплексной генерации ЭР (рис. 4) с энерготехнологическим комплексом НПЗ на при-

Таблица 4. Основные технико-экономические показатели
Table 4. Main technical and economic indicators

Технико-экономический показатель	Размерность	Значение
Мощность		
– электрическая	МВт	28
– тепловая	Гкал/час	31,4
Индекс энергоэффективности по использованию отдельных видов ЭР		
– энергопотребления		1,21
– водопотребления		1,102
– водоотведения		1,02
Интегральный эффект (за 10 лет)	млн долларов	51,2
Срок окупаемости	лет	4,8

мере одного из производств. Комплексный подход к утилизации вторичных энергетических ресурсов и промышленных отходов (газообразных, жидких) позволяет не только снизить нагрузку на окружающую среду и экологические издержки, но и получить экономический эффект за счет собственной генерации ЭР, а следовательно, снизить долю потребления энергии от сторонних источников.

Выводы

1. Внедрение малоотходных и безотходных технологий является перспективным направлением развития для НПЗ, что обусловлено высоким уровнем воздействия производственных факторов на окружающую среду, в том числе за счет нерационального потребления ЭР. Высокий потенциал энерго- и ресурсосбережения, снижения нагрузки на окружающую среду содержится в оптимизации энергетического комплекса НПЗ за счет вовлечения в энергетический баланс производственных отходов и вторичных энергетических ресурсов.

2. Решение задачи повышения эффективности и экологической безопасности энергетического комплекса НПЗ возможно с использованием принципов системного подхода к анализу сложных систем с учетом специфики исследуемого объекта: сложной технологической структуры, связи между элементами системы по материальным и энергетическим объектам, определения функциональных зависимостей влияния технологических, режимных и эколого-климатических факторов.

3. Проведен анализ действующего предприятия с использованием предложенных методологических подходов, определены наиболее перспективные направления его совершенствования. Предложена схема, реализующая принципы малоотходного производства. Проведенная технико-экономическая оценка подтвердила целесообразность ее интеграции в энергетический комплекс действующих объектов.

Список источников

1. Васильев А. В. Анализ и оценка загрязнения биосферы при воздействии нефтесодержащих отходов: моногр. Самара: Изд-во Самарского федерального исследовательского центра РАН, 2022. 106 с.
2. Глаголева О. Ф., Пискунов И. В. Энергосбережение — приоритетная задача современной нефтегазопереработки // Деловой журнал Neftegaz.ru. 2021. № 1 (109). С. 32–35.

3. Федюхин А. В., Звончевский А. Г. Перспективные направления использования теплоты низкопотенциальных источников химических производств // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 3. С. 15–27. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27.

4. Таймаров М. А., Ильин В. К., Осипов А. Л. [и др.]. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 3-4. С. 8–16. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-8-16.

5. Кафаров В. В., Мешалкин В. П., Гурьева Л. В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.

6. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. Москва: Химия, 1969. 564 с.

7. Андрущенко А. И. Системная эффективность бинарных ПГУ-ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2000. № 12. С. 11–15.

8. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. Москва: Энергия, 1973. 296 с.

9. Ларин Е. А., Долотовский И. В., Долотовская Н. В. Энергетический комплекс газоперерабатывающих предприятий. Системный анализ, моделирование, нормирование. Москва: Энергоатомиздат, 2008. 440 с.

10. Чахирев Л. В., Плотников В. В., Плотникова Л. В. Использование программного обеспечения системного анализа для управления энергоэффективностью и структурой энергетических систем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 92-го заседания Междунар. науч. семинара им. Ю. Н. Руденко, Казань, 21–26 сентября, 2020. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. Вып. 71, кн. 3. С. 90–99.

11. Клер А. М., Маринченко А. М., Потанина Ю. М. Оптимизация теплофикационных теплоэнергетических установок // Теплоэнергетика. 2009. № 9. С. 55–59.

12. Zhang Q., Romaniuk V. N., Khroustalev B. M. Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure // Science and Technique. 2023. Vol. 22, no. 1. P. 34–41.

13. Кульбякина А. В., Озеров Н. А., Батраков П. А. [и др.]. Аспекты применения эксергии для анализа энергетического комплекса предприятий переработки углеводородного сырья // Динамика систем, механизмов и машин. 2022. Т. 10, № 3. С. 48–55. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-3-48-55.

14. Луканин П. В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 2. С. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11.

15. Долотовский И. В., Ларин Е. А. Технология полигенерации и оборудование систем энерго- и водообеспечения нефтегазовых предприятий // Энергобезопасность и энерго-

сбережение. 2021. № 6. С. 11–19. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-6-11-19.

16. Kulbyakina A. V., Ozerov N. A., Savelyeva A. I. [et al.]. Efficiency improvement of oil and gas facilities power supply systems // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd. 2021. P. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012016.

17. Кульбякина А. В., Озеров Н. А., Батраков П. А. Термодинамический анализ эффективности систем топливообеспечения предприятий переработки углеводородного сырья // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 3. С. 142–150. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-142-150.

18. Пат. 134993 Российская Федерация, МПК F 01 K 17/02. Установка электро-тепло-водоснабжения / Долотовский И. В., Ленкова А. В., Долотовская Н. В. № 2013130457/06; заявл. 02.07.13; опубл. 27.11.13, Бюл. № 33.

19. Пат. 2713936 Российская Федерация, МПК F 01 K 17/02. Установка энергообеспечения с комплексной утилизацией отходов предприятий нефтегазового сектора / Кульбякина А. В., Озеров Н. А. № 2018143274; заявл. 06.12.19; опубл. 11.02.20, Бюл. № 5.

КУЛЬБЯКИНА Александра Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловая и атомная энергетика имени А. И. Андриященко» (ТАЭ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А. (СГТУ имени Гагарина Ю. А.), г. Саратов.

SPIN-код: 6031-1158

AuthorID (РИНЦ): 666703

ORCID: 0000-0002-7510-3720

AuthorID (SCOPUS): 57195562500

Адрес для переписки: lenkova_av@rambler.ru

САВЕЛЬЕВА Анастасия Ивановна, аспирант кафедры «Тепловая и атомная энергетика имени

А. И. Андриященко» СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов.

AuthorID (SCOPUS): 57214138790

Адрес для переписки: nastya.life94@mail.ru

ОЗЕРОВ Никита Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника» СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов.

SPIN-код: 2176-1509

AuthorID (РИНЦ): 672952

AuthorID (SCOPUS): 57140736200

Адрес для переписки: nikita-alecseevich@yandex.ru

БАТРАКОВ Петр Андреевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4626-0054

ORCID: 0000-0002-0939-585X

Author ID (SCOPUS): 5650399260

ResearcherID: D-4330-2016

Адрес для переписки: peter_1cool@mail.ru

Для цитирования

Кульбякина А. В., Савельева А. И., Озеров Н. А., Батраков П. А. Системный анализ как инструмент реализации малоотходного и безотходного производства на предприятиях нефтегазовой отрасли // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 3. С. 36–45. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-36-45.

Статья поступила в редакцию 02.09.2023 г.

© А. В. Кульбякина, А. И. Савельева, Н. А. Озеров, П. А. Батраков

SYSTEM ANALYSIS AS A TOOL FOR IMPLEMENTING LOW–WASTE AND WASTE–FREE PRODUCTION AT OIL AND GAS INDUSTRY ENTERPRISES

A. V. Kulbyakina¹, A. I. Savelyeva¹, N. A. Ozerov¹, P. A. Batrakov²

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Russia, Saratov, Politechnicheskaya st., 77, 410054

² Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The introduction of low–waste and waste–free technologies is an actual development direction for oil and gas enterprises, in particular for oil refineries. Development of methodological approaches to the analysis and synthesis of complex energy systems in order to increase the efficiency and environmental safety of the objects under study through the introduction of low–waste and waste–free technologies, the implementation of technological cycles close to closed. The solution of the task is carried out in accordance with the basic principles of the system analysis of complex objects, in stages: analysis of the structure of the object using the decomposition–aggregation approach; determination of internal and external links between the elements of the system; determination of the regularities of the functioning of the object and the complex of influencing factors. A block–hierarchical structure of an oil refining enterprise has been developed, which establishes quantitative and qualitative links between the elements of the system at all levels of the hierarchy. A system of performance indicators is proposed, in accordance with which an assessment is made of the current state of the object under study. The most energy–intensive production facilities of an oil refining enterprise have been determined, their exergy balances, have been calculated. The analysis made it possible to assess the potential for increasing environmental and energy efficiency, the main directions for the implementation of low–waste and waste–free technologies. Science–based directions for improving environmental safety and energy efficiency of the object of study are determined. Several options for schemes are proposed, an assessment of the energy and technical and economic efficiency of the integration of the proposed solutions into the energy complex of oil refineries is carried out. The results obtained confirm the feasibility of integrating the proposed scheme in an existing enterprise.

Keywords: hydrocarbon raw materials, energy complex, system analysis, waste–free technologies, energy resources.

References

1. Vasil'yev A. V. Analiz i otsenka zagryazneniya biosfery pri vozdeystvii neftesoderzhashchikh otkhodov [Analysis and assessment of biosphere pollution under the impact of oily wastes]. Samara, 2022. 106 p. (In Russ.).
2. Glagoleva O. F., Piskunov I. V. Energoberezheniye – prioritnaya zadacha sovremennoy neftegazopererabotki [Energy saving is a priority task of modern oil and gas refining] // Delovoy zhurnal Neftegaz.ru. *Business Magazine «Neftegaz.RU»*. 2021. No. 109 (1). P. 32–35. (In Russ.).
3. Fedyukhin A. V., Zvonchevskiy A. G. Perspektivnyye napravleniya ispol'zovaniya teploty nizkopotentsial'nykh istochnikov khimicheskikh proizvodstv [Promising directions for the use of heat from low–potential sources of chemical production] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022. Vol. 24, no. 3. P. 15–27. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27. (In Russ.).
4. Taymarov M. A., Il'in V. K., Osipov A. L. [et al.]. Teplonasosnyy kompleks dlya utilizatsii vtorichnykh energoresursov neftekhimicheskikh zavodov [Heat pumps complex for recycling of secondary energy resources of petrochemical plants] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019. Vol. 21, no. 3–4. P. 8–16. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-8-16. (In Russ.).
5. Kafarov V. V., Meshalkin V. P., Gur'yeva L. V. Optimizatsiya teploobmennyykh protsessov i system [Optimisation of heat exchange processes and systems]. Moscow, 1988. 192 p. (In Russ.).
6. Boyarinov A. I., Kafarov V. V. Metody optimizatsii v khimicheskoy tekhnologii [Optimisation methods in chemical technology]. Moscow, 1969. 564 p. (In Russ.).
7. Andryushchenko A. I. Sistemnaya effektivnost' binarnykh PGU–TETs [The system efficiency of binary combined–cycle cogeneration stations] // Teploenergetika. *Thermal Engineering*. 2000. No. 12. P. 11–15. (In Russ.).
8. Brodyanskiy V. M. Eksergeticheskiy metod termodinamicheskogo analiza [Exergetic method of thermodynamic analysis]. Moscow, 1973. 298 p. (In Russ.).
9. Larin E. A., Dolotovskiy I. V., Dolotovskaya N. V. Energeticheskiy kompleks gazopererabatyvayushchikh predpriyatii. Sistemnyy analiz, modelirovaniye, normirovaniye [Energy complex of gas processing enterprises. System analysis, modelling, rationing]. Moscow, 2008. 440 p. (In Russ.).
10. Chakhirev L. V., Plotnikov V. V., Plotnikova L. V. Ispol'zovaniye programmogo obespecheniya sistemnogo analiza dlya upravleniya energoefektivnost'yu i strukturoy energeticheskikh system [Use of system analysis software for management of energy efficiency and structure of power systems]

// Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. *Methodical Issues of Reliability Research of Large Power Systems*. Irkutsk, 2020. Vol. 71, bk. 3. P. 90–99. (In Russ.).

11. Kler A. M., Marinchenko A. M., Potanina Yu. M. Optimizatsiya teplofikatsionnykh teploenergeticheskikh ustanovok [Optimization of cogeneration thermal power units] // *Teploenergetika. Thermal Engineering*. 2009. No. 9. P. 55–59. (In Russ.).

12. Zhang Q., Romaniuk V. N., Khroustalev B. M. Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure // *Science and Technique*. 2023. Vol. 22, no. 1. P. 34–41. (In Engl.).

13. Kul'byakina A. V., Ozerov N. A., Batrakov P. A. [et al.]. Aspekty primeneniya eksergii dlya analiza energeticheskogo kompleksa predpriyatii pererabotki uglevodorodnogo syr'ya [Aspects of the exergy application for analysis of the energy supply systems of hydrocarbon processing enterprises] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2022. Vol. 10 (3). P. 48–55. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-3-48-55. (In Russ.).

14. Lukanin P. V. Otsenka energeticheskoy effektivnosti proizvodstva sul'fatnoy tsellyulozy metodom prirashcheniya eksergii [Estimation of energy efficiency of kraft pulp production with the exergy increment method] // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020. Vol. 22, no. 2. P. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11. (In Russ.).

15. Dolotovskiy I. V., Larin E. A. Tekhnologiya poligeneratsii i oborudovaniye sistem energo- i vodoobespecheniya neftegazovykh predpriyatii [Polygeneration technology and equipment for energy and water supply systems of oil and gas enterprises] // *Energobezopasnost' i energosberezheniye. Energy Security and Energy Saving*. 2021. No. 6. P. 11–19. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-6-11-19. (In Russ.).

16. Kulbyakina A. V., Ozerov N. A., Savelyeva A. I. [et al.]. Efficiency improvement of oil and gas facilities power supply systems // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing Ltd. 2021. P. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012016. (In Engl.).

17. Kul'byakina A. V., Ozerov N. A., Batrakov P. A. Termodinamicheskiy analiz effektivnosti sistem toplivo-obespecheniya predpriyatii pererabotki uglevodorodnogo syr'ya [Thermodynamic analysis of fuel systems of hydrocarbon processing enterprises] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dinamika Sistem, Mekhanizmov i Mashin*. 2018. Vol. 6, no. 3. P. 142–150. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-142-150. (In Russ.).

18. Patent 134993 Russian Federation, IPC F 01 K 17/02. Ustanovka elektro-teplo-vodosnabzheniya [Power supply unit with complex recycling of oil and gas industry wastes] // Dolotovskiy I. V., Len'kova A. V., Dolotovskaya N. V. No. 2013130457/06. (In Russ.).

19. Patent 2713936 Russian Federation, IPC F 01 K 17/02. Ustanovka energoobespecheniya s kompleksnoy utilizatsiyey otkhodov predpriyatii neftegazovogo sektora [Power supply unit with complex recycling of oil and gas industry wastes] / Kul'byakina A. V., Ozerov N. A. No. 2018143274. (In Russ.).

KULBYAKINA Alexandra Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of A. I. Andryushchenko Thermal and Nuclear Power Engineering Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov.

SPIN-code: 6031-1158

AuthorID (RSCI): 666703

ORCID: 0000-0002-7510-3720

AuthorID (SCOPUS): 57195562500

Correspondence address: lenkova_av@rambler.ru

SAVELYEVA Anastasia Ivanovna, Graduate Student of A. I. Andryushchenko Thermal and Nuclear Power Engineering Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov.

AuthorID (SCOPUS): 57214138790

Correspondence address: nastya.life94@mail.ru

OZEROV Nikita Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Industrial Heating Engineering Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov.

SPIN-code: 2176-1509

AuthorID (RSCI): 672952

AuthorID (SCOPUS): 57140736200

Correspondence address: nikita-alecseevich@yandex.ru

BATRAKOV Petr Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Thermal Power Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4626-0054

ORCID: 0000-0002-0939-585X

Author ID (SCOPUS): 5650399260

ResearcherID: D-4330-2016

Correspondence address: peter_1cool@mail.ru

For citations

Kulbyakina A. V., Savelyeva A. I., Ozerov N. A., Batrakov P. A. System analysis as a tool for implementing low-waste and waste-free production at oil and gas industry enterprises // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 3. P. 36–45. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-36-45.

Received September 02, 2023.

© A. V. Kulbyakina, A. I. Savelyeva, N. A. Ozerov,
P. A. Batrakov