

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

**Тремкина Ольга Витальевна**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Угланов Дмитрий Александрович,  
доктор технических наук, доцент

Самара – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Аналитический обзор исследований в области использования НЭ криопродукта .....	10
1.1 ЭУ космических ЛА.....	10
1.2 Классификация НЭУ ЛА.....	14
1.3 Основные термодинамические циклы НЭУ ЛА .....	15
1.4 Проблемы и перспективы использования НЭ криопродукта .....	18
1.5 Существующие методы определения характеристик НЭУ ЛА.....	22
1.6 Основные результаты и выводы по главе 1 .....	23
2 Расширение диапазона применения и уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА .....	24
2.1 Общие положения преобразования теплоты в работу в НЭУ ЛА.....	24
2.2 Расширение диапазона применения и уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА .....	25
2.3 Основные результаты и выводы по главе 2 .....	41
3 Уточнённая общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА.....	42
3.1 Расчёт основных параметров уточнённой общей методики комплексного проектирования НЭУ.....	42
3.2 Разработка схем НЭУ с учётом их состава, рабочих тел и температурных уровней .....	48
3.3 Расчёт основной ЭУ с использованием САЕ-системы «АСТРА».....	51
3.3.1 Описание прототипа основной ЭУ.....	51
3.3.2 Расчёт основной ЭУ с использованием САЕ-системы «АСТРА».....	51
3.4 Анализ характеристик цикла НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов .....	55
3.4.1 Анализ характеристик цикла одноконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов.....	55
3.4.2 Анализ характеристик цикла двухконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов.....	59
3.4.3 Анализ характеристик цикла трёхконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов.....	64
3.4.4 Анализ характеристик цикла четырёхконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов.....	80
3.5 Основные результаты и выводы по главе 3 .....	105
4 Экспериментальные исследования одноконтурной НЭУ .....	107

4.1 Описание устройства одноконтурной НЭУ .....	107
4.2 Подготовка и проведение экспериментальных исследований .....	109
4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований.....	116
4.4 Результаты расчётных исследований по оценке точности определения эффективности эксплуатируемых НЭУ .....	119
4.5 Основные результаты и выводы по главе 4 .....	120
Заключение.....	121
Список литературы .....	123
Приложение А. Схемы и параметры циклов НЭУ .....	131
Приложение Б. Поля характеристик НЭУ .....	176

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Актуальность исследования обусловлена развитием технологий использования криогенных рабочих тел, в частности, в авиационной и космической технике. Требования по повышению эффективности энергетических установок (ЭУ) для аэрокосмической техники ближнего и дальнего космоса и, в близкой перспективе, лунных станций возрастают из года в год. Одним из способов повышения их эффективности является выбор параметров рабочего процесса ЭУ летательных аппаратов (ЛА). Объективная необходимость использования криогенных веществ обусловлена перспективами их использования в авиации, космосе, наземных установках, а также в технологиях для лунных станций. Так, например, при получении в условиях Луны кислорода и водорода последние будут выгодно храниться в криогенно-жидком состоянии. Учитывая то обстоятельство, что низкопотенциальная энергия (НЭ) криогенных продуктов в настоящее время используется не в полном объеме, актуальной является проблема утилизации части ранее затраченной энергии, хранящейся в криопродукте. Например, для сжиженного природного газа (СПГ) энергозатраты составляют около 850 кВт·ч на 1 тонну, что соответствует содержанию около 830 кДж/кг НЭ, которая, в случае наличия верхнего источника теплоты, может быть использована для получения энергии.

Существует множество способов утилизации НЭ СПГ, например, для разделения воздуха, производства электроэнергии, получения углекислого газа и др. Получение электроэнергии является наиболее распространенной областью использования НЭ (как правило, для СПГ). Технологии использования НЭ при производстве энергии изучаются, совершенствуются и реализуются, в основном, для снижения нижнего уровня температуры в циклах ЭУ ЛА.

Разработка и исследование низкотемпературных энергоустановок (НЭУ) ЛА является относительно новым направлением аэрокосмической энергетики, поэтому появляется необходимость получения объективной, систематизированной и точной информации, касающейся всех аспектов данной области.

В настоящее время в мире уже используются НЭУ по утилизации НЭ. Например, для СПГ наиболее развитая инфраструктура создана в Японии. Но, несмотря на применение НЭУ, основные исследования и научные публикации описывают отдельные проблемы повышения эффективности. Для формирования научной концепции разработки таких НЭУ необходимы обобщения, уточнения, дополнения результатов ранее

выполненных работ, а также привнесение новых данных с перспективой их практического применения.

Все это обуславливает актуальность темы исследования.

**Степень разработанности темы.** Первые разработки, посвященные использованию НЭ криопродукта, появились в 70-х годах XX века и представляли собой попытки осуществить термодинамические циклы с подводом теплоты от окружающей среды или вторичного пара и отводом теплоты к криопродукту. Большую часть разработок можно условно отнести к двум основным способам утилизации НЭ: установки, работающие по циклу Ренкина (паротурбинные установки), и установки, работающие по циклу Брайтона (газотурбинные установки). До конца 90-х годов XX века практически все разработки (за исключением небольшого числа, посвящённого установкам, работающим по циклу Стирлинга) относились к одному из этих направлений. Установки для получения энергии предлагалось устанавливать на терминалах по приёму СПГ.

Использование НЭ криопродукта позволяет получить большую эффективность термодинамического цикла без затрат энергоресурсов.

Наиболее перспективными признаны установки, работающие по циклам Ренкина и Брайтона. Для них исследовано большое количество различных схем, проведена оптимизация рабочих процессов, выбраны рабочие тела. Также значительно изучены установки для разделения воздуха. Однако многочисленные схемы предложены только в патентах и предварительных оценках. Оставшиеся установки изучены не столь хорошо (порядка 1-2 публикаций на тему по сравнению с десятками публикаций на тему циклов Брайтона и Ренкина).

В настоящее время разработке новых типов НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, исследователи и учёные всего мира уделяют всё больше внимания.

Ведущими организациями по разработке и созданию ЭУ являются АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (г. Обнинск), Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (г. Москва), производственные предприятия, конструкторские бюро и научные институты АО «ОДК»: ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), ПАО «ОДК-Сатурн» и АО «ОДК-Газовые турбины» (г. Рыбинск), АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь), ООО «ОДК Инжиниринг» (г. Москва), АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) и др.

Большой вклад в развитие криогенной техники, отечественных исследований и разработок внесли выдающиеся советские и российские учёные: Архаров А.М., Архаров И.А., Афанасьев В.А., Бродянский В.М., Грезин А.К., Григоренко Н.М., Гороховский Г.А.,

Журавлев А.М., Загорученко В.А., Карагусов В.И., Кунис И.Д., Малков М.П., Меркулов А.П., Микулин Е.И., Могорычный В.И., Новотельнов В.Н., Прусман Ю.О., Сычев В.В., Суслов А.Д., Филин Н.В. и др.

**Цель работы.** Повышение точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА за счёт совершенствования метода определения характеристик НЭУ, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, основанного на обобщении, систематизации, структурном анализе и верификации данных.

**Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:**

- 1) совершенствование математических моделей НЭУ ЛА с учётом их состава, структуры и параметрических характеристик;
- 2) расширение диапазона применения, уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА путём разработки алгоритмов с учётом их структуры и особенностей, а также повышение точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА;
- 3) уточнение методики комплексного проектирования НЭУ ЛА путём проведения структурного анализа их схем и состава, выбора рабочих тел с учётом температурных уровней в контурах, определения критериев выбора НЭУ ЛА и проведения анализа их параметрических характеристик;
- 4) численное моделирование процессов НЭУ ЛА с целью их многокритериального (многопараметрического) выбора;
- 5) верификация результатов по параметрам и характеристикам НЭУ ЛА на примере их прототипов.

**Научная новизна** заключается в следующем.

1. Усовершенствована математическая модель НЭУ ЛА путём уточнения показателя степени  $m$ , являющегося многопараметрической функцией, в классической формуле оценки эффективности Карзона-Новикова вида  $\eta = 1 - (T_{\min} / T_{\max})^m$ . Использование этой формулы позволяет уточнить КПД цикла, предопределить с наибольшей точностью характеристики НЭУ ЛА и учесть рабочие характеристики, геометрические и конструктивные параметры теплообменных аппаратов.

2. Впервые установлены закономерности влияния совокупности параметров (температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА. Эти результаты являются основой для повышения точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА.

3. Расширен диапазон применения методики определения характеристик цикла НЭУ при расходе рабочего тела от 0 до 5 кг/с. Повышена точность проектировочных расчётов НЭУ ЛА путём уточнения методики и введения в рассмотрение совокупности параметров: температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, потребных поверхностей теплообмена, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов.

4. Уточнена общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА. Предлагаемая методика отличается тем, что включает все этапы проектирования: от выбора криопродукта, оценки его энергетического потенциала до определения параметрических характеристик и проведения многопараметрического выбора НЭУ ЛА.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории и метода определения характеристик НЭУ ЛА. В частности, в усовершенствовании методики определения характеристик циклов НЭУ ЛА и методики их комплексного проектирования.

Практическая значимость заключается в разработке алгоритмов численного моделирования процессов, позволяющих обоснованно определять, с точки зрения эффективности работы, схемы и параметры рабочего процесса НЭУ ЛА. На основе проведенных исследований определены закономерности выбора НЭУ ЛА, что является основой создания баз данных по их параметрам и схемам.

**Методология и методы исследования.** Общий методологический подход базируется на основных законах термодинамики, теплопередачи и теплотехники, современных методах математического моделирования сложных систем, методах системного анализа, теории и методах построения и реализации численных моделей. В качестве вычислительного инструментария использовались программные продукты Scilab и Mathcad, а также язык программирования Python.

**Объектом исследования** являются НЭУ ЛА, использующие низкопотенциальное тепло криопродукта.

**Предметом исследования** являются параметрические характеристики и многокритериальный выбор параметров НЭУ ЛА.

**Положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель НЭУ ЛА с учётом многопараметрического показателя степени  $m$ ;
- закономерности влияния совокупности параметров (температурных

напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА;

– уточнённая методика определения характеристик цикла НЭУ ЛА с расширенным диапазоном применения при расходе рабочего тела от 0 до 5 кг/с;

– уточнённая общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА, включающая все этапы: от выбора криопродукта, оценки его энергетического потенциала до определения параметрических характеристик и проведения многопараметрического выбора НЭУ ЛА.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректностью постановки задачи, использованием апробированных теоретических положений, а также сходимостью результатов верификации параметров разработанных моделей с моделями, используемыми в реальной практике проектирования НЭУ, представленными в депонированной статье в ВИНТИ 10.04.2023, № 10-В2023.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты докладывались на студенческой научно-технической конференции «Лукачевские чтения» (Самара, 2017 г., 2018 г.), международной молодёжной научной конференции «Королевские чтения» (Самара, 2017 г.), самарской областной студенческой конференции (Самара, 2017 г., 2018 г.), международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2018 г., 2019 г.), третьей международной конференции «СЕЕСТ» (онлайн, 2021 г.), втором китайско-российском форуме науки и технологий (онлайн, 2021 г.), шестой международной конференции «ICMAE» (Китай, Чэнду, 2020 г.), четвертой международной конференции «ATDMAE» (Малайзия, Куала-Лумпур, 2020 г.), всероссийском межотраслевом молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2021 г., 2022 г.), всероссийской молодёжной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСТАРТ» (Кемерово, 2021 г.), международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2022 г.), всероссийском научно-техническом форуме по двигателям и энергетическим установкам (Самара, 2022 г.), на научно-технических совещаниях и семинарах Самарского университета.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы легли в основу выполнения государственного задания по проекту №FSSS-2020-2019



«Исследование процессов преобразования низкопотенциальной энергии криопродукта в различных энергетических системах и установках» в рамках госпрограммы РФ «Фундаментальные исследования «Для долгосрочного развития и обеспечения конкурентноспособности общества и государства» (47 ГП) база ВУЗ, нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, а также использованы в АО «Металлист-Самара», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

**Соответствие паспорту специальности.** Полученные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности «2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»: п. 1 в части «Теория и рабочий процесс тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, а также силовых и энергетических установок...»; п. 2 в части «Характеристики тепловых, электроракетных двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок ...»; п. 3 «Источники энергии тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, анализ их эффективности и способов реализации энергии в цикле»; п. 4 в части «Рабочие процессы в электроракетных двигателях, энергетических установках для преобразования энергии и направленного сброса энергии...»; п. 23 «Разработка методов расчёта термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 9 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 7 статей в журналах и материалах конференций, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 86 наименований. Работа содержит 178 страниц машинописного текста, 114 рисунков, 16 таблиц, 2 приложения.

## 1 Аналитический обзор исследований в области использования НЭ криопродукта

### 1.1 ЭУ космических ЛА

ЭУ является наиболее важным бортовым устройством космических ЛА, от которого во многом зависит конструктивное исполнение аппарата, габаритные размеры, масса и срок активного существования. Выход из строя ЭУ влечет за собой выход из строя всего космического ЛА [1].

Эффективность решения многих задач, связанных с дальнейшим освоением космического пространства, в значительной степени определяется достижениями в области бортовых ЭУ космических ЛА, предназначенных для снабжения различных потребителей электрической энергией. При этом создание и применение более эффективных ЭУ позволяет не только увеличить число и усложнить характер решаемых космическими ЛА задач, но и открывает принципиально новые пути использования космического пространства в различных целях [2].

За последние годы было опубликовано большое число работ, посвящённых, в основном, отдельным вопросам теории и конструкции ЭУ космических ЛА. Однако всестороннее и комплексное рассмотрение возможных источников первичной энергии, преобразователей одних видов энергии в другие, различных классов бортовых реактивных двигателей и т. д. позволяет составить полное и достаточно объективное представление о современном состоянии и перспективах развития всей бортовой энергетики космических ЛА в целом [2].

На рисунке 1.1 представлена структурная схема обобщенной ЭУ и её основные связи с космическими ЛА [1].

Любой тип ЭУ космических ЛА включает в себя следующие три основных элемента: источник первичной энергии, преобразователь первичной энергии в электрическую и устройство для отвода неиспользованной в процессе преобразования теплоты в окружающее пространство.

На рисунке 1.2 изображены различные виды первичных источников энергии (обозначены прямоугольниками) и те виды, в которые они трансформируются (обозначены кружками). Конечным видом всех преобразований является электрическая энергия.

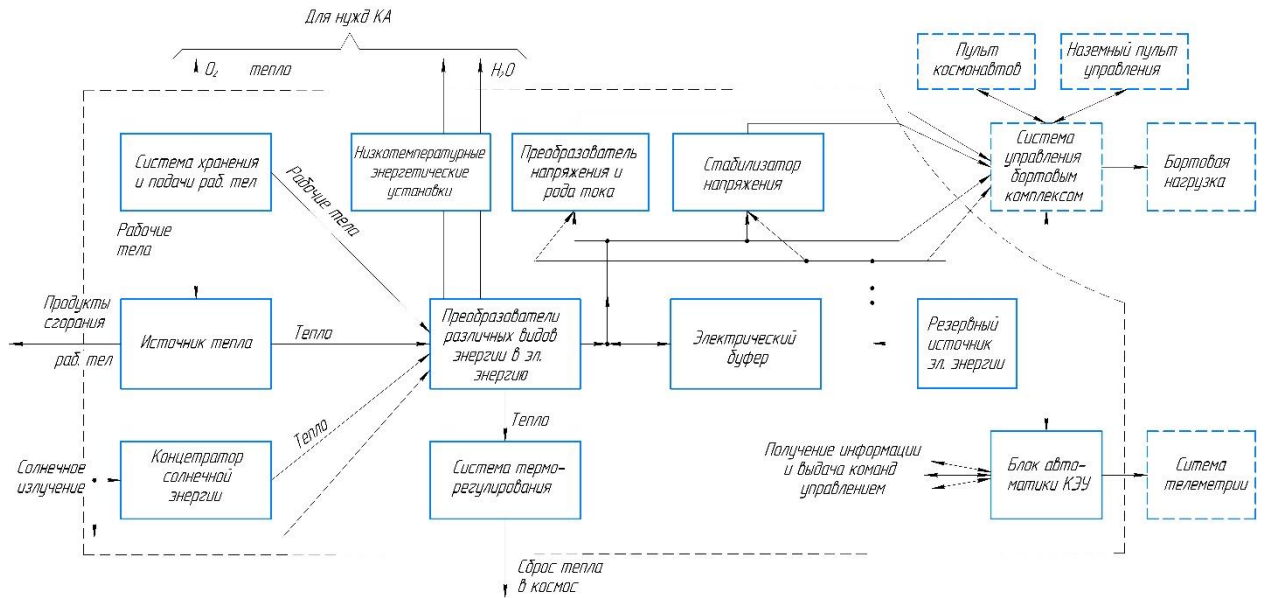


Рисунок 1.1 – Структурная схема ЭУ космических ЛА

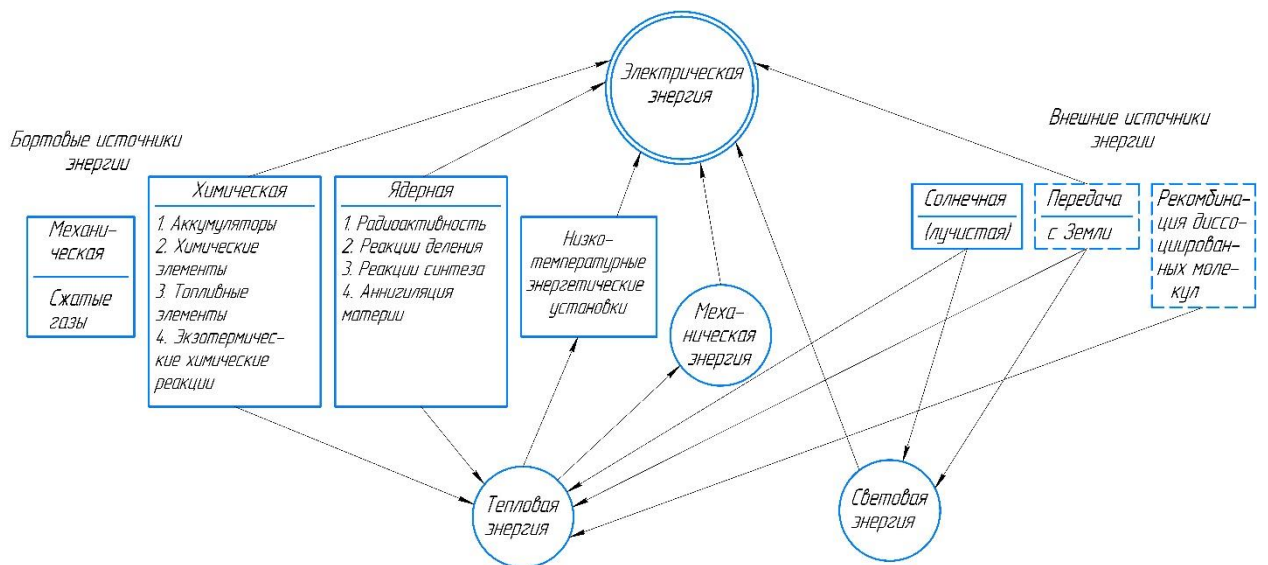


Рисунок 1.2 – Виды первичных источников энергии и направления их трансформации

Применение преобразователей тепла различных типов в космической энергетике связано с рядом особенностей, накладывающих определенные ограничения как на выбор основных параметров рабочего процесса, так и на конструктивные схемы самих ЭУ.

К числу этих особенностей, в первую очередь, необходимо отнести [2]:

- 1) ограничения в снижении нижней температуры цикла по условиям теплоотвода в космосе;
- 2) затруднения в осуществлении ряда процессов при наличии двухфазных рабочих тел, протекающих в условиях невесомости;
- 3) требования обеспечения минимальной массы и габаритов, простоты, удобства и, главное, безопасности эксплуатации;

4) большую сложность, а в ряде случаев и невозможность, пополнения рабочего тела;

5) требования обеспечения высокой надёжности в сочетании с длительным ресурсом работы без серьёзного вмешательства со стороны человека и др.

К числу особенностей предъявляемых требований к ЭУ космических ЛА является то, что единственной возможностью отвода теплоты в космическом пространстве без выброса массы является излучение. По этой причине основой современных ЭУ космических ЛА являются холодильники-излучатели.

Холодильники-излучатели являются одним из самых значительных по массе и габаритам элементов ЭУ космических ЛА. Доля их массы по отношению к массе всей ЭУ в зависимости от её типа и мощности может составлять от 0,3 до 0,7.

Одним из возможных вариантов реализации стабильной работы ЭУ космических ЛА является использование криогенных рабочих тел. Использование НЭУ на борту космических ЛА позволит решить ряд проблем, связанных с особенностями космической энергетики. А предлагаемый в данной диссертационной работе усовершенствованный метод определения характеристик НЭУ ЛА позволит решить проблемы, связанные с требованиями к массогабаритным характеристикам ЭУ космических ЛА еще на предпроектном этапе.

К числу ЭУ, имеющих наибольшее практическое значение для космической энергетики, относятся газотурбинные ЭУ (рисунок 1.3), паротурбинные ЭУ (рисунок 1.4) и ЭУ с двигателем Стирлинга (рисунок 1.5).

Общая классификационная схема ЭУ космических ЛА, включающая рассмотренные источники и преобразователи энергии, представлена на рисунке 1.6.

Составление оптимальной энергетической системы является сложной задачей, требующей учёта многих факторов. Обычно заданными бывают некоторые исходные параметры или требования, вытекающие из назначения космических ЛА. К числу таких требований относятся продолжительность активного функционирования космических ЛА, потребляемая электрическая мощность, суммарное изменение характеристической скорости, ускорение, параметры орбиты и т. д. ЭУ космических ЛА должны удовлетворять этим требованиям при наилучшем сочетании ряда критериев, главными из которых являются: минимальная масса и габариты, надёжность, безопасность, удобство эксплуатации, малая стоимость. Совокупность перечисленных критериев определяет эффективность ЭУ космических ЛА в целом.

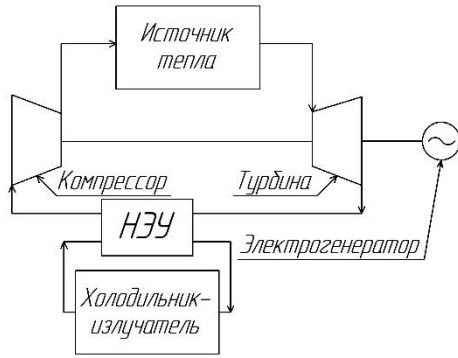


Рисунок 1.3 – Схема газотурбинной ЭУ космического ЛА

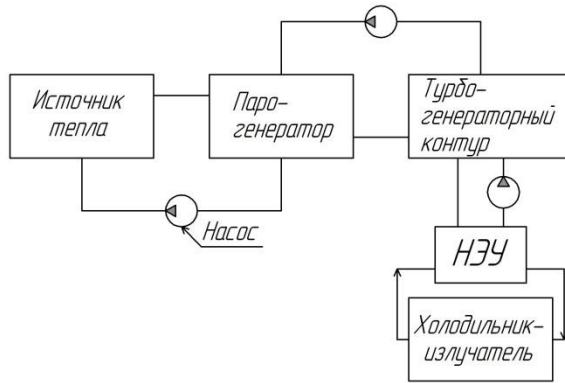


Рисунок 1.4 – Схема паротурбинной ЭУ космического ЛА

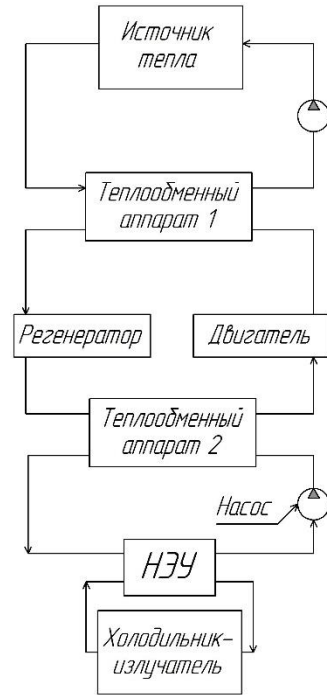


Рисунок 1.5 – Схема ЭУ космического ЛА с двигателем Стирлинга

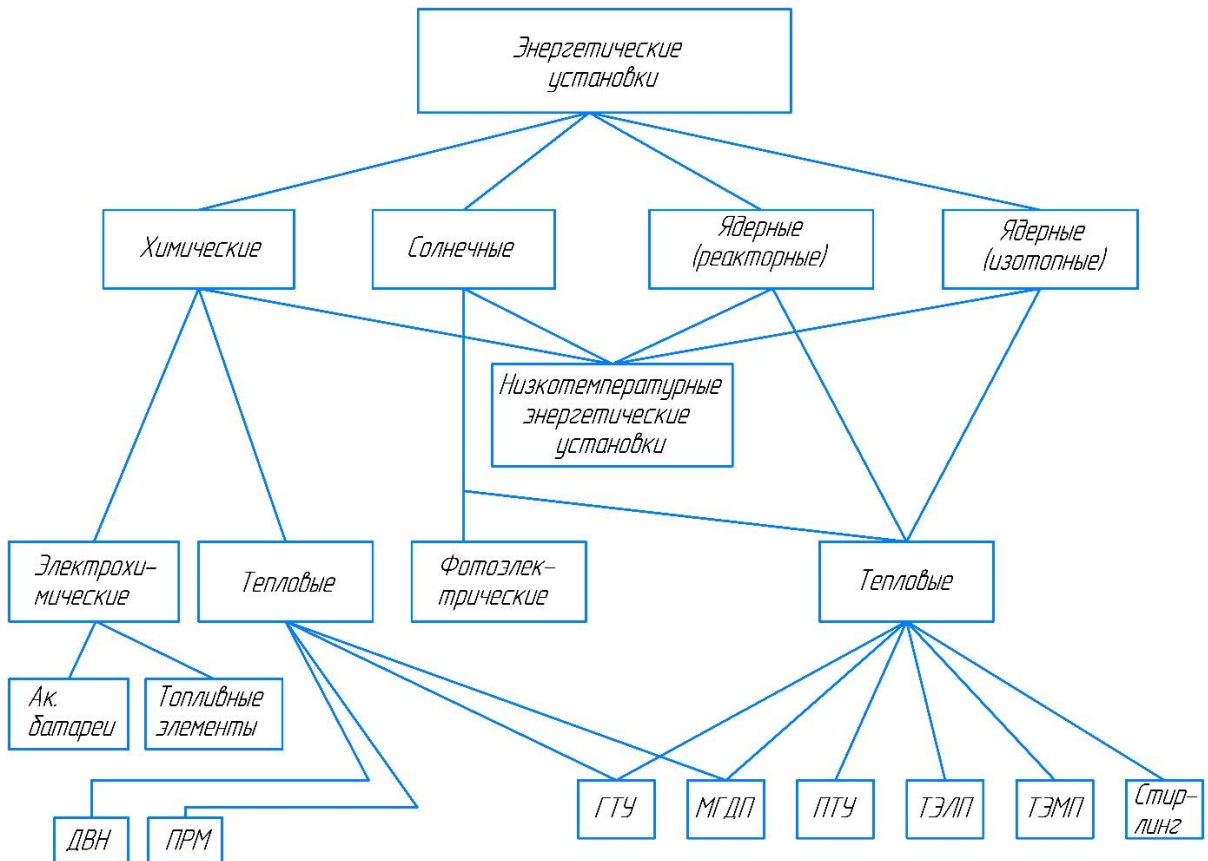


Рисунок 1.6 – Классификационная схема ЭУ космических ЛА

## 1.2 Классификация НЭУ ЛА

В данном разделе представлена расширенная классификация [3] проектируемых НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта.

По количеству контуров:

- одноконтурные;
- двухконтурные;
- трёхконтурные;
- четырёхконтурные;
- пятиконтурные;

по видам НЭУ:

- НЭУ, работающие по циклу Ренкина (НЭУ ЦР);
- НЭУ, работающие по циклу Брайтона (НЭУ ЦБ);
- НЭУ, работающие по циклу Стирлинга (НЭУ ЦС);
- НЭУ, работающие по циклу Эриксона (НЭУ ЦЭ);
- НЭУ, работающие по циклу Калины;
- НЭУ, работающие по циклу Алана;
- термоэлектрические генераторы (ТЭГ);
- абсорбционные холодильные машины;

по видам систем преобразования криопродукта (СПК):

- генераторы тепловой и электрической энергии;
- технологические процессы изготовления деталей;
- двигатели и силовые установки транспортных средств (авиационные и космические ЛА, судовой и автомобильный транспорт);
- системы охлаждения и термостатирования;
- системы ожижения;

по типам генераторов тепловой и электрической энергии:

- газотурбинные установки (ГТУ);
- газопоршневые установки (ГПУ);
- паросиловые установки (ПСУ);
- котельные установки;

по типу распределения подводимой тепловой энергии в многоконтурных НЭУ:

- последовательные;

- параллельные;
  - последовательно-параллельные;
- по видам подводимой тепловой энергии в НЭУ:
- теплота окружающей среды;
  - теплота вторичных источников энергии;
  - теплота возобновляемых источников энергии;
  - теплота, выделяемая при горении углеводородного топлива.

### 1.3 Основные термодинамические циклы НЭУ ЛА

При проектировании любых ЭУ отправным пунктом анализа будет изучение прототипов. Для определения подходов в решении общей и частных задач было необходимо выявить тенденции по теме использования НЭ в НЭУ ЛА. В связи с этим, в лаборатории криогенной техники Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева были выполнены работы по сбору патентной и публикационной информации, их анализу, перепроверке их заявленных характеристик и, в результате, составлении библиотеки НЭУ, что отразилось в регистрации подробной библиотеки в виде публикации депонированной статьи во Всероссийском институте научной и технической информации (РАН) [4], что сделано впервые в данной области.

НЭУ для производства электроэнергии является одним из наиболее предпочтительных методов использования НЭ криопродукта [5-7], в таких системах криопродукт может быть использован в качестве среды, в которую отводится теплота цикла. Основными термодинамическими циклами НЭУ ЛА для получения энергии, являются: открытый цикл Ренкина (ЦР), органический цикл Ренкина (ОЦР) и цикл Брайтона (ЦБ).

#### Открытый ЦР.

Среди вышеперечисленных циклов открытый ЦР является особенным, поскольку в нём используется только потенциальная энергия давления криопродукта [8]. В данном цикле давление криопродукта повышается до уровня выше давления в распределительном трубопроводе, после чего криопродукт регазифицируется в теплообменнике-испарителе. Затем происходит расширение газа в турбине с выработкой электроэнергии [9]. Однако, часть НЭ криопродукта теряется в ходе реализации цикла. Таким образом, открытый ЦР

более эффективен при совмещении его с другими термодинамическими циклами для повышения КПД НЭУ.

#### ОЦР.

В ОЦР применяется в качестве рабочего тела вещество с низкой температурой кипения для использования НЭ криопродукта в теплообменнике-конденсаторе. В данном цикле рабочая жидкость последовательно проходит процессы сжатия, испарения, расширения и конденсации для получения энергии, при этом используя криопродукт в качестве среды, в которую сбрасывается теплота в процессе конденсации. ОЦР впервые был реализован в НЭУ в Японии в 1979 году [10].

Расчётные исследования ОЦР для утилизации НЭ криопродукта связаны с выбором рабочего тела и параметров с целью получения максимального КПД НЭУ [11]. В работе [12] была проведена оптимизация трёх различных схем ОЦР для использования НЭ криопродукта, а именно: одноступенчатого ОЦР (ООЦР), параллельного двухступенчатого ОЦР (ПДОЦР) и каскадного двухступенчатого ОЦР (КДОЦР). Была проведена оптимизация ОЦР за счёт использования восьми различных рабочих тел для получения максимального возврата НЭ криопродукта [12]. Результаты этих исследований показали, что за счёт ПДОЦР был достигнут максимальный КПД (17,36%). В работе [13] проведено исследование процессов сжатия и расширения рабочего тела, а также энергетических характеристик двухступенчатого ЦР, использующего НЭ криопродукта. НЭУ на основе многокаскадного ОЦР может быть использована для получения максимальной эффективности НЭ криопродукта. Выходная мощность, термодинамический КПД и эксергетический КПД НЭУ повышаются за счёт увеличения числа ступеней. Однако, увеличение количества ступеней, ведёт к усложнению НЭУ. Таким образом, применение трёхкаскадного ОЦР является наиболее эффективным и технически целесообразным [14].

Объединение ЭУ на основе абсорбционного цикла с ОЦР в НЭУ, использующую НЭ криопродукта, позволяет увеличить энергетическую эффективность НЭУ. В работе [15] предложен новый термодинамический цикл для повышения эффективности процесса утилизации НЭ криопродукта. В работе [16] предложен абсорбционный энергетический цикл в комбинации с ОЦР для получения электроэнергии за счёт использования НЭ криопродукта с целью повышения эффективности процесса регазификации. Отдельно были проведены исследования по применению ОЦР для утилизации НЭ криопродукта и использованию энергии океана в ЭУ, работающих по ОЦР [17], а также в сочетании с двухконтурным ОЦР [18]. В работе [19] в ЭУ используется ОЦР совместно с открытым ЦР для получения электроэнергии, что существенно повышает эффективность ЭУ.



В работе [20] была проведена экономическая оптимизация ОЦР для утилизации НЭ криопродукта с целью выработки электроэнергии. Также проведён анализ затрат и эксергетическая оценка эффективности многоконтурной НЭУ. Были предложены три схемы для повышения эффективности многокаскадного энергетического цикла. В работе [21] проведено сравнение существующих циклов для получения электроэнергии и регазификации криопродукта в системе хранения криопродукта. В работе [22] утверждается, что наиболее эффективным и экономически целесообразным является НЭУ на ОЦР на чистом аммиаке.

Преимуществом НЭУ, работающих по ОЦР, для утилизации НЭ криопродукта является высокая выходная мощность за счёт низкого энергопотребления насоса. Однако недостатком является сложность выбора смеси рабочего тела в соответствии с процессом испарения криопродукта.

#### ЦБ.

В ЦБ используется НЭ криопродукта для снижения температуры газа на входе в компрессор, что значительно уменьшает затраты энергии на сжатие рабочего тела, повышает энергопроизводительность и термический КПД цикла. В работе [23] представлен ЦБ с ЦР для утилизации НЭ криопродукта с минимально возможным выбросом  $\text{CO}_2$ . В работе [24] представлен новый ЦБ с использованием вторичных источников энергии (теплоты выхлопных газов) в качестве источника теплоты и НЭ криопродукта в качестве энергии, отводимой от цикла. Возможна реализация каскадного использования НЭ, что позволит существенно увеличить КПД НЭУ, работающей по классическим ЦБ и ЦР. В работе [25] представлен термодинамический анализ ЭУ, в которую включены контуры, работающие по ЦБ и ЦР, последовательно соединённые в единую схему с использованием НЭ криопродукта в качестве энергии, отводимой от цикла.

В работе [26] была оптимизирована многоконтурная ЭУ, состоящая из контуров, работающих по ЦБ, ЦР и ОЦР, что позволяет обеспечить максимальную энергетическую и экономическую эффективность. В работе [27] проведено исследование реального газового ЦБ для утилизации НЭ криопродукта. В данном исследовании предоставлены критерии выбора рабочего тела в ЦБ для максимально-эффективного использования НЭ криопродукта. В работе [28] предложено применение НЭУ, в состав которой входят контуры, работающие по замкнутому ЦБ и ОЦР. Преимуществами ЦБ являются более простая конструкция и более безопасная эксплуатация по сравнению с ОЦР. Однако, выходная мощность ЦБ меньше, чем у ОЦР, из-за более высокого потребления энергии компрессором. Применение смеси газа в качестве рабочего тела в ЦБ является одним из

возможных вариантов повышения его КПД и снижения потерь эксергии в процессе теплообмена в теплообменнике-испарителе криопродукта.

#### 1.4 Проблемы и перспективы использования НЭ криопродукта

В связи с развитием мировой экономики и ростом населения планеты происходит постоянное увеличение потребляемой энергии ежегодно на 2,4% в течение последних десятилетий [29]. Потребление природного газа (ПГ) – одного из самых чистых видов невозобновляемых источников энергии – постоянно растёт, благодаря его транспортабельности, высокой теплоте сгорания и низким выбросам вредных веществ [30]. Этим объясняется всё более широкое применение ПГ в качестве топлива, в том числе сжиженного природного газа (СПГ).

Транспортировка ПГ может осуществляться либо по трубопроводам в газообразном состоянии, либо в криогенных резервуарах в сжиженном состоянии. В случаях, когда ПГ необходимо транспортировать на большие расстояния, транспортировка по трубопроводу технически и экономически нецелесообразна. В этом случае целесообразно использовать транспортировку ПГ в сжиженном состоянии [31]. В 1 м<sup>3</sup> СПГ содержится около 625 м<sup>3</sup> ПГ (при давлении 0,1 МПа) [32, 33]. Кроме того, СПГ бесцветен, нетоксичен, не имеет запаха и не вызывает коррозии [34], что обуславливает его широкое применение в различных отраслях промышленности. Необходимо отметить, что при испарении СПГ и сжигании ПГ образуется очень низкий уровень выбросов парниковых газов и оксидов азота, а также практически отсутствуют оксиды серы [35].

На рисунке 1.7 представлена традиционная цепочка использования СПГ, которая включает производство газа, сжижение, отгрузку, хранение и регазификацию. ПГ добывается на газовых месторождениях, а затем переводится в сжиженное состояние в ЭУ по ожижению за счёт достижения криогенного уровня охлаждения [36]. Далее СПГ перевозится танкерами потребителю, после чего его заправляют в терминалы для хранения. На следующем этапе использования СПГ происходит его регазификация, далее он подается в газораспределительные сети, электростанции и другим промышленным потребителям [37].

На этапе регазификации НЭ СПГ, составляющая около 830 кДж/кг (эквивалентно 0,23 кВт·ч/кг), аккумулируется морской водой в теплообменниках-испарителях СПГ [38-41], в которых он переходит из жидкой фазы (-162°C) в газовую фазу (25°C) [42].

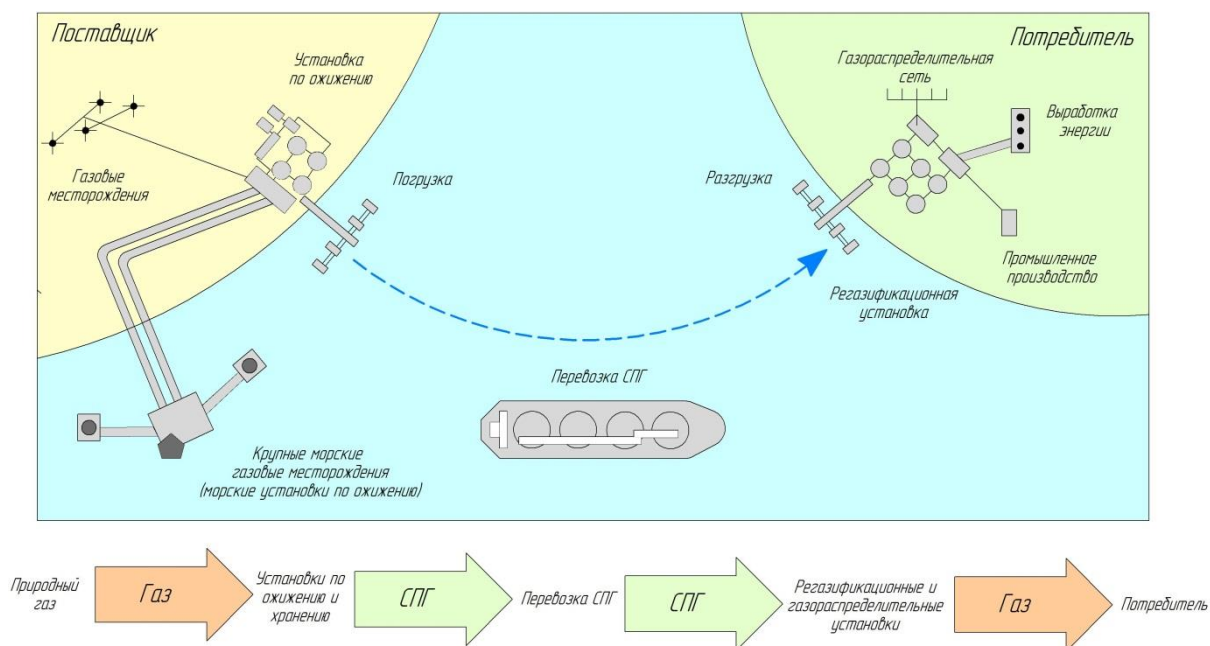


Рисунок 1.7 – Диаграмма традиционной цепочки поставок СПГ

В 2017 г. мировое потребление СПГ составило 795 млн тонн [43]. В соответствии с работой [43] данное количество СПГ содержит в себе около 6,6 ГДж (20,9 ГВт). Рост потребления СПГ к 2030 г. прогнозируется до уровня в 940 млрд м<sup>3</sup> СПГ в год. Эффективное использование НЭ СПГ позволит существенно повысить энергоэффективность процесса его транспортировки, хранения, регазификации и снизить выбросы парниковых газов.

К 2030 году ожидается рост совокупной мощности терминалов по регазификации до 1584 млрд м<sup>3</sup>. На рисунке 1.8 представлена схема размещения построенных или строящихся терминалов СПГ. Из этой схемы следует, что большинство терминалов регазификации СПГ построено в Азиатско-Тихоокеанском регионе и Европе, что объясняется быстро растущими темпами потребления энергии и ПГ [43]. Мощность регазификационных терминалов СПГ и соответствующий потенциал НЭ представлены в таблице 1.1. Из таблицы 1.1 видно, что Япония, как крупнейший в мире импортёр СПГ, имеет самые большие располагаемые мощности НЭ. С начала 1970-х годов Япония стала первой страной, в которой стали проводить исследования по применению НЭ СПГ для получения электроэнергии в процессе его регазификации в энергетических комплексах и терминалах [42]. Следует отметить, что разработке ЭУ, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта (в том числе и СПГ) в последнее время уделяется большее внимание в промышленно развитых странах, а именно в России, США, Великобритании, Японии, Германии, Китае и Южной Корее. Также ведутся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по подготовке к серийному производству таких ЭУ. Наиболее развитая инфраструктура в данной области создана в

Китае и Японии. Значительное количество НЭ СПГ во всем мире должно быть использовано для повышения энергоэффективности, сокращения выбросов парниковых газов и повышения эффективности процесса регазификации.

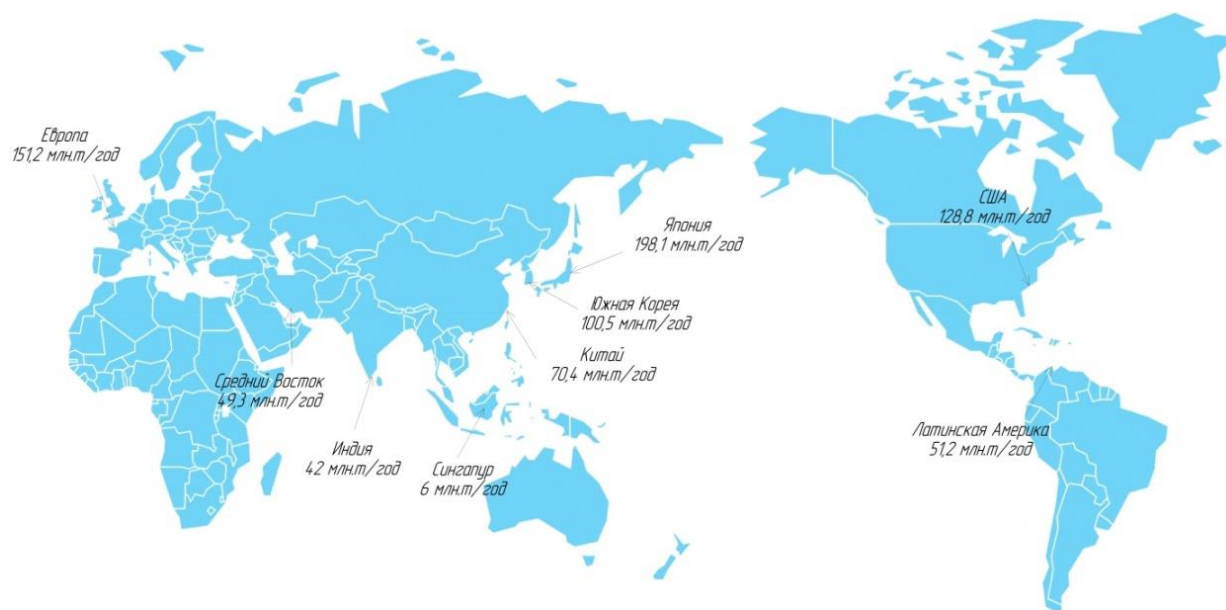


Рисунок 1.8 – Карты терминалов регазификации СПГ по всему миру по состоянию на 2017 год

Таблица 1.1 – Регазификационные мощности терминалов СПГ и доступная НЭ в разных странах или регионах

№	Страна или регион	Мощность, млн т/год	Доступная НЭ, МВт
1	Япония	198,1	5213,8
2	Европа	151,2	3979,4
3	США	128,8	3389,9
4	Южная Корея	100,5	2645,1
5	Китай	70,4	1852,9
6	Латинская Америка	51,2	1347,6
7	Средний Восток	49,3	1297,5
8	Индия	42,0	1105,4
9	Россия	32,5	855,4
10	Сингапур	6,0	157,9

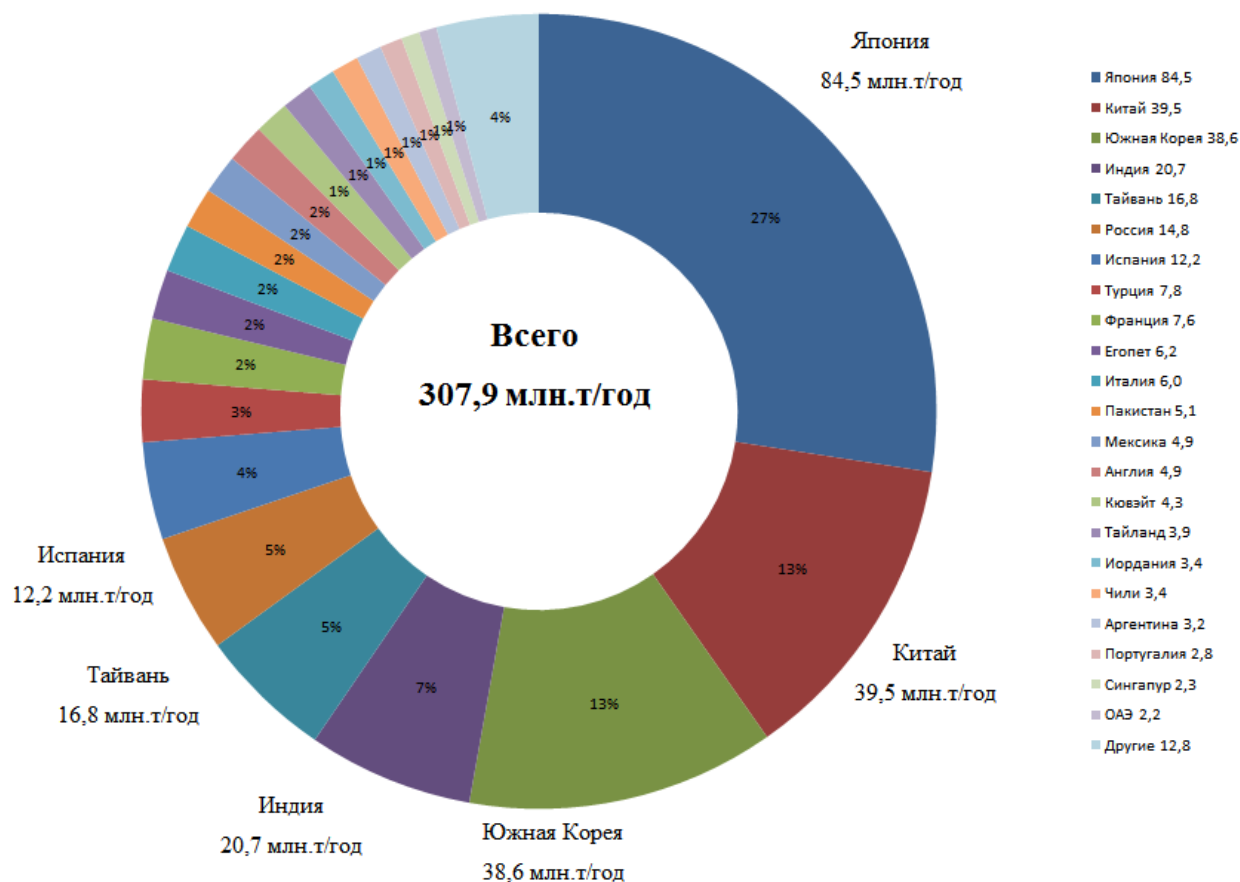


Рисунок 1.9 – Диаграмма распределения мощности терминалов по регазификации

Регазификация в теплообменниках-испарителях происходит за счёт теплоты окружающей среды или специально подводимой тепловой энергии. Необходимо отметить, что на получение сжиженного криопродукта затрачивается определённое количество энергии (например, на 1кг СПГ затрачивается около 0,6-1 кВт·ч электроэнергии (рисунок 1) [9]). Эта ранее затраченная энергия, как правило, при регазификации безвозвратно теряется, поэтому её использование было бы целесообразно. НЭ СПГ, если она не используется, будет рассеиваться в теплоносителях (например, в морской воде, воздухе), в испарителях и вытекать в окружающую среду [9]. НЭ является уникальной формой энергии, поскольку она находится в криогенном состоянии и может использоваться в НЭУ для отвода теплоты термодинамического цикла  $Q_2$ .

Энергетические системы, использующие НЭ СПГ, позволяют осуществлять производство электроэнергии [44-49], разделение воздуха [50, 51], опреснение [52] и переработку пищевых продуктов [53] и т. д. Области применения НЭ криопродукта представлены на рисунке 1.10.

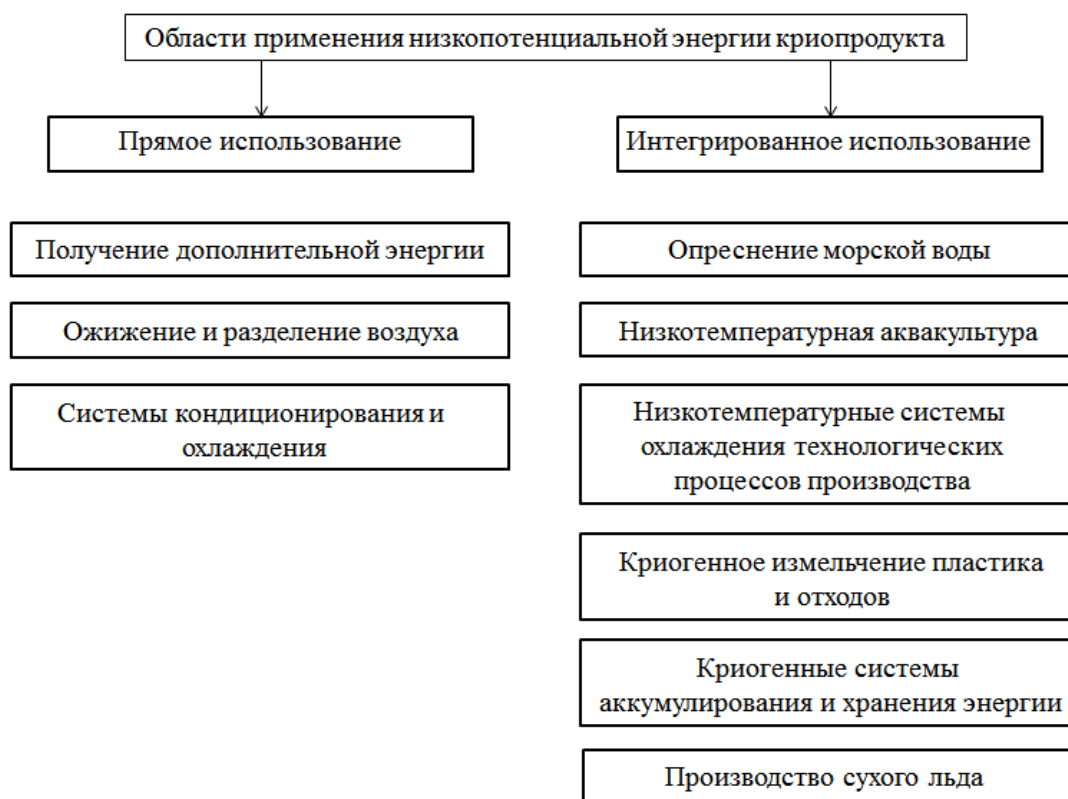


Рисунок 1.10 – Области применения НЭ криопродукта

### 1.5 Существующие методы определения характеристик НЭУ ЛА

Первым этапом создания высокоэффективных теплотехнических решений является анализ существующей или проектируемой системы с точки зрения степени её термодинамического совершенства. Для определения характеристик и проведения анализа эффективности НЭУ ЛА используются энергетический (термодинамический) и эксергетический методы [3].

Методы термодинамического анализа, основанные на использовании второго закона термодинамики, позволяют оценить предельно возможные энергетические показатели любых установок, соответствующие случаю обратимого протекания всех процессов.

Теоретической базой процесса энергосбережения является эксергетический метод анализа действующих или проектируемых технологических систем. Составленный на основе первого и второго законов термодинамики, он позволяет выполнить как относительную (эксергетический КПД), так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства системы. При анализе учитывают затраченную

эксергию и получаемый при этом эксергетический КПД. Задача состоит в том, чтобы подведённая эксергия в анализируемую систему была минимальной и реализовывалась с максимально возможным эксергетическим КПД [54].

### 1.6 Основные результаты и выводы по главе 1

1. Выполнен анализ схем ЭУ космических ЛА. Эффективность решения многих задач, связанных с дальнейшим освоением космического пространства, в значительной степени определяется достижениями в области бортовых ЭУ космических ЛА, предназначенных для снабжения различных потребителей электрической энергией.

2. Одним из возможных вариантов реализации стабильной работы ЭУ космических ЛА является использование криогенных рабочих тел. Использование НЭУ на борту космических ЛА позволит решить ряд проблем, связанных с особенностями космической энергетики, которые, в свою очередь, связаны с требованиями к массогабаритным характеристикам космических ЛА, ещё на предпроектном этапе.

3. Составлена классификация схем ЭУ космических ЛА и расширена классификация схем НЭУ ЛА.

4. Выполнен анализ основных термодинамических циклов НЭУ ЛА. Основными термодинамическими циклами НЭУ ЛА для получения энергии, являются: открытый цикл Ренкина, органический цикл Ренкина и цикл Брайтона.

5. Проведён анализ проблем и перспектив использования НЭ криопродукта. Разработке НЭУ, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта (в том числе и СПГ), в последнее время уделяется большее внимание в промышленно развитых странах. Также рассмотрены области применения НЭ криопродукта.

6. Изучены основные существующие методы определения характеристик НЭУ ЛА. На сегодняшний день для определения характеристик и проведения анализа эффективности НЭУ ЛА используются энергетический (термодинамический) и эксергетический анализы.

## 2 Расширение диапазона применения и уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА

### 2.1 Общие положения преобразования теплоты в работу в НЭУ ЛА

Данная глава посвящена расширению диапазона применения и уточнению методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА, а также установке закономерностей влияния совокупности параметров (температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА. Эти результаты являются основой для повышения точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА.

В разделе 2.3 диссертации [3] рассмотрены особенности процессов преобразования теплоты в работу при условии использования самого криопродукта одновременно и как рабочего тела, и как низшего источника (стока) теплоты. Приведённые на рисунке 43 [3] циклы Карно принято определять, как высокотемпературный – 1-2-3-4 («теплоположительный») и низкотемпературный – 1'-2'-3'-4' («теплоотрицательный»). Эти два термина принадлежат академику Алексееву Г.Н. [55], который ввёл их с учётом общепринятого понятия теплоты по Клаузиусу (Путилову К.А., Сычеву В.В., Кириллину В.А и др.).

В разделе 2.3 диссертации [3] вводится обобщённое понятие теплоты (тепла), которое может быть применимо как для переноса энергии на низкотемпературном, так и на высокотемпературном уровнях.

В тепловых машинах, осуществляющих термодинамический цикл, вполне очевидно, должны присутствовать соответствующие температурные напоры между источниками теплоты и рабочим телом (например –  $\Delta t_k$  и  $\Delta t_r$  или  $\Delta T_k'$  и  $\Delta T_r'$ , рисунок 43 [3]).

Если для высокотемпературного цикла в качестве нижнего источника для отвода теплоты чаще всего используется окружающая среда с температурой  $T_{oc} \sim 300\text{K}$ , то для низкотемпературного цикла нижним источником является сам криопродукт с температурой  $T_k$  [3].

Выведенная И.И. Новиковым, Ф.Л. Карзоном и др. [56, 57] формула эффективности



(2.1) для циклов с учётом температурных напоров апробирована многими исследователями и доказала право на существование.

$$\eta_N = 1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}, \quad (2.1)$$

где  $T_1$  – температура подвода теплоты;

$T_2$  - температура отвода теплоты (согласно Кириллину В.А., Сычеву В.В., Шейндлину А.Е. [58]).

Формула (2.1) применима для любых прямых циклов после их приведения к так называемому «карнотизированному» виду, т.е. осреднению температур подвода и отвода теплоты и приведению к одному из частных случаев обобщённого цикла Карно.

Предлагается ввести модифицированный вид формулы (2.1):

$$\eta_{tN} = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^m, \quad (2.2)$$

где  $m$  – показатель, являющийся многопараметрической функцией.

Из формулы (2.2) видно, что в случае формулы (2.1) показатель степени  $m$  при отношении температур имеет значение 0,5 и является константой. Однако, как показывает анализ, эта величина является многопараметрической функцией.

## 2.2 Расширение диапазона применения и уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА

Расширение диапазона применения и уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА строится на методике расчёта «карнотизированного» цикла Ренкина при условии получения максимальной мощности [3], [59].

В данных работах [3], [59] рассмотрен низкотемпературный паросиловой цикл Ренкина, использующий НЭ криопродукта (рисунок 1 [59]). Уточнение представленной методики заключается в использовании оценки рабочих характеристик теплообменных аппаратов с учётом показателя NTU (number of transfer units), показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел  $kF$  и введении расходного коэффициента  $Z_G$ . Представленная в [3], [59] методика разработана для оценки эффективности НЭУ, использующих в качестве рабочего тела криопродукт (СПГ) при расходе от 0 до 1 кг/с. В данном диссертационном исследовании проведено расширение диапазона возможных расходов рабочего тела от 0 до 5 кг/с.

Показатель NTU учитывает коэффициент теплопередачи, площадь поверхности теплообмена, расход и теплоёмкость рабочего вещества, а также геометрические и конструктивные параметры теплообменных аппаратов. Ниже приведены основные преобразования для получения формулы показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел  $k_r F_r$ , учитывающей, в том числе, и относительную величину коэффициентов теплоёмкости.

Среднелогарифмический температурный напор определяется по формуле (2.3).

$$\Delta t_{cp} = \frac{((T_r + \Delta t_r) - T_k) - (T_r - \frac{T_r + T_k}{2})}{\ln\left(\frac{(T_r + \Delta t_r) - T_k}{T_r - \frac{T_r + T_k}{2}}\right)}. \quad (2.3)$$

Зная среднелогарифмический температурный напор, можно определить по формуле (2.4) теоретический показатель влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел [60, 61].

$$(k_r F_r)_{уд} = \frac{C_{pPT} \cdot (T_r - T_k) + r_{PT}}{\Delta t_{cp}}. \quad (2.4)$$

Мощность тепловой машины, с одной стороны, определяется через параметры воздуха по формуле (2.5), с другой стороны, определяется через параметры рабочего вещества по формуле (2.6).

$$W = C_{pB} \cdot G_B \cdot \Delta T_B = C_{pB} \cdot G_B \left(T_r + \Delta t_r - \frac{T_r + T_k}{2}\right); \quad (2.5)$$

$$W = G_{PT} (C_{pPT} \cdot \Delta T_{PT} + r_{PT}) = G_{PT} (C_{pPT} \cdot (T_r - T_k) + r_{PT}). \quad (2.6)$$

С учётом формул (2.5) – (2.6) максимальный коэффициент теплоёмкости вычисляется по формуле (2.7).

$$C_{max} = G_B \cdot C_{pB} = \frac{G_{PT} (C_{pPT} \cdot (T_r - T_k) + r_{PT})}{T_r + \Delta t_r - \frac{T_r + T_k}{2}}. \quad (2.7)$$

Минимальный коэффициент теплоёмкости определяется по формуле (2.8).

$$C_{min} = G_{PT} \cdot C_{pPT}. \quad (2.8)$$

$$NTU = \frac{(k_r F_r)_{уд}}{C_{min}}. \quad (2.9)$$

На рисунках 2.1 – 2.4 представлены зависимости показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при разных температурных напорах  $\Delta t_r$  для расходов рабочего тела от 1 до 5 кг/с.

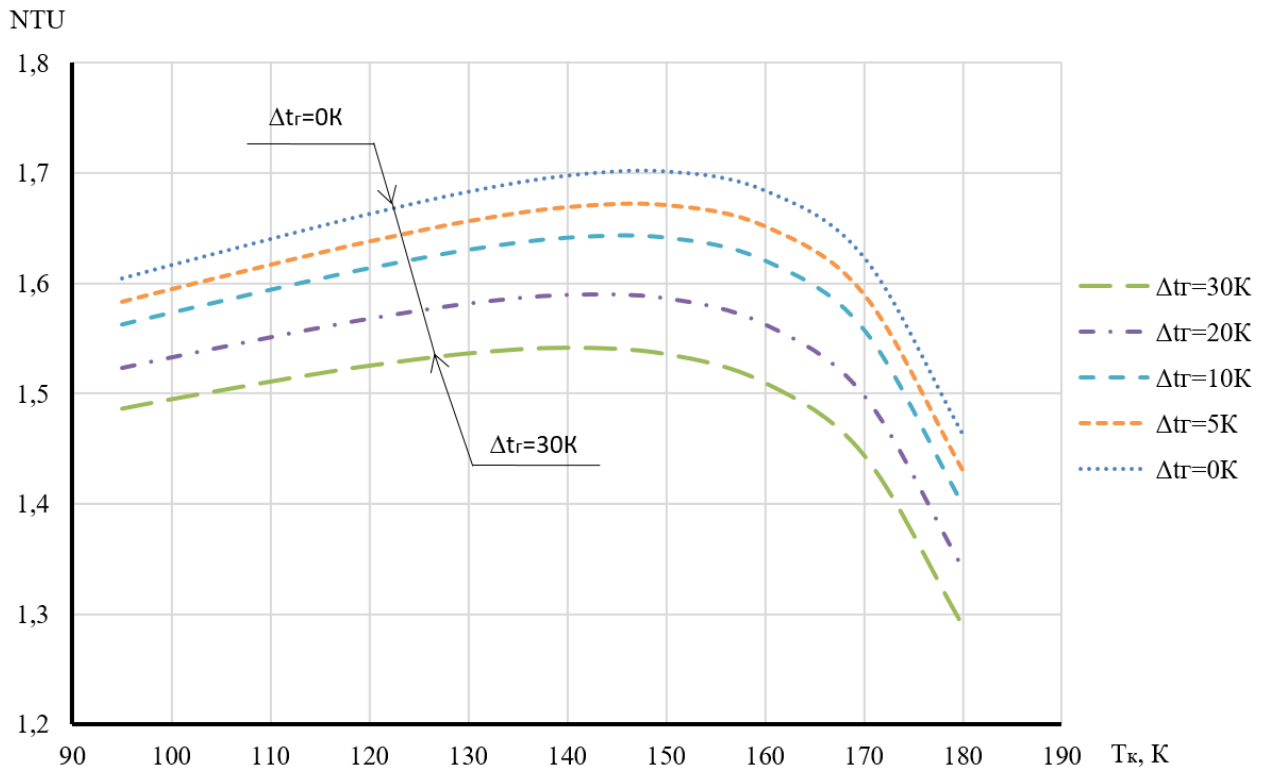


Рисунок 2.1 – Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 1 до 2 кг/с

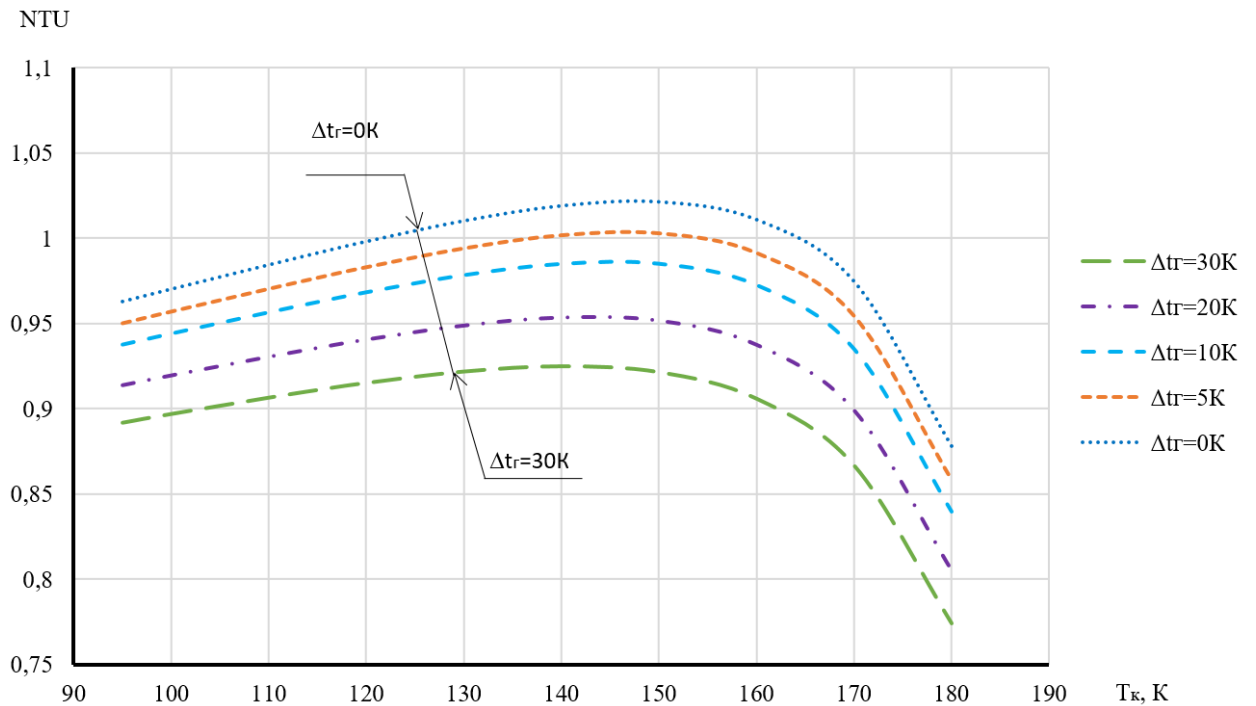


Рисунок 2.2 – Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 2 до 3 кг/с

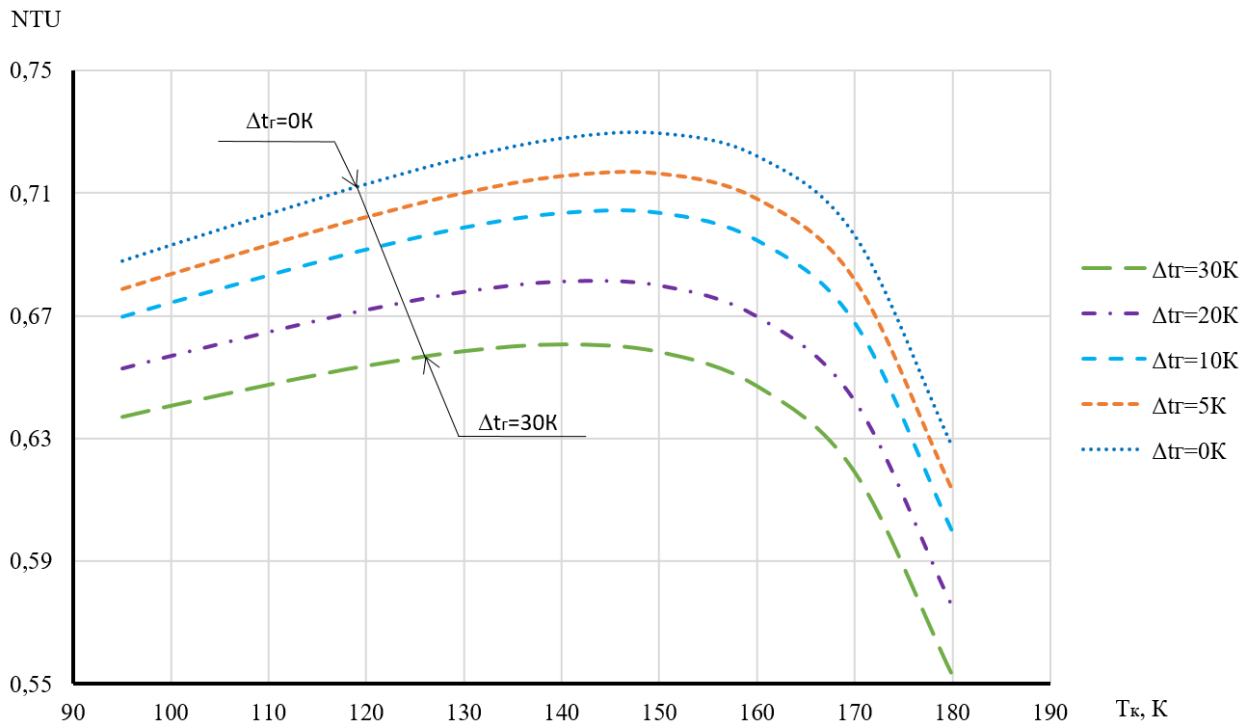


Рисунок 2.3 – Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 3 до 4 кг/с

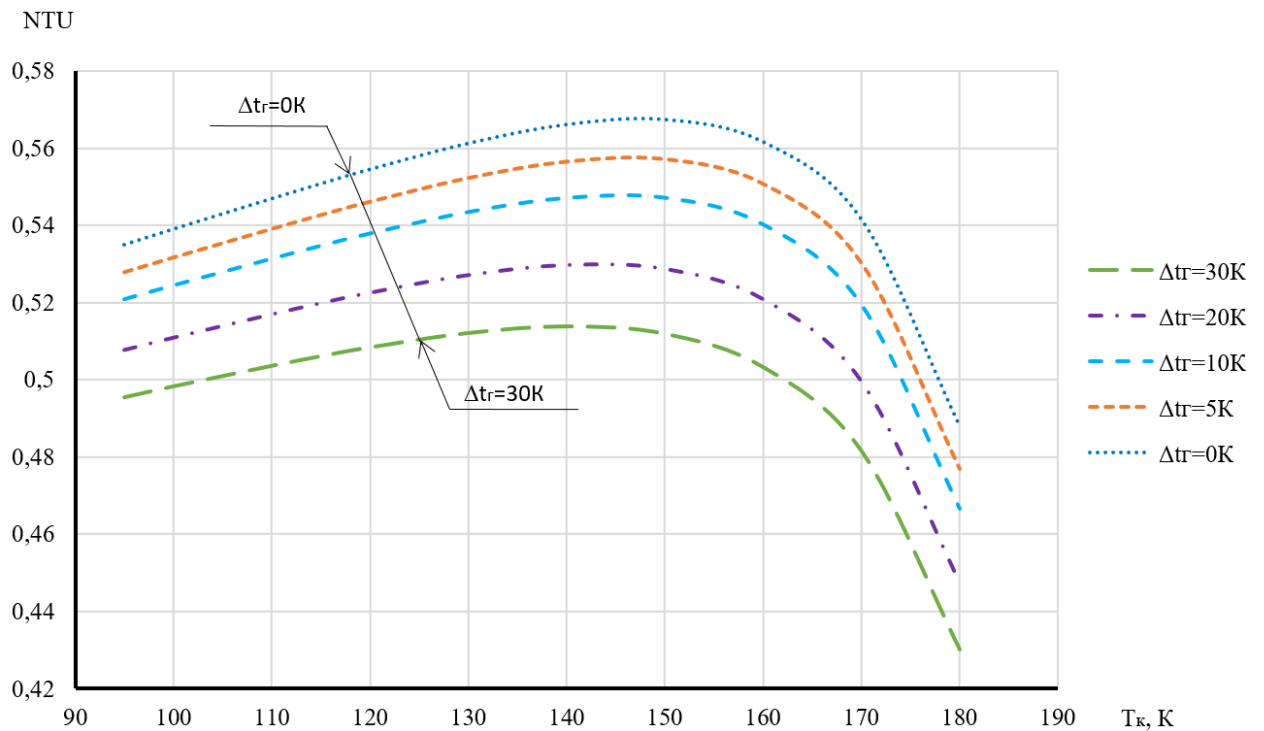


Рисунок 2.4 – Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 4 до 5 кг/с

Зависимости, представленные на рисунках 2.1 – 2.4, показывают, что с увеличением расхода рабочего тела, температурного напора  $\Delta t_r$  и низшей температуры рабочего тела уменьшается показатель NTU, из чего можно сделать вывод, что при увеличении расхода рабочего тела, температурного напора  $\Delta t_r$  и низшей температуры

рабочего тела снижается эффективность и увеличиваются массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов.

Относительная величина коэффициентов теплоёмкости (2.10) представляет собой отношение минимального коэффициента теплоёмкости и максимального коэффициента теплоёмкости. В зависимости от полученного значения относительной величины коэффициентов теплоёмкости, выбирается формула для расчёта относительной скорости теплопередачи (2.11) – (2.13).

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}. \quad (2.10)$$

$$\text{Если } C_r=0 \quad \varepsilon = 1 - \exp(-NTU); \quad (2.11)$$

$$\text{Если } C_r=1 \quad \varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}; \quad (2.12)$$

$$\text{Если } 0 < C_r < 1 \quad \varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU \cdot (1 - C_r))}{1 - C_r \cdot \exp(-NTU \cdot (1 - C_r))}. \quad (2.13)$$

Показатель влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел определяется по формуле (2.14).

$$(k_r F_r)_{\text{реал}} = \varepsilon \cdot z_G \cdot (k_r F_r)_{\text{ид}}, \quad (2.14)$$

где  $z_G$  – расходный коэффициент, зависящий от геометрических, конструктивных и расходных параметров теплообменных аппаратов.

Расходный коэффициент как функция расхода в зависимости от диапазонов значений расхода вычисляется согласно уравнениям (2.15) – (2.19).

$$\text{При расходе рабочего тела от 0 до 1 кг/с:} \quad z_G = G; \quad (2.15)$$

$$\text{при расходе рабочего тела от 1 до 2 кг/с:} \quad z_G = G; \quad (2.16)$$

$$\text{при расходе рабочего тела от 2 до 3 кг/с:} \quad z_G = G + 1; \quad (2.17)$$

$$\text{при расходе рабочего тела от 3 до 4 кг/с:} \quad z_G = G + 2,5; \quad (2.18)$$

$$\text{при расходе рабочего тела от 4 до 5 кг/с:} \quad z_G = G + 4. \quad (2.19)$$

Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при разных температурных напорах  $\Delta t_r$  для расходов рабочего тела от 1 кг/с до 5 кг/с представлены на рисунках 2.5 – 2.8.

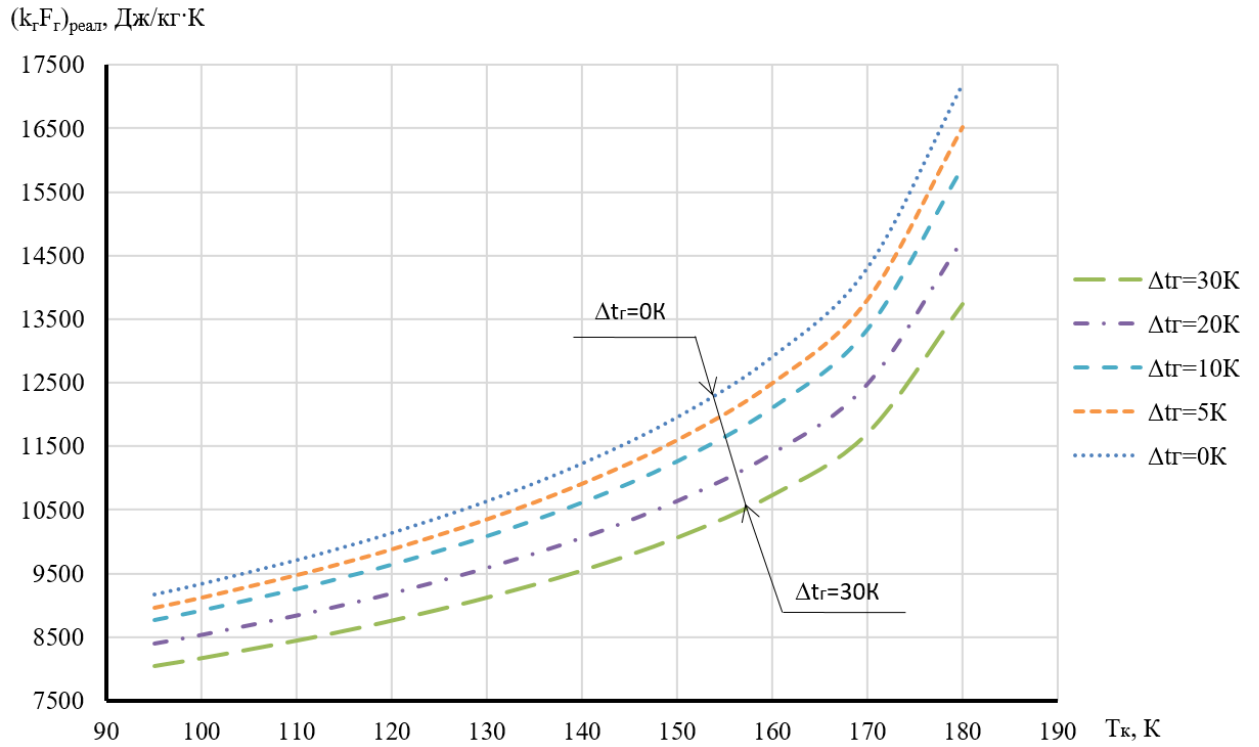


Рисунок 2.5 – Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 1 до 2 кг/с

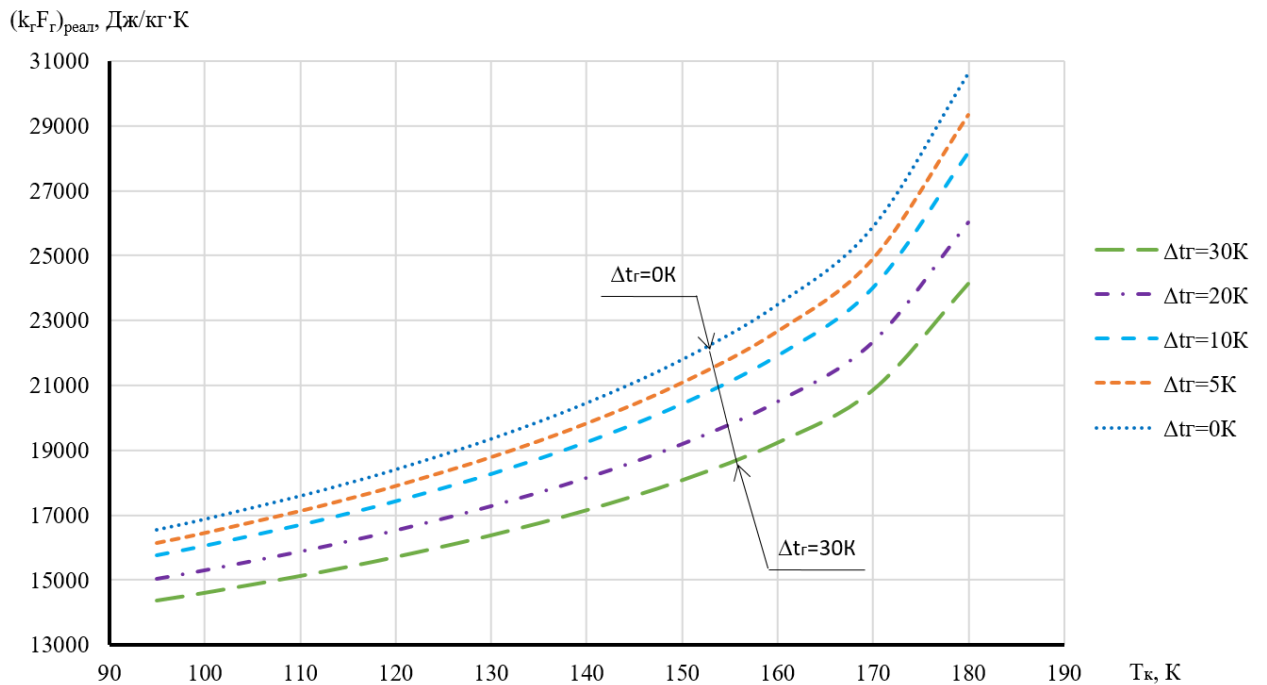


Рисунок 2.6 – Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 2 до 3 кг/с

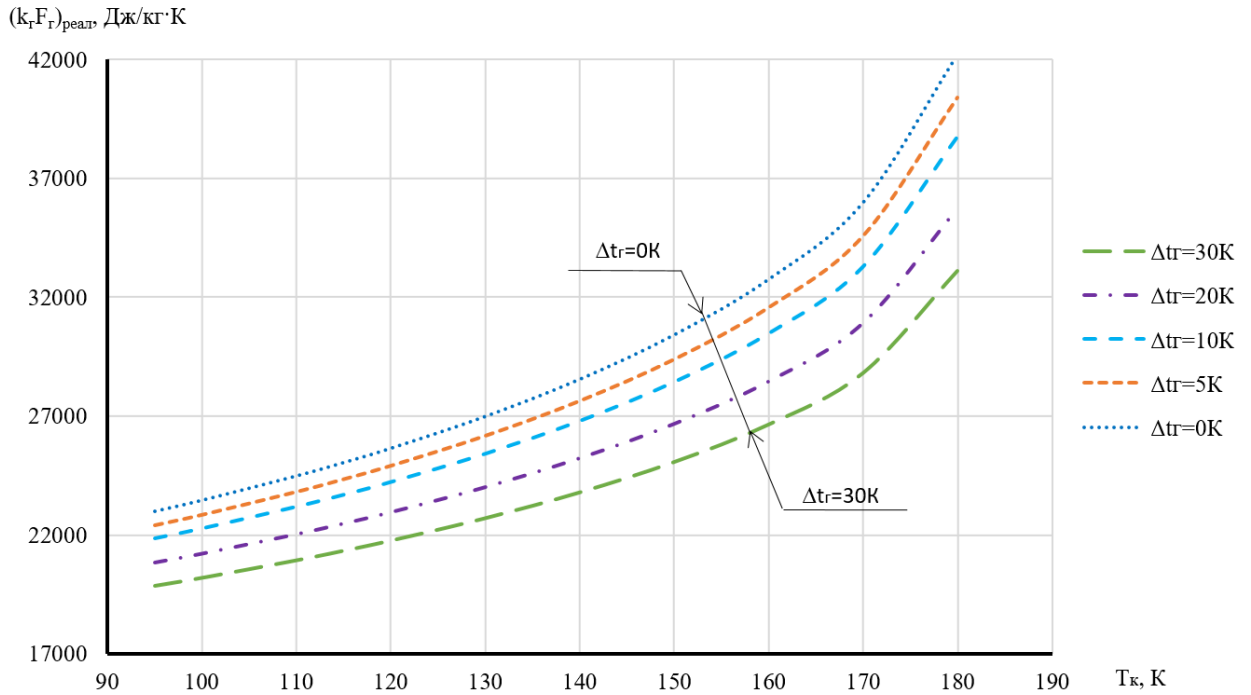


Рисунок 2.7 – Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 3 до 4 кг/с

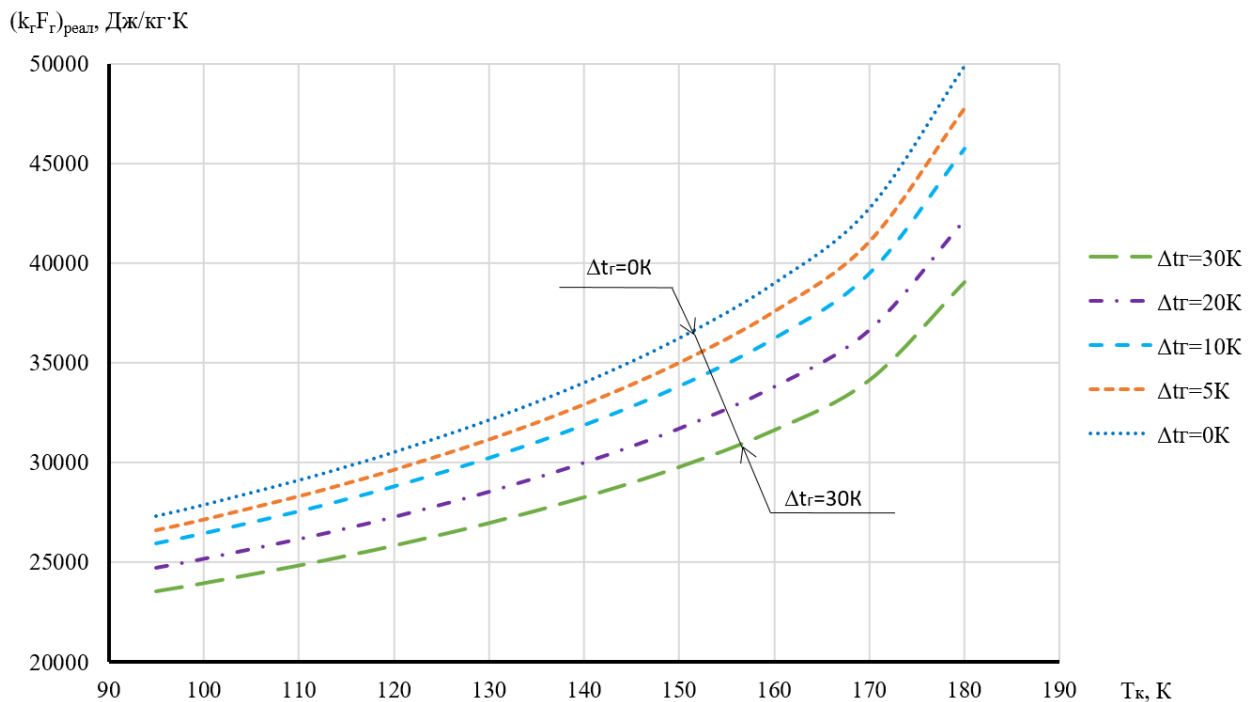


Рисунок 2.8 – Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 4 до 5 кг/с

Проводя анализ зависимостей показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах  $\Delta t_r$  от 0 до 30 К при расходах рабочего тела от 1 до 5 кг/с, отмечается

значительное увеличение показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел с увеличением низшей температуры и расхода рабочего тела, и незначительное уменьшение с увеличением температурного напора.

В ходе уточнения и расширения методики определения характеристик циклов НЭУ ЛА получена зависимость показателя  $m$  (2.2) от уровней температур источников тепла, температурных напоров, потребных поверхностей теплообмена, расхода, а также с учётом рабочих характеристик, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов.

При уровне расхода криогенного рабочего тела от 0 до 5 кг/с общая зависимость показателя степени  $m$  от температуры  $T_k$  и от температурного напора  $\Delta t_r$  будет определяться по формуле (2.20), которая получена путём уточнения зависимости показателя степени  $m$ , представленной в диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук Угланова Д.А.[3]. Уточнение зависимости показателя степени  $m$  является новизной данного диссертационного исследования.

$$m = \alpha \Delta t_r^2 + \beta \Delta t_r + \gamma + \alpha_1 T_k^2 + \beta_1 T_k \Delta t_r + \gamma_1 T_k, \quad (2.20)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  - эмпирические коэффициенты уравнения.

На рисунке 2.9 представлена трёхмерная зависимость показателя  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  при расходе  $G = 0,05$  кг/с. Изображение поверхностей значений: розовая – расчётная область значений  $m$  дискретной выборки по формуле (2.20), фиолетовая – область значений  $m$  как многопараметрическая аппроксимация программным продуктом Scilab 6.0.2., где I-II-VII-VII – линия пересечения поверхностей.

На рисунках 2.10 – 2.14 представлены трёхмерные зависимости показателя  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  при расходах  $G = 1,5$  кг/с,  $G = 2,5$  кг/с,  $G = 3,5$  кг/с и  $G = 4,5$  кг/с соответственно. Изображение поверхностей значений: розовая – расчётная область значений  $m$  дискретной выборки по формуле (2.20), фиолетовая – область значений  $m$  как многопараметрическая аппроксимация программным продуктом Scilab 6.0.2.

Линия пересечения поверхностей на рисунке 2.10 – I-III-X-XIII, на рисунке 2.11 – I-III-X-XIII, на рисунке 2.12 – I-IV-X-XIII, на рисунке 2.13 – I-IV-VIII-XI и XII-XIII-XVI-XIX – линии пересечения поверхностей, на рисунке 2.14 – I-IV-VIII-XIV.



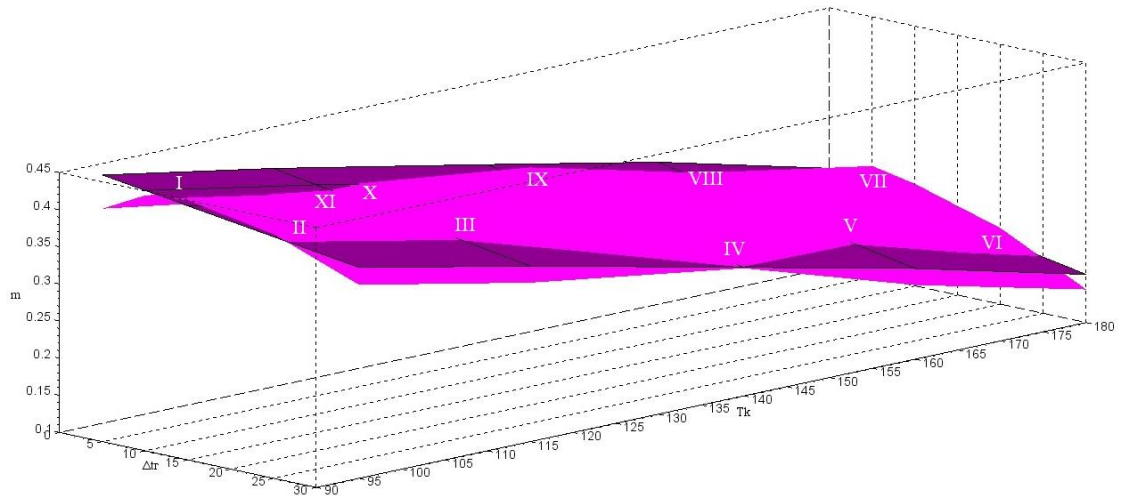


Рисунок 2.10 – Зависимость показателя степени  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  ( $G=0,05$  кг/с)

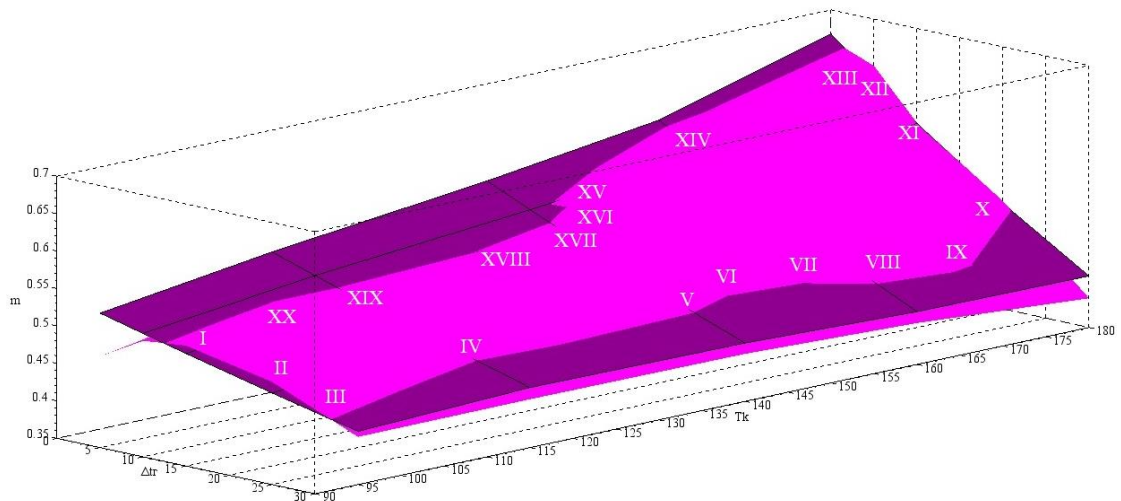


Рисунок 2.11 – Зависимость показателя степени  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  ( $G=1,5$  кг/с)

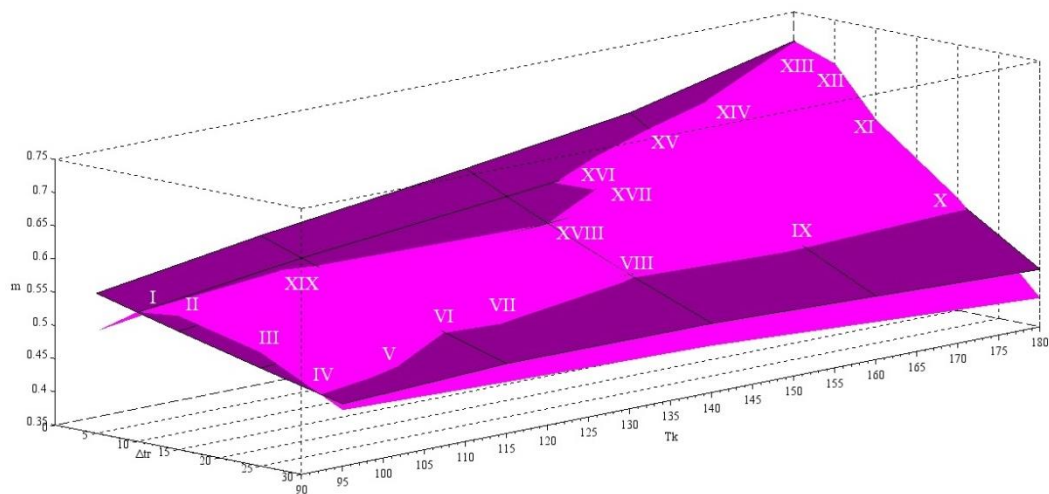


Рисунок 2.12 – Зависимость показателя степени  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  ( $G=2,5$  кг/с)

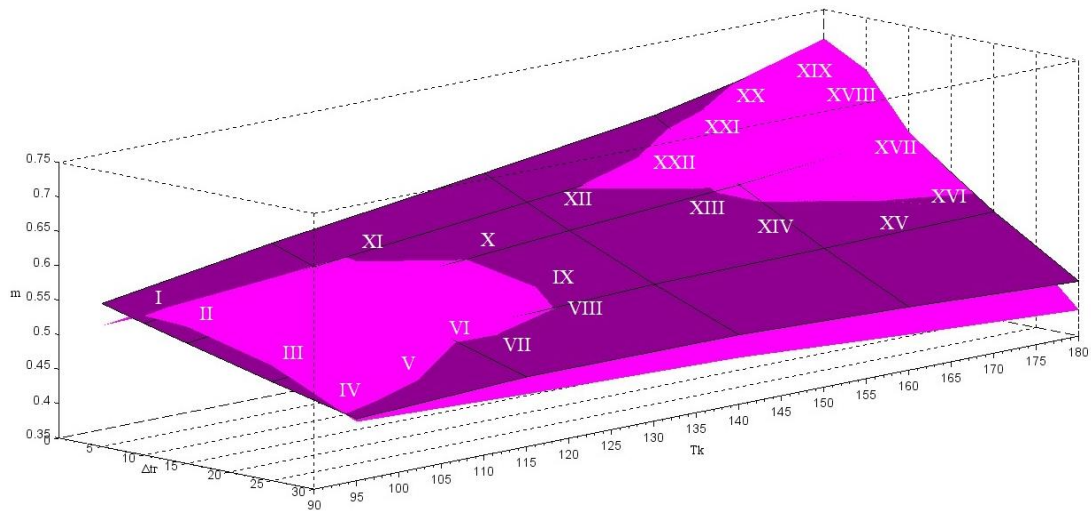


Рисунок 2.13 – Зависимость показателя степени  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  ( $G=3,5$  кг/с)

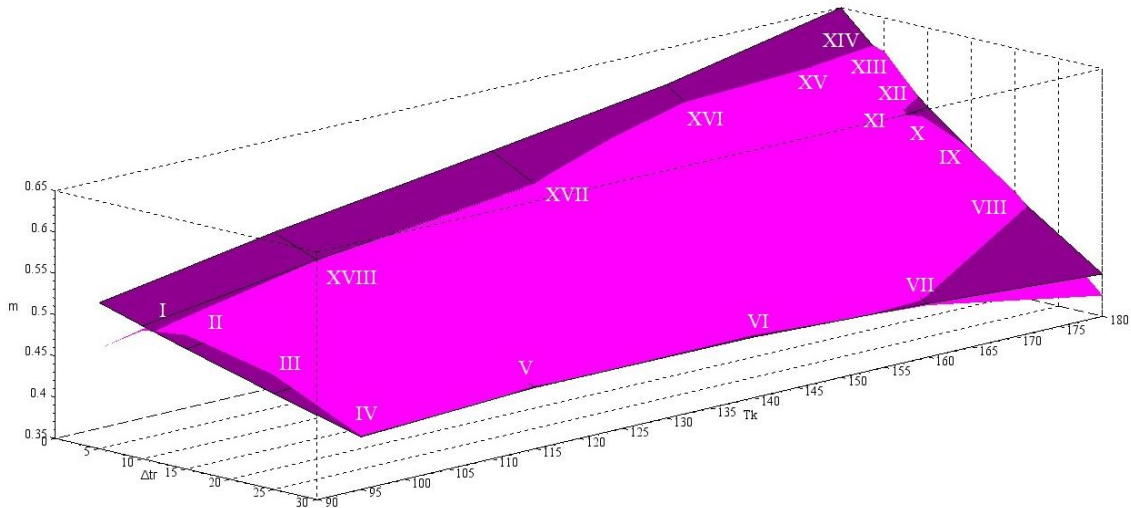


Рисунок 2.14 – Зависимость показателя степени  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  и температурного напора  $\Delta t_r$  ( $G=4,5$  кг/с)

Расхождение рассчитанных по уравнению (2.20) и уточнённых значений показателя степени  $m$  составляет не более 6 %. Уточнённые значения показателя  $m$  получены из расчётов при фиксированных значениях расхода, температур  $T_r$  и  $T_k$ , а также поверхности теплообмена. Структура формулы для расчёта  $m$  в представленном виде (2.20) применима в диапазоне указанных параметров ( $T_k$ ,  $T_r$ ,  $\Delta t_r$ ,  $\Delta t_k$ ,  $F$ ,  $G$ ). На основании проведённых расчётов получены эмпирические формулы коэффициентов уравнения (2.20) для СПГ при разных расходах (2.21) и (2.22), что позволяет определять значения показателя степени  $m$  с достаточной точностью.

Значения коэффициентов уравнений (2.21) и (2.22) для определения эмпирических коэффициентов уравнения уточнённого показателя степени  $m$  приведены в таблице 2.1.

Для значений расхода от 0 до 2 кг/с:

$$\begin{cases} \alpha = A_1 \cdot G^3 + B_1 \cdot G^2 + C_1 \cdot G + D_1; \\ \beta = A_2 \cdot G^3 + B_2 \cdot G^2 + C_2 \cdot G + D_2; \\ \gamma = A_3 \cdot G^3 + B_3 \cdot G^2 + C_3 \cdot G + D_3; \\ \alpha_1 = A_4 \cdot G^4 + B_4 \cdot G^3 + C_4 \cdot G^2 + D_4 \cdot G + E_4; \\ \beta_1 = A_5 \cdot G^4 + B_5 \cdot G^3 + C_5 \cdot G^2 + D_5 \cdot G + E_5; \\ \gamma_1 = A_6 \cdot G^4 + B_6 \cdot G^3 + C_6 \cdot G^2 + D_6 \cdot G + E_6. \end{cases} \quad (2.21)$$

Для значений расхода от 2 до 5 кг/с:

$$\begin{cases} \alpha = A_1 \cdot G^3 + B_1 \cdot G^2 + C_1 \cdot G + D_1; \\ \beta = A_2 \cdot G^3 + B_2 \cdot G^2 + C_2 \cdot G + D_2; \\ \gamma = A_3 \cdot G^3 + B_3 \cdot G^2 + C_3 \cdot G + D_3; \\ \alpha_1 = A_4 \cdot G^3 + B_4 \cdot G^2 + C_4 \cdot G + D_4; \\ \beta_1 = A_5 \cdot G^3 + B_5 \cdot G^2 + C_5 \cdot G + D_5; \\ \gamma_1 = A_6 \cdot G^3 + B_6 \cdot G^2 + C_6 \cdot G + D_6. \end{cases} \quad (2.22)$$

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов уравнений (2.21) и (2.22) для определения эмпирических коэффициентов уравнения уточнённого показателя степени  $m$

G	от 0 до 1 кг/с	от 1 до 2 кг/с	от 2 до 3 кг/с	от 3 до 4 кг/с	от 4 до 5 кг/с
A <sub>1</sub>	0,0004671	0,0007824	0,0005680	-0,0006117	-0,0024992
A <sub>2</sub>	-0,0305470	-0,0394267	0,0540021	0,0627685	0,1857077
A <sub>3</sub>	0,0004671	0,3811720	-3,1058603	0,4033157	2,4096005
A <sub>4</sub>	-0,0000803	0,0000507	-0,0001232	0,0000656	0,0002496
A <sub>5</sub>	-0,0018194	-0,0003925	-0,0005008	-0,0002651	-0,0008432
A <sub>6</sub>	-0,0000803	-0,0106832	0,0403723	-0,0137248	-0,0540464
B <sub>1</sub>	-0,0013516	-0,0034619	-0,0044480	0,0067400	0,0345272
B <sub>2</sub>	0,0573950	0,1802793	-0,4244004	-0,6753368	-2,5510224
B <sub>3</sub>	-0,0013516	-1,7034935	24,1905184	-4,2073012	-33,0843844
B <sub>4</sub>	0,0002347	-0,0003032	0,0009564	-0,0006980	-0,0034328
B <sub>5</sub>	0,0028566	0,0024656	0,0039188	0,0028088	0,0115436
B <sub>6</sub>	0,0002347	0,0620296	-0,3137116	0,1461044	0,7428984
C <sub>1</sub>	0,0009945	0,0050121	0,0114945	-0,0246190	-0,1586458
C <sub>2</sub>	-0,0335510	-0,2729478	1,1052446	2,4085594	11,6534053
C <sub>3</sub>	0,0009945	2,4382133	-62,3509948	14,8059727	151,1146991

Продолжение таблицы 2.1

C <sub>4</sub>	-0,0002815	0,0006712	-0,0024510	0,0024812	0,0157086
C <sub>5</sub>	-0,0012498	-0,0057199	-0,0101528	-0,0098596	-0,0525548
C <sub>6</sub>	-0,0002815	-0,1326383	0,8053266	-0,5208007	-3,3977431
D <sub>1</sub>	-0,0002158	-0,0023855	-0,0098105	0,0297486	0,2424088
D <sub>2</sub>	0,0058695	0,1447799	-0,9456302	-2,8390952	-17,6958229
D <sub>3</sub>	-0,0002208	-1,1402211	53,1400100	-17,5884589	-229,6668629
D <sub>4</sub>	0,0001484	-0,0006511	0,0020551	-0,0029633	-0,0239354
D <sub>5</sub>	0,0002401	0,0058172	0,0086619	0,0114281	0,0795323
D <sub>6</sub>	0,0001484	0,1237241	-0,6782257	0,6257260	5,1753759
E <sub>4</sub>	-0,0000212	0,0002173	-	-	-
E <sub>5</sub>	-0,0000209	-0,0022370	-	-	-
E <sub>6</sub>	0,0000262	-0,0382725	-	-	-

Применение формулы (2.2) с учётом значения уточнённого многопараметрического показателя степени  $m$  и коэффициентов, определяемых по полученным эмпирическим формулам, позволяет с более высокой точностью определять КПД НЭУ ЛА, в которых используется НЭ криопродукта.

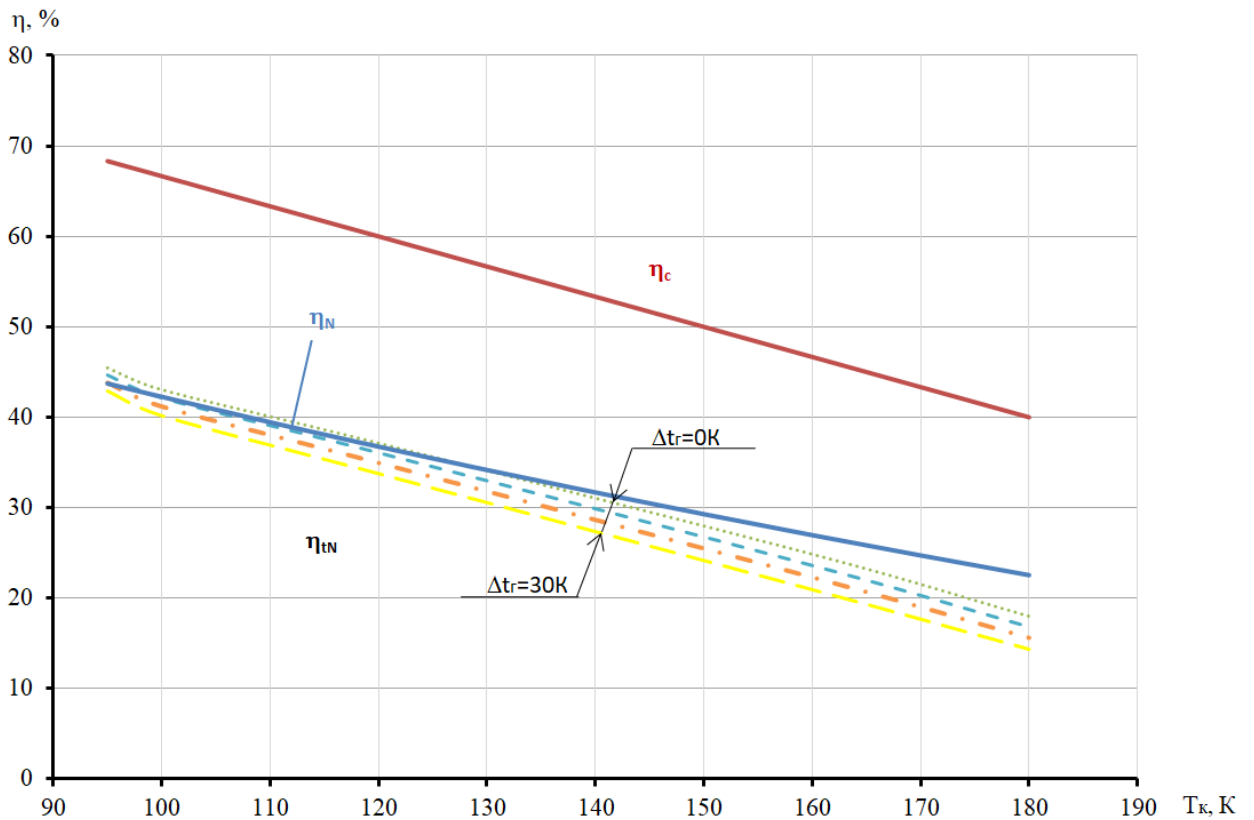


Рисунок 2.15 – Зависимости КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  –  $\eta_{iN}$ , КПД Карзона-Новикова –  $\eta_N$ , КПД Карно –  $\eta_c$  от температуры криопродукта  $T_k$  при  $\Delta t_k = 0K$ ,  $\Delta t_r = 0; 5; 10; 20; 30K$  и расходе рабочего тела от 0 до 1 кг/с

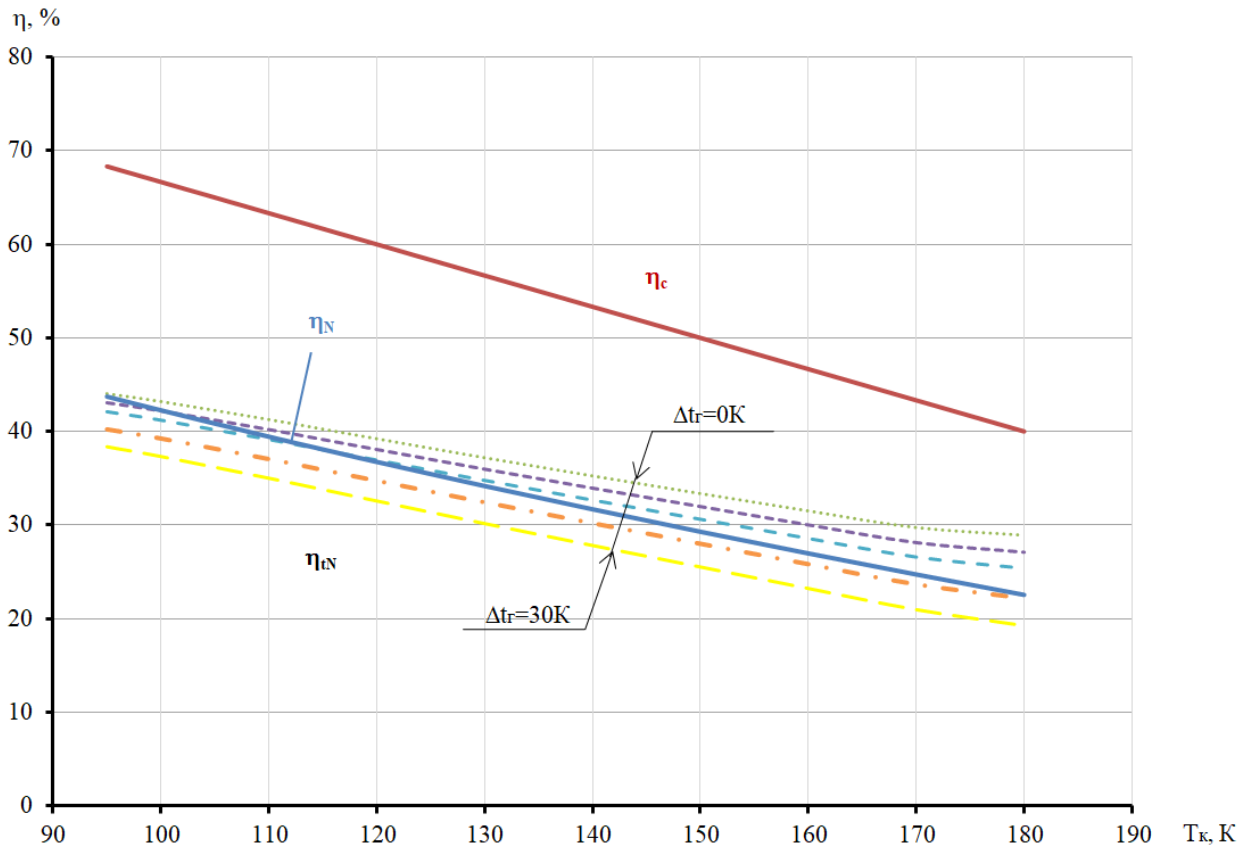


Рисунок 2.16 – Зависимости КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  –  $\eta_{иN}$ , КПД Карзона-Новикова –  $\eta_N$ , КПД Карно –  $\eta_c$  от температуры криопродукта  $T_k$  при  $\Delta t_k=0K$ ,  $\Delta t_r=0; 5; 10; 20; 30K$  и расходе рабочего тела от 1 до 2 кг/с

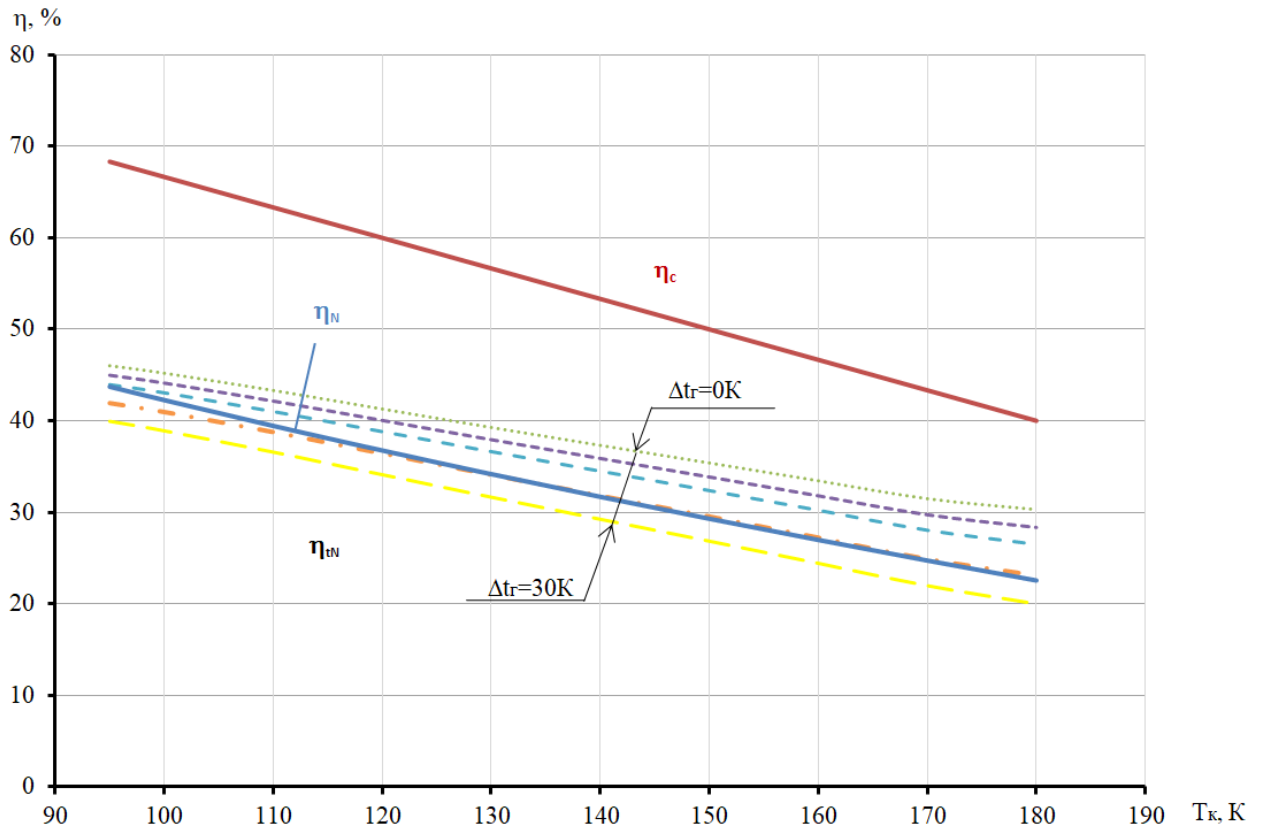


Рисунок 2.17 – Зависимости КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  –  $\eta_{иN}$ , КПД Карзона-Новикова –  $\eta_N$ , КПД Карно –  $\eta_c$  от температуры криопродукта  $T_k$  при  $\Delta t_k=0K$ ,  $\Delta t_r=0; 5; 10; 20; 30K$  и расходе рабочего тела от 2 до 3 кг/с

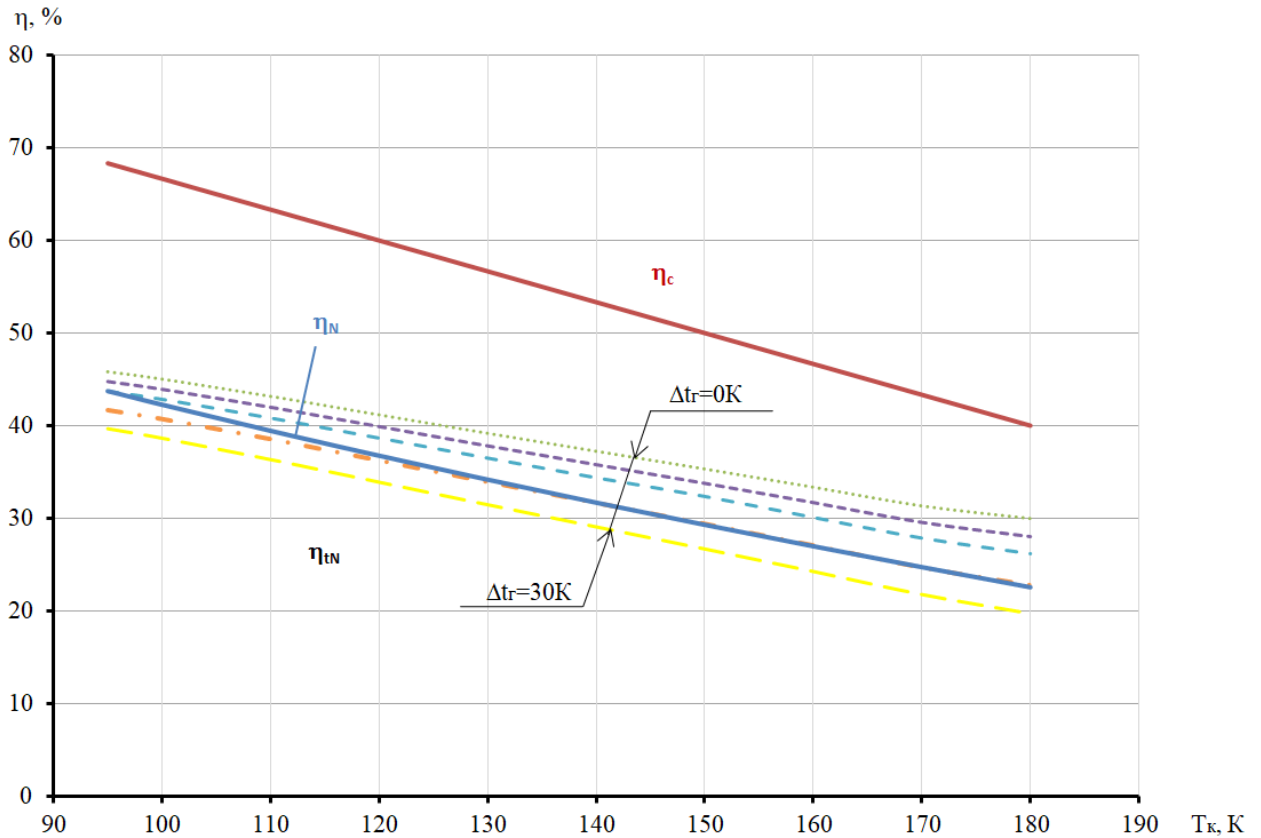


Рисунок 2.18 – Зависимости КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  –  $\eta_{tN}$ , КПД Карзона-Новикова –  $\eta_N$ , КПД Карно –  $\eta_c$  от температуры криопродукта  $T_k$  при  $\Delta t_k=0K$ ,  $\Delta t_r=0; 5; 10; 20; 30K$  и расходе рабочего тела от 3 до 4 кг/с

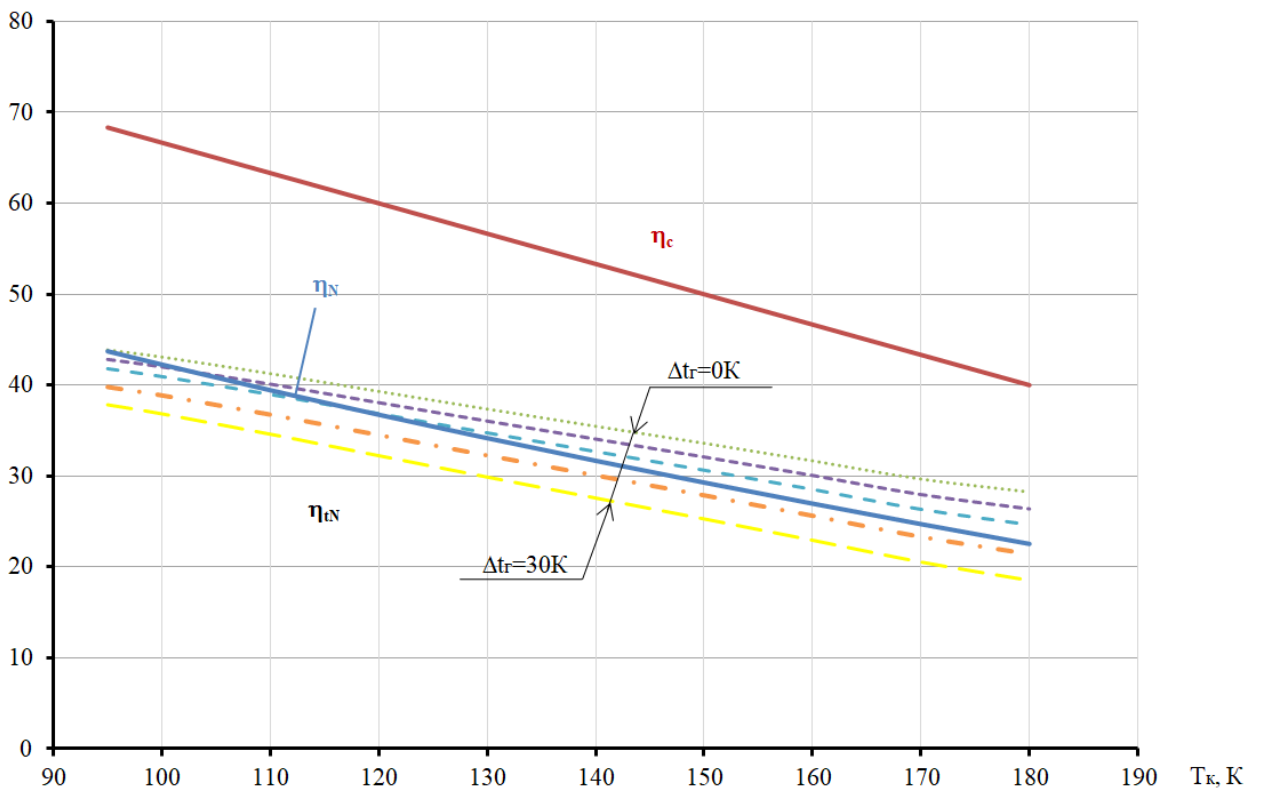


Рисунок 2.19 – Зависимости КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  –  $\eta_{tN}$ , КПД Карзона-Новикова –  $\eta_N$ , КПД Карно –  $\eta_c$  от температуры криопродукта  $T_k$  при  $\Delta t_k=0K$ ,  $\Delta t_r=0; 5; 10; 20; 30K$  и расходе рабочего тела от 4 до 5 кг/с

На рисунках 2.15 – 2.19 представлено отклонение значений КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  от КПД Карзона-Новикова при различных температурных напорах в диапазоне от 0 до 30 К.

Уточнённая логистическая схема расчёта показателя степени  $m$  (укрупнённый алгоритм) представлена на рисунке 2.20. Важно также подчеркнуть, что представленная здесь теория и методика расчёта применима не только для цикла Ренкина, но и для любого другого цикла.

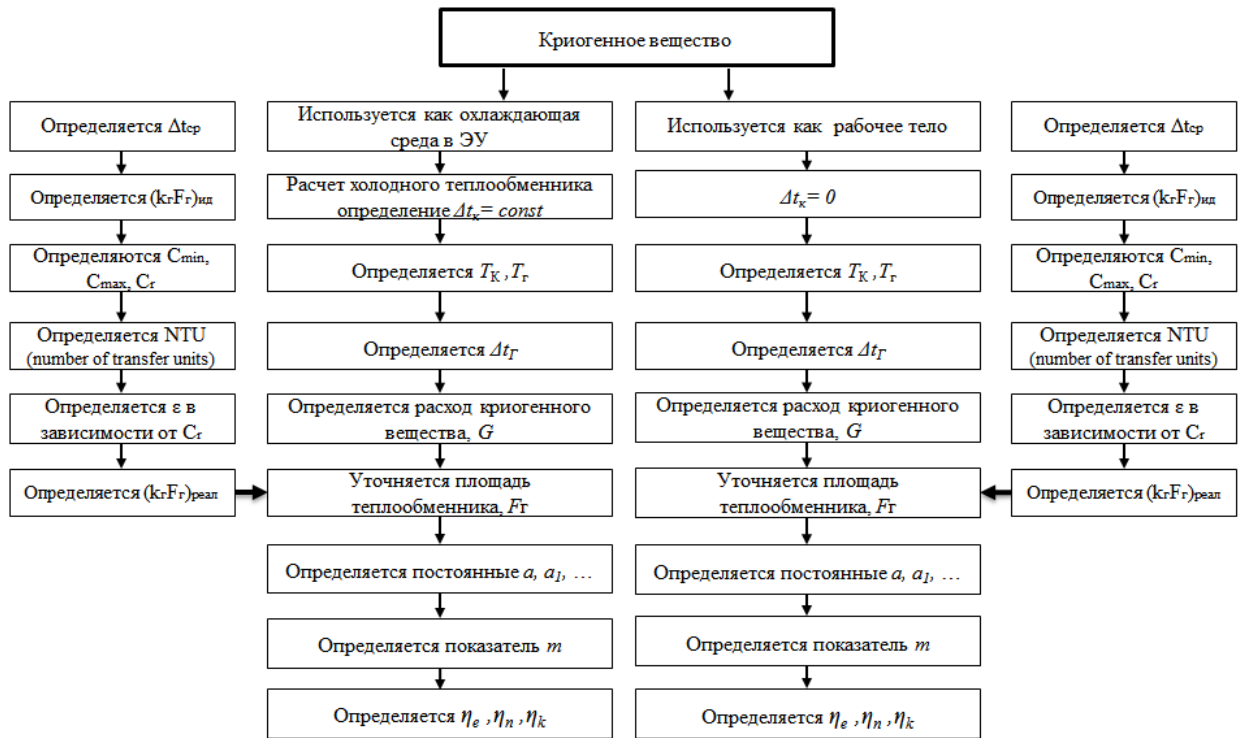


Рисунок 2.20 – Уточнённая методика расчёта показателя  $m$

Математическая модель зависимости уточнённого показателя степени  $m$  от температуры криопродукта  $T_k$  при  $\Delta t_k=0\text{K}$ ,  $\Delta t_r=0; 5; 10; 20; 30\text{K}$  при расходе рабочего тела от 0 до 5 кг/с получена в результате обработки данных и численного моделирования на основе программного продукта Scilab 6.0.2.

Определение уточнённого многопараметрического показателя степени  $m$  с учётом принятых уточнений осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 2.21 или с использованием программы, написанной в ходе подготовки диссертационной работы с использованием языка программирования Python [62].

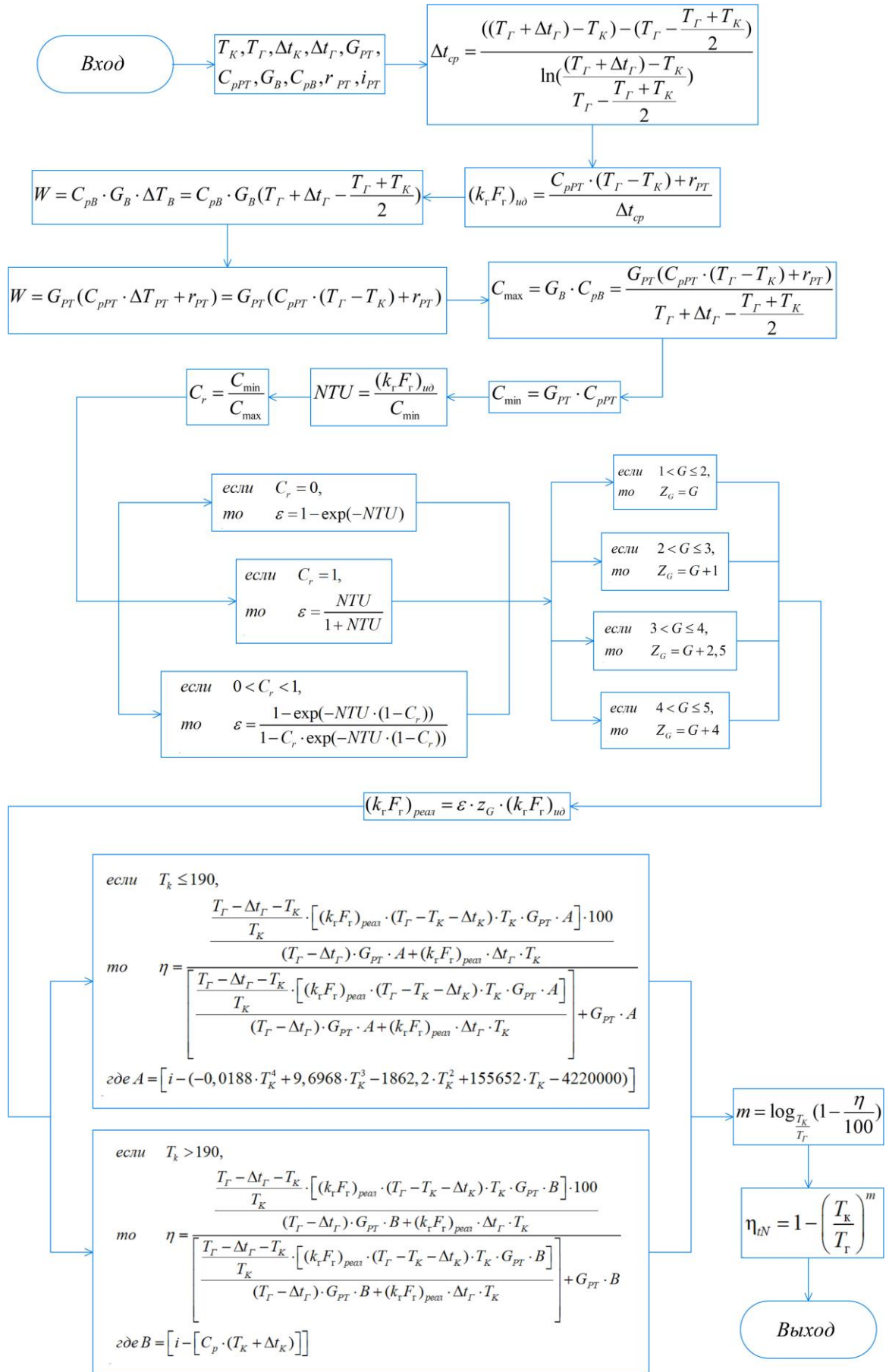


Рисунок 2.21 – Алгоритм для определения многопараметрического показателя m с учётом принятых уточнений



### 2.3 Основные результаты и выводы по главе 2

1. В случае применения криогенной жидкости одновременно в качестве рабочего тела и низкопотенциального источника (стока) теплоты требуются уточнение оценки эффективности циклов. Уточнена и расширена методика определения характеристик цикла НЭУ ЛА при расходе рабочего тела в диапазоне от 0 до 5 кг/с.

2. Применение расширенной и уточнённой методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА позволяет проводить качественную и количественную оценку эффективности производства энергии.

3. Повышена точность проектировочных расчётов НЭУ ЛА путём введения в рассмотрение совокупности параметров, а также разработки алгоритма расчёта с учётом структуры и особенностей НЭУ ЛА. Применение предлагаемой методики позволяет повысить точность определения КПД на величину от 2 до 20 %.

4. Уточнённая и расширенная методика определения характеристик цикла НЭУ ЛА с использованием НЭ криопродукта применима для любых энергопроизводящих систем и установок.

5. Использование НЭ криопродукта (СПГ) является перспективным направлением развития идей когенерации и тригенерации в НЭУ ЛА.

### 3 Уточнённая общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА

В данной главе представлена разработка уточнённой общей методики комплексного проектирования НЭУ ЛА с учётом особенностей утилизации НЭ криопродукта.

В настоящее время для большинства НЭУ с использованием СПГ в качестве топлива характерна безвозвратная потеря НЭ СПГ. Поэтому, с учётом существенного низкотемпературного потенциала СПГ, актуально создание систем когенерации и тригенерации для комплексного производства теплоты, электрической энергии и холода с утилизацией НЭ СПГ.

Основной областью применения НЭ СПГ в установках когенерации и тригенерации (в том числе на базе тепловых двигателей) является получение электроэнергии. Технологии когенерации и тригенерации непрерывно совершенствуются для повышения термодинамической эффективности, в основном применением новых схемотехнических решений и выбора параметров рабочих циклов.

Выбор наиболее подходящих для проведения расчётного анализа показателей эффективности когенерационной или тригенерационной ЭУ зависит от назначения установки, видов потребляемой энергии (или ресурса), а также видов энергии, производимой и используемой в установке.

Использование НЭ криопродукта (например, СПГ) является относительно новым направлением в когенерации, поэтому разработка подходов и методик для оценки эффективности таких ЭУ является актуальной задачей.

Уточнённая общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА включает этапы от выбора криопродукта и оценки его энергетического потенциала (предпроектный этап – I этап) до определения параметрических характеристик (технико-экономическое обоснование проекта – II этап) и проведения многопараметрического выбора НЭУ ЛА (разработка проектной документации – III этап).

#### 3.1 Расчёт основных параметров уточнённой общей методики комплексного проектирования НЭУ

В данном разделе предлагается алгоритм расчёта основных параметров уточнённой

общей методики комплексного проектирования НЭУ с подводом теплоты от газотурбинной установки (ГТУ) [64].

- 1) Общий тепловой КПД НЭУ вычисляется по формуле (3.1).

$$\eta_{НЭУ} = \frac{W_{ГТУ} + \sum_{i=1}^n W_i}{G_{СПГ} \cdot H_u}, \quad (3.1)$$

где  $W_i$  – полезная мощность, вырабатываемая  $i$ -ым контуром пристроенных ЭУ соответственно, кВт;

$W_{ГТУ}$  – полезная мощность газотурбинной установки, кВт;

$G_{СПГ}$  – расход СПГ, кг/с;

$H_u$  – теплотворная способность топлива, кДж/кг.

- 2) Тепловой КПД НЭУ можно выразить через тепловые КПД контуров [55, 63]:

Для двухконтурных последовательных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{II} + \eta_I \cdot \sigma_{II}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для двухконтурных последовательных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{II} + \frac{\eta_I \cdot \sigma_{II}}{\theta_I}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для двухконтурных параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_I + \eta_{II} + \eta_{ГТУ} (1 - \eta_I - \eta_{II})) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для двухконтурных параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\frac{\eta_I}{\theta_I} + \eta_{II} + \eta_{ГТУ} (1 - \frac{\eta_I}{\theta_I} - \eta_{II})) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для трёхконтурных последовательных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{III} + \eta_I \cdot \sigma_{II} + \eta_{II} \cdot \sigma_{III}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для трёхконтурных последовательных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{III} + \frac{\eta_I \cdot \sigma_{II}}{\theta_I} + \eta_{II} \cdot \sigma_{III}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_I \cdot \sigma_{II} + \eta_{II} + \eta_{III}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \frac{\eta_I \cdot \sigma_{II}}{\theta_I} + \eta_{II} + \eta_{III}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для трёхконтурных параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_I \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_I + \eta_{II} + \eta_{III}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для трёхконтурных параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \frac{\eta_I \cdot \eta_{ГТУ}}{\theta_I} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \frac{\eta_I}{\theta_I} + \eta_{II} + \eta_{III}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных последовательных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{IV} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{IV} + \eta_{III} \cdot \sigma_{IV} + \eta_{II} \cdot \sigma_{III} + \eta_I \cdot \sigma_{II}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных последовательных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{IV} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{IV} + \eta_{III} \cdot \sigma_{IV} + \eta_{II} \cdot \sigma_{III} + \frac{\eta_I \cdot \sigma_{II}}{\theta_I}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит три последовательных и один параллельный контур, а также I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{IV} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{IV} + \eta_{III} + \eta_{II} \cdot \sigma_{III} + \eta_I \cdot \sigma_{II}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит три последовательных и один параллельный контур, а также I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{IV} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{IV} + \eta_{III} + \eta_{II} \cdot \sigma_{III} + \frac{\eta_I \cdot \sigma_{II}}{\theta_I}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит два последовательных и два параллельных контура, а также I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{IV} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{IV} + \eta_{III} + \eta_{II} + \eta_I \cdot \sigma_{II}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит два последовательных и два параллельных контура, а также I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{IV} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{III} \cdot \eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{IV} + \eta_{III} + \eta_{II} + \frac{\eta_I \cdot \sigma_{II}}{\theta_i}) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Ренкина:

$$\eta_{i\Sigma} = (\eta_I + \eta_{II} + \eta_{III} + \eta_{IV} - \eta_{ГТУ}(\eta_I + \eta_{II} + \eta_{III} + \eta_{IV} - 1)) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon}.$$

Для четырёхконтурных параллельных НЭУ, в состав которых входит I контур, работающий по циклу Брайтона:

$$\eta_{i\Sigma} = (\frac{\eta_I}{\theta_i} + \eta_{II} + \eta_{III} + \eta_{IV} - \eta_{ГТУ}(\frac{\eta_I}{\theta_i} + \eta_{II} + \eta_{III} + \eta_{IV} - 1)) \cdot \bar{\eta}_T \cdot \bar{\varepsilon},$$

где  $\eta_i$  – термический КПД соответствующего контура;

$\eta_{ГТУ}$  – термический КПД газотурбинной установки;

$\theta_i$  – коэффициент использования располагаемого тепла при его подводе-отводе из одного контура в другой;

$\sigma_i$  – относительная доля вторичного тепла ГТУ, отводимая от цикла в i-ом контуре;

$\bar{\eta}_T$  – осредненный КПД турбин контуров, входящих в НЭУ;

$\bar{\varepsilon}$  – КПД теплообменников контуров, входящих в НЭУ.

Здесь особенностью является то обстоятельство, что при подводе теплоты от высшего контура к низшему и выполнении условия  $Q_{1i} \geq Q_{2(i+1)}$  весьма затруднительно обеспечить оптимизацию контуров по условию равенства  $Q_{1i} = Q_{2(i+1)}$ . Поэтому в (i+1)-х контурах отвода теплоты предусматриваются дополнительные теплообменные аппараты отвода излишек Q.

3) Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ определяется по формуле (3.2).

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_{ГТУ}}. \quad (3.2)$$

4) Отношение температур для каждого контура – по формуле (3.3).

$$\tau_i = \frac{T_{zi}}{T_{ki}}, \quad (3.3)$$

где  $T_{zi}$  – высшая температура рабочего тела, К;

$T_{ki}$  – низшая температура рабочего тела, К.

5) Удельная работа НЭУ, приходящаяся на 1 кг криопродукта вычисляется по формуле (3.4).

$$q_{СПГ} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{G_{СПГ}}. \quad (3.4)$$

6) Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта для каждого контура определяется по формуле (3.5).

$$K_{\text{вИД}i} = \frac{W_i}{G_{СПГ} \cdot 3600 \cdot W_{\text{ожИД}}}, \quad (3.5)$$

где  $W_i$  – полезная мощность  $i$ -го контура, кВт;

$W_{\text{ожИД}}$  – значение энергии, затрачиваемой на сжижение газов по идеальному циклу, кВт·ч /кг (для СПГ –  $W_{\text{ожИД}} = 0,307$  кВт·ч /кг [3]).

7) Коэффициент возврата НЭ криопродукта для каждого контура с учётом предполагаемых потерь – по формуле (3.6).

$$K_{\text{в}i} = \frac{W_i}{G_{СПГ} \cdot 3600 \cdot W_{\text{ож}}}, \quad (3.6)$$

где  $W_{\text{ож}}$  – осреднённое реальное значение затраченной на сжижение криопродукта энергии, кВт·ч /кг (для СПГ –  $W_{\text{ож}} = 0,6 \dots 1,2$  кВт·ч /кг [3]).

8) КПД Карно для каждого контура определяется по формуле (3.7).

$$\eta_{ci} = \frac{T_{zi} - T_{ki}}{T_{zi}} = 1 - \frac{1}{\tau_i}. \quad (3.7)$$

9) Тепловой КПД для каждого контура вычисляется по формуле (3.8).

$$\eta_{ti} = 1 - \frac{Q_{2i}}{Q_{1i}}, \quad (3.8)$$

где  $Q_{1i}$  – подведённая тепловая мощность в  $i$ -ый контур, кВт;

$Q_{2i}$  – тепловая мощность, отводимая от  $i$ -ого контура, кВт.

10) КПД Карзона-Новикова [57] для каждого контура – по формуле (3.9).

$$\eta_{Ni} = 1 - \sqrt{\frac{T_{ki}}{T_{zi}}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{\tau_i}}. \quad (3.9)$$

11) Эксергетический КПД для каждого контура вычисляется по формуле (3.10).

$$\eta_{\text{ex}i} = \frac{\eta_{ti}}{\eta_{ci}}. \quad (3.10)$$

12) Суммарная мощность на выходе НЭУ – по формуле (3.11).

$$W_{\Sigma} = W_{ГТ\У} + \sum_{i=1}^n W_i. \quad (3.11)$$

13) КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$   $i$ -го контура с учётом теплофизических свойств рабочего тела, температурных уровней, температурных напоров, расходов, с учётом требуемых площадей поверхностей теплообмена определяется формулой (3.12).

$$\eta_{iNi} = 1 - \left( \frac{T_k}{T_2} \right)^m, \quad (3.12)$$

где  $m = f(T_k, T_r, \Delta t_r, \Delta t_k, F, G)$ .

Зависимость (3.13) получена в главе 2 в результате обработки данных и численного моделирования на основе программного продукта Scilab 6.0.2.

14) Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом располагаемой только от фазового перехода вычисляется по формуле (3.13).

$$\omega_{СПГ} = \frac{W_I + W_{II}}{G_{СПГ} \cdot r_{СПГ}}, \quad (3.13)$$

где  $r_{СПГ}$  – удельная теплота парообразования СПГ, кДж/кг.

15) Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе – по формуле (3.14).

$$\omega = \frac{W_I + W_{II}}{G_{СПГ} \cdot (r_{СПГ} + C_{pСПГ} \cdot \Delta t_{СПГ}) + G_{ГТ\У i} \cdot (i_{ГТ\У 2} - i_{ГТ\У 1})}, \quad (3.14)$$

где  $C_{pСПГ}$  – изобарная теплоёмкость СПГ, кДж/кг·К;

$\Delta t_{СПГ}$  – перегрев СПГ после испарения, К.

16) Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно вычисляется по формуле (3.15).

$$K_i = \frac{W_i}{W_{ki}}, \quad (3.15)$$

где  $W_{ki}$  – располагаемая мощность по циклу Карно, кВт:

$$W_{ki} = l_{ki} \cdot G_{СПГ}, \quad (3.16)$$

где  $l_{ki}$  – располагаемая работа по циклу Карно, кДж/кг:

$$l_{ki} = q_{2i} \frac{\eta_{ci}}{1 - \eta_{ci}}, \quad (3.17)$$

где  $q_{2i}$  – отведенная теплота от  $i$ -ого контура, кДж/кг.

17) Удельная мощность  $i$ -ого контура на 1 кг СПГ – по формуле (3.18).

$$W_{ydi} = \frac{W_i}{m_{СПГ}} = \frac{W_i}{G_{СПГ} \cdot t}, \quad (3.18)$$

где  $m_{СПГ}$  – масса СПГ, кг;  
 $t$  – время работы НЭУ, с.

### 3.2 Разработка схем НЭУ с учётом их состава, рабочих тел и температурных уровней

На основании классификации, представленной в разделе 1.2, были разработаны схемы НЭУ, представленные на рисунках 3.1 – 3.10. С учётом того, что уровень температур криопродукта весьма низок, в зависимости от температурных уровней источников тепла НЭУ ЛА объективно могут быть как одноконтурными (рисунок 3.1), так и многоконтурными (рисунок 3.2 – 3.10), что предполагает использование, как различных циклов, так и самих рабочих тел. По типу распределения подводимой тепловой энергии в многоконтурных НЭУ они могут быть последовательными (рисунок 3.2, 3.4, 3.7), параллельными (рисунок 3.3, 3.6, 3.8) и последовательно-параллельными (рисунок 3.5, 3.9, 3.10). На схемах рисунков 3.1 – 3.10 указаны следующие их элементы: СХК – система хранения криопродукта; УПД – устройство повышения давления; СРК – система регазификации криопродукта; РМ – расширительная машина; ЭГ – электрогенератор; ГТУ – газотурбинный двигатель.

В качестве основной ЭУ выбрана газотурбинная установка (ГТУ) на основе двигателя CFM leap-1A, подробное описание которой представлено в разделе 3.3.

На схемах показано, что целесообразно использовать как ЦР, так и ЦБ и другие при допустимых агрегатных состояниях рабочих тел при технологических и эксплуатационных ограничениях.

Выполнено численное моделирование процессов НЭУ по 89 схемам. Схемы и параметры циклов НЭУ представлены в приложении А.



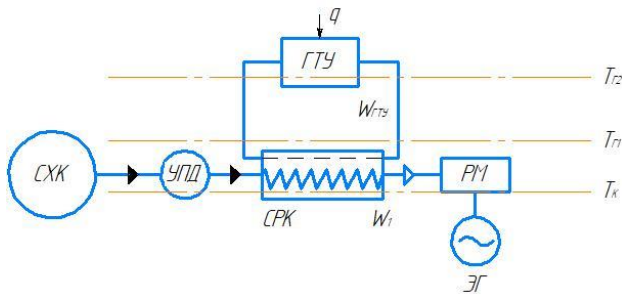


Рисунок 3.1 – Схема одноконтурной НЭУ

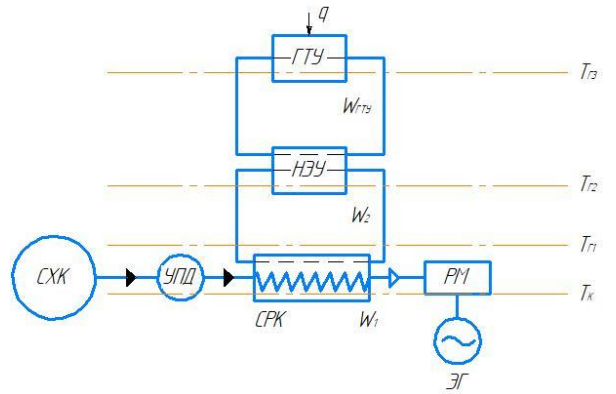


Рисунок 3.2 – Схема двухконтурной последовательной НЭУ

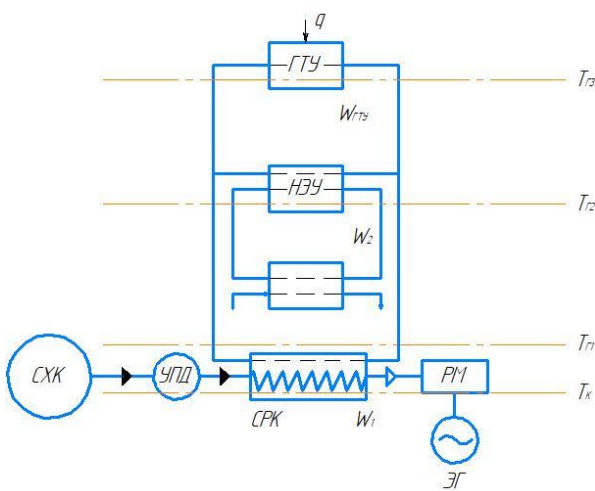


Рисунок 3.3 – Схема двухконтурной параллельной НЭУ

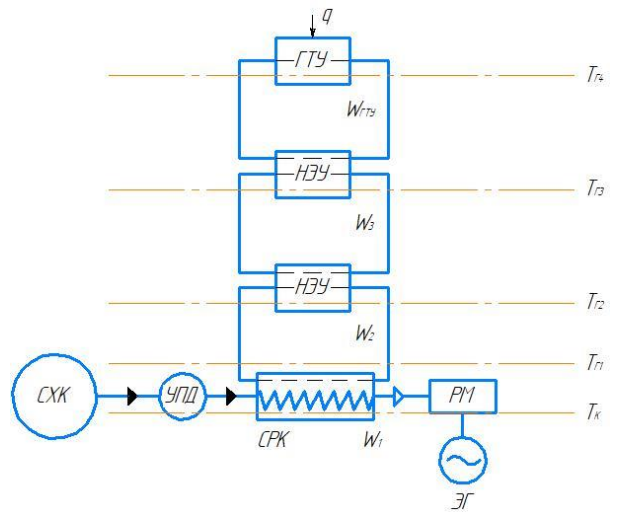


Рисунок 3.4 – Схема трёхконтурной последовательной НЭУ

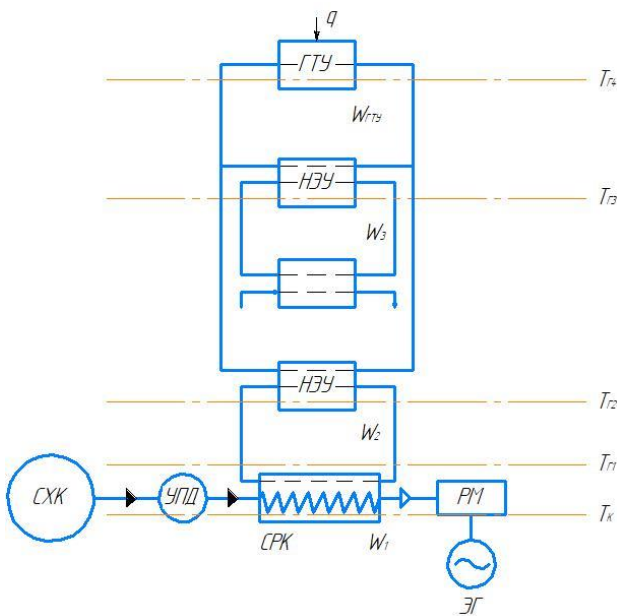


Рисунок 3.5 – Схема трёхконтурной последовательно-параллельной НЭУ

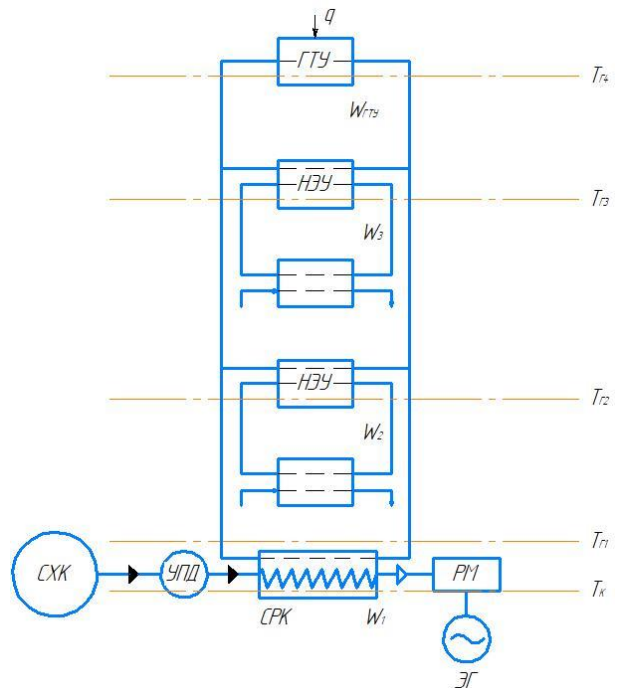


Рисунок 3.6 – Схема трёхконтурной параллельной НЭУ

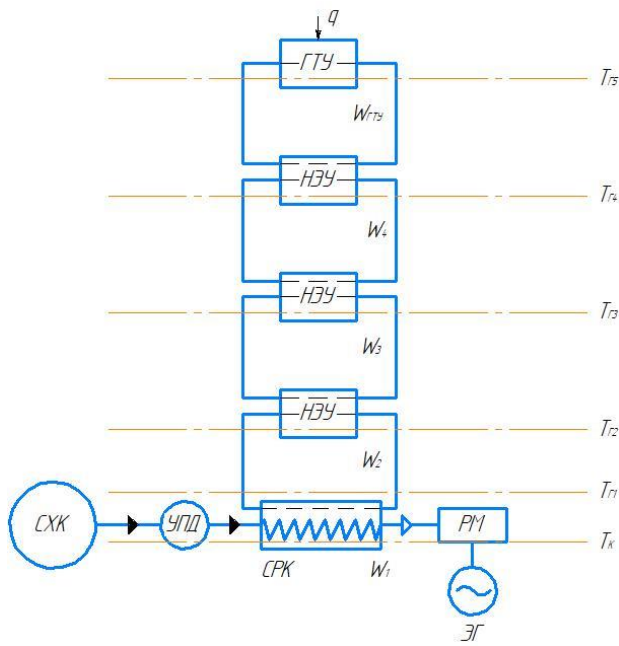


Рисунок 3.7 – Схема четырёхконтурной последовательной НЭУ

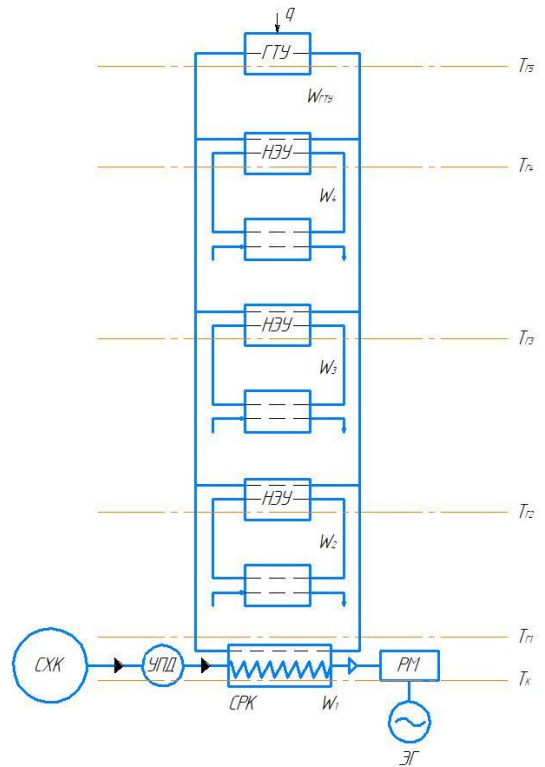


Рисунок 3.8 – Схема четырёхконтурной параллельной НЭУ

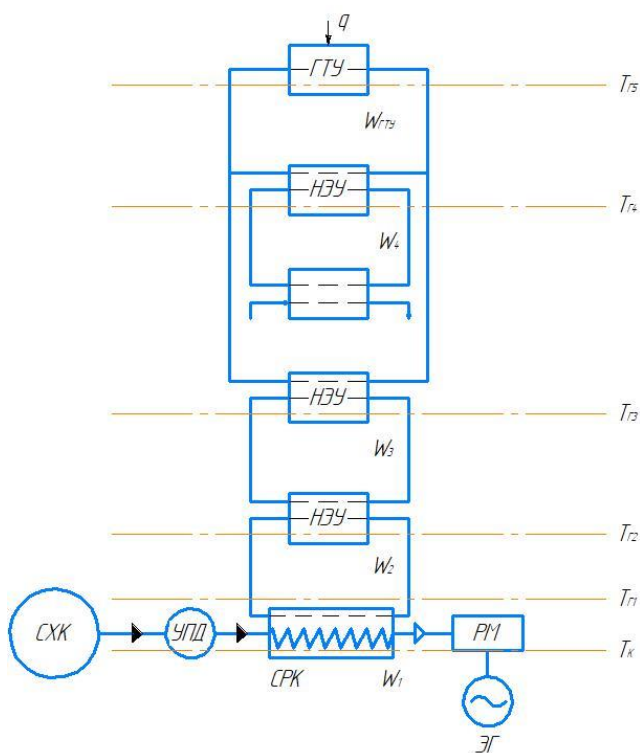


Рисунок 3.9 – Схема четырёхконтурной последовательно-параллельной НЭУ, в состав которой входит три последовательных и один параллельный контур

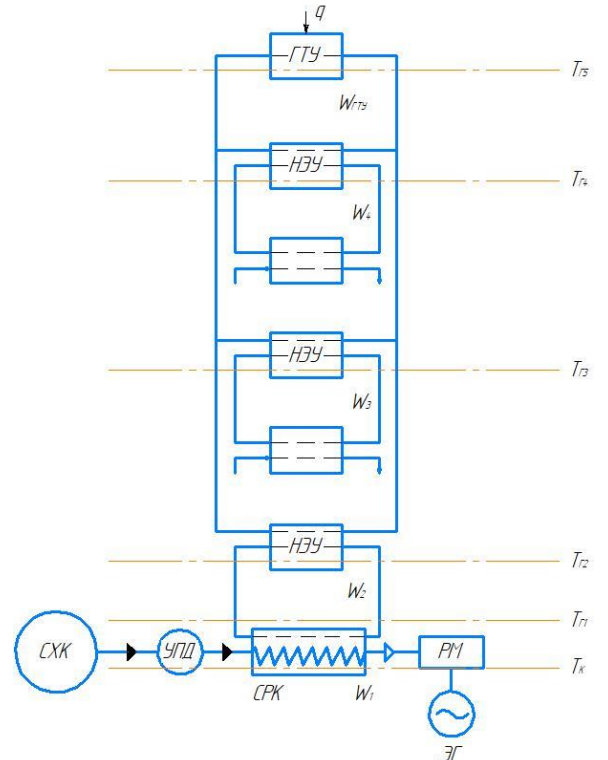


Рисунок 3.10 – Схема четырёхконтурной последовательно-параллельной НЭУ, в состав которой входит два последовательных и два параллельных контура

### 3.3 Расчёт основной ЭУ с использованием САЕ-системы «АСТРА»

#### 3.3.1 Описание прототипа основной ЭУ

В качестве основной ЭУ был выбран ГТД CFM leap-1A (Leading Edge Aviation Propulsion – передовая авиационная силовая установка) совместного предприятия компании Snesta и корпорации General Electric [65], использующий СПГ в качестве моторного топлива. На его основе выполняется тепловой расчёт комбинированного цикла ГТУ для выработки электроэнергии и использования НЭ СПГ.

Основные технические параметры двигателя CFM leap-1A приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические параметры двигателя CFM leap-1A

Параметр	Значение
Степень двухконтурности	11:1
Тяга, кН	109-156
Тяга (крейсерский режим), кН	30
Максимальная температура на выходе, °С	1060
Частота вращения ротора низкого давления, об/мин	3894
Частота вращения ротора высокого давления, об/мин	19391
Удельный расход топлива, г/с/кН	14
Массовый расход, кг/с	360,396

#### 3.3.2 Расчёт основной ЭУ с использованием САЕ-системы «АСТРА»

Автоматизированная система термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей и энергетических установок представляет собой интегрированную среду для совместного решения задач начального этапа проектирования ГТД любых типов и схем. Использование системы АСТРА позволяет повысить эффективность, сократить время создания двигателя и уменьшить стоимость его жизненного цикла [66].

Двигатель CFM leap-1A представляет собой турбореактивный двигатель с валом

высокого давления и валом низкого давления. Рабочий процесс двигателя был смоделирован с использованием САЕ-системы «АСТРА». На рисунке 3.11 представлена укрупненная структура математической модели двигателя CFM leap-1A.

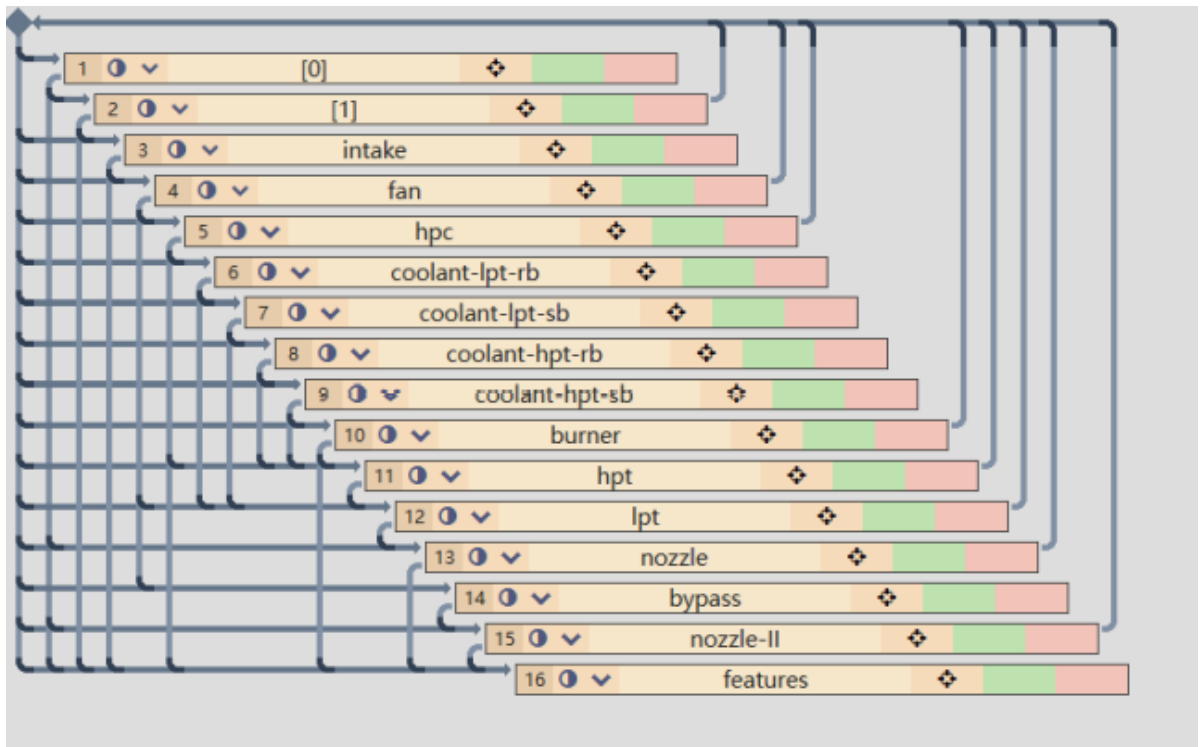


Рисунок 3.11 – Реализация компьютерной модели двигателя CFM leap-1A в САЕ-системе «АСТРА»

В процессе перевода авиационных двигателей в ЭУ необходимо сосредоточить внимание на расходе топлива в камере сгорания двигателя. Основные параметры разрабатываемой модели основной ЭУ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные параметры разрабатываемой модели основной энергетической установки

Параметр	Разрабатываемая модель	Реальная модель
Тяга, кН	30	30
Коэффициент двухконтурности	11	11
Степень сжатия в компрессоре	40	40
Степень сжатия в вентиляторе	1,45	1,55
Степень сжатия в компрессоре высокого давления	22	22
Топливопотребление с учётом тяги	14,16	14

На базе авиационного ГТД была построена модель ГТУ основного контура. После замены стандартного топлива (авиационный керосин) на природный газ, для того, чтобы

турбина работала должным образом, необходимо убедиться в том, что общая теплотворная способность топлива после модернизации равна теплотворной способности топлива до модернизации. В то же время при модернизации был исключен из конструкции вал низкого давления и проведена замена турбины низкого давления на свободную турбину. При этом коэффициент сжатия компрессора ГТУ стал равен коэффициенту сжатия компрессора высокого давления ГТД. Укрупненная структура математической модели разрабатываемой ГТУ показана на рисунке 3.12.

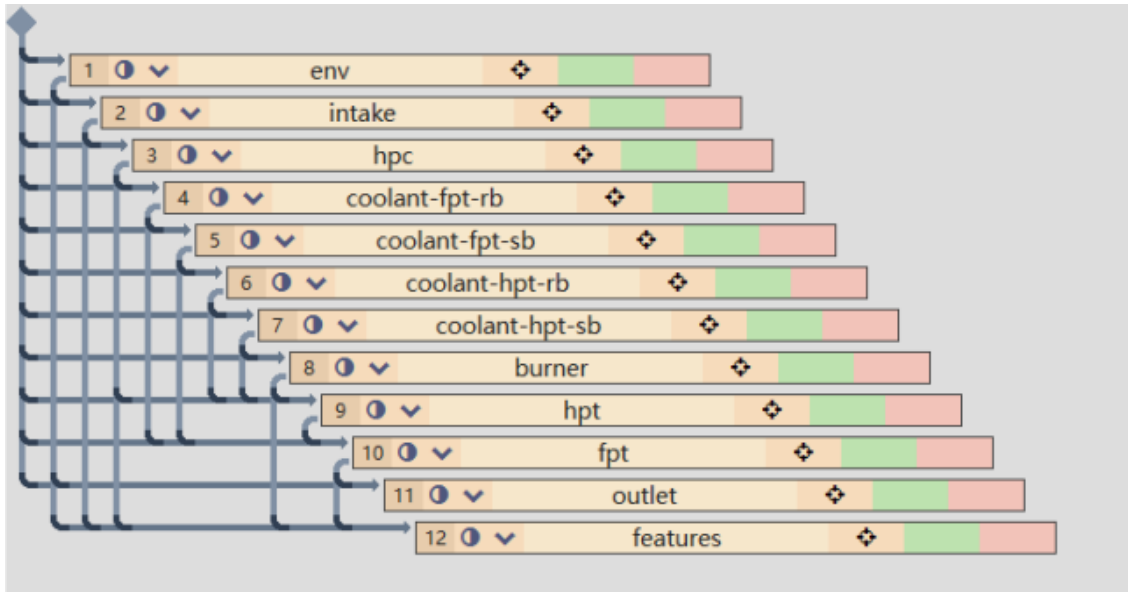


Рисунок 3.12 – Реализация компьютерной модели разрабатываемой ГТУ в САЕ-системе «АСТРА»

На рисунке 3.13 представлена схема разрабатываемой основной ГТУ, в которой в качестве топлива используется ПГ.

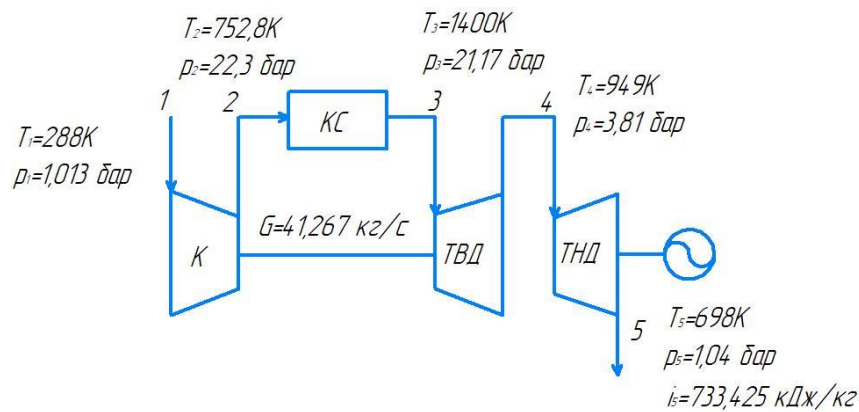


Рисунок 3.13 – Схема основной ГТУ

Результаты термодинамического расчёта ГТУ, полученные с использованием САЕ-системы «АСТРА», представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты термогазодинамического расчёта ГТУ, полученные с использованием САЕ-системы «АСТРА»

Узел двигателя	Параметр	Значение
Окружающая среда	$M$ – число Маха	0
	$H$ – высота, км	0
	$P_0^*$ - атмосферное давление, кПа	101,325
	$T_0^*$ - температура атмосферного воздуха, К	288,15
Входное устройство	$G_1$ – массовый расход воздуха на входе, кг/с	40,665
	$P_1^*$ - полное давление на входе, кПа	101,325
	$T_1^*$ - полная температура на входе, К	288
	$G_2$ – массовый расход воздуха на выходе, кг/с	40,665
	$P_2^*$ - полное давление на выходе, кПа	101,325
	$T_2^*$ - полная температура на выходе, К	288
Компрессор (К)	$\pi_k^*$ - степень повышения давления	22
	$I_k$ – удельная работа, кДж/кг	482,25
	$N_k$ – мощность, кВт	19610,4
	$G_3$ – массовый расход на выходе, кг/с	40,665
	$P_3^*$ - полное давление на выходе, кПа	2229,15
	$T_3^*$ - полная температура на выходе, К	752,82
Камера сгорания (КС)	$T_4^*$ - полная температура на выходе, К	1400
	$G_T$ – потребление топлива, кг/с	0,602
	$G_4$ – массовый расход, кг/с	41,267
	$P_4^*$ - полное давление на выходе, кПа	2117,692
	$T_4^*$ - полная температура на выходе, К	1400
Турбина высокого давления (ТВД)	$\pi_{ТВД}^*$ - степень повышения давления	5,5538
	$I_{ТВД}$ – удельная работа, кДж/кг	502,35
	$N_{ТВД}$ – мощность, кВт	19708,9
	$G_4$ – массовый расход, кг/с	41,267
	$P_4^*$ - полное давление на выходе, кПа	381,302
	$T_4^*$ - полная температура на выходе, К	948,85
Турбина низкого давления (ТНД)	$\pi_{ТНД}^*$ - степень повышения давления	3,6536
	$I_{ТНД}$ – удельная работа, кДж/кг	282,29
	$N_{ТНД}$ – мощность ТВД, кВт	11649

Продолжение таблицы 3.3

Турбина низкого давления (ТНД)	$G_5$ – массовый расход, кг/с	41,267
	$P_5^*$ - полное давление на выходе, кПа	104,365
	$T_5^*$ - полная температура на выходе, К	698
Особенности	$\pi_k^*$ – общая степень повышения давления	22
	$G_1$ – массовый расход воздуха, кг/с	40,665
	$N_{гту}$ – мощность, кВт	11649
	$G_T$ – потребление топлива, кг/с	0,602
	$\eta_{гту}$ - КПД	38,82%

### 3.4 Анализ характеристик цикла НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов

Расчётное исследование НЭУ с учётом их состава, рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов можно провести по формулам (3.1) – (3.18) или с помощью программного модуля, написанного на языке программирования Python [62].

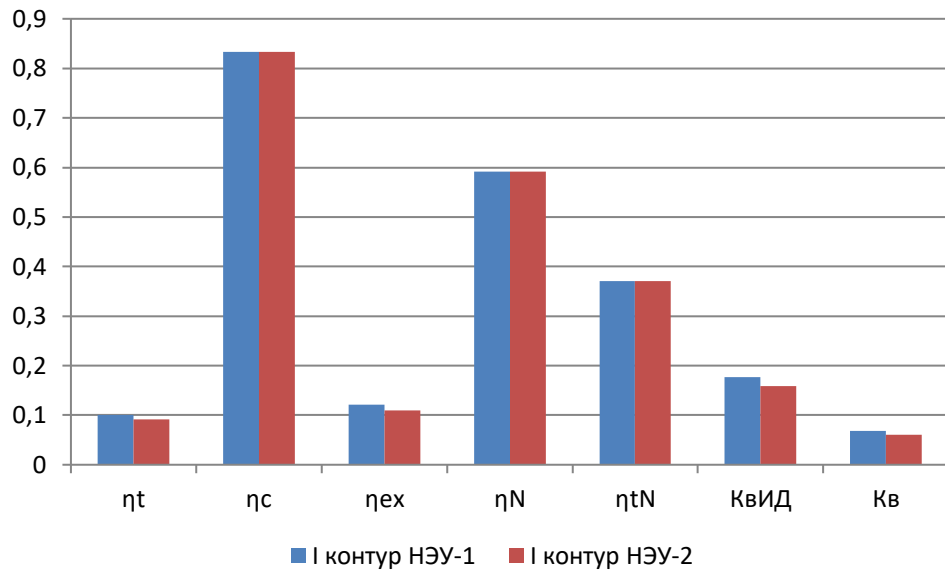
#### 3.4.1 Анализ характеристик цикла одноконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов

Результаты анализа характеристик цикла одноконтурных НЭУ (рисунок А.1 – А.2, приложение А) с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.4.

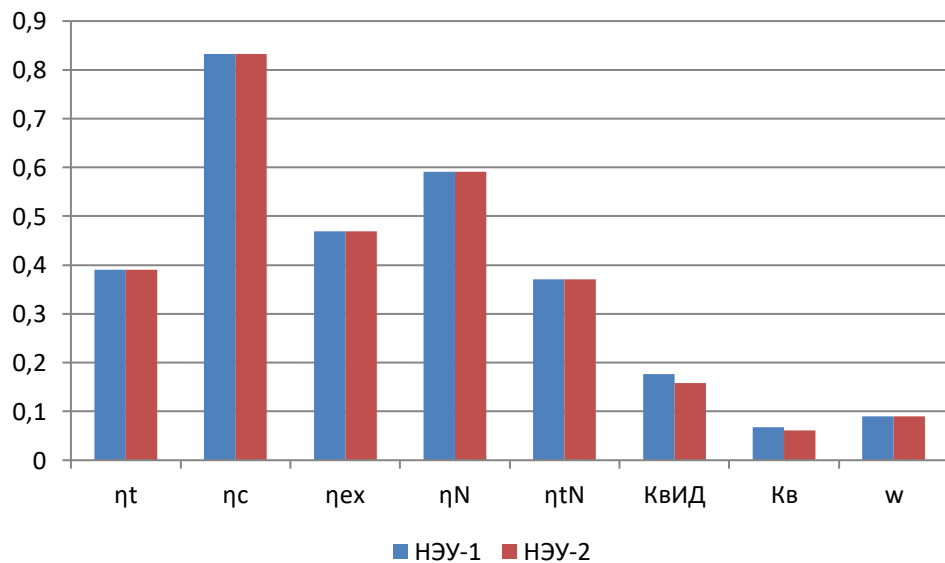
Таблица 3.4 – Результаты анализа характеристик цикла одноконтурных НЭУ

Параметр	НЭУ-1	НЭУ- 2
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,010109	0,009046
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	195,6152	175,0423
Отношение температур в контуре, $\tau_I$	5,985663	5,985663
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,176995	0,158381
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,067922	0,060779
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,100908	0,091141
КПД Карно в I контуре, $\eta_{с I}$	0,832934	0,832934
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{ex I}$	0,121147	0,109421
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,591263	0,591263
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	195,6152	175,0423
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в НЭУ $K_{вИД НЭУ}$	0,176995	0,158381
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{в НЭУ}$	0,067922	0,060779
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{II НЭУ}$	0,390922	0,390511
КПД Карно НЭУ, $\eta_{с НЭУ}$	0,832934	0,832934
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{ex НЭУ}$	0,469332	0,468838
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{N НЭУ}$	0,591263	0,591263
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{I НЭУ}$	0,370357	0,370357
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,382809	0,342549
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,089509	0,09004
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,022507	0,02014





$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);  
 $K_{вИД}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_v$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).  
 Рисунок 3.14 – Эффективные показатели I контура одноконтурных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);  
 $K_{вИД}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_v$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).  
 Рисунок 3.15 – Эффективные показатели одноконтурных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

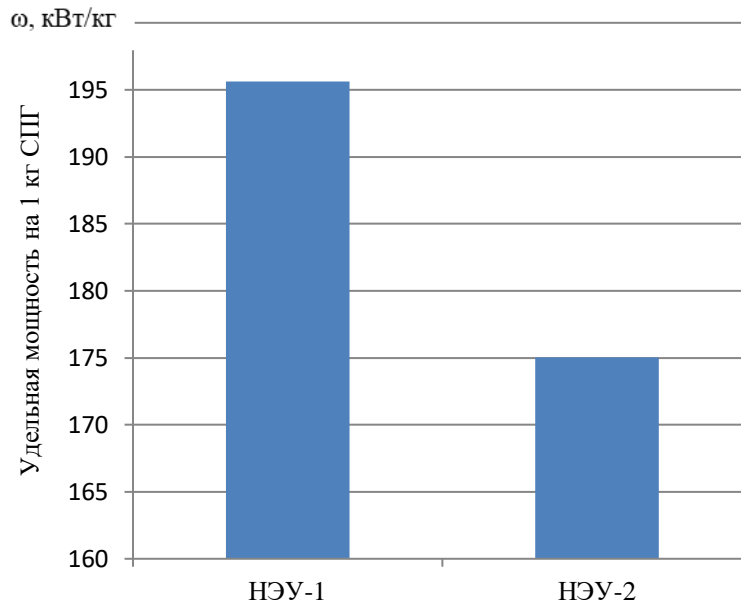


Рисунок 3.16 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) одноконтурных НЭУ

На рисунке 3.14 представлены показатели эффективности I контура одноконтурных НЭУ. На рисунке 3.15 представлены эффективные показатели одноконтурных НЭУ. Отсутствие расхождения в значениях КПД Карно и КПД Карзона-Новикова объясняется одинаковыми максимальным и минимальным температурными уровнями в предложенных НЭУ, что наглядно демонстрирует показатель  $1/\tau$ . I контур НЭУ-1 характеризуется более высоким тепловым КПД по сравнению с I контуром НЭУ-2. Это объясняется тем, что цикл Ренкина наиболее эффективно реализуется в заданных температурных уровнях, соответствующих положению контуров в схемах НЭУ (рисунок А.1, приложение А). Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь и максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта выше в контурах, работающих по циклу Ренкина, поскольку в нём затрачивается значительно меньше энергии (на 2-3 порядка) при одинаковой степени повышения давления рабочего тела, чем в цикле Брайтона.

Разница между КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  и тепловым КПД одноконтурных НЭУ составляет 2%, в то время как разница между КПД Карзона-Новикова и тепловым КПД составляет 20%, это доказывает, что использование расширенной и уточнённой методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, позволяет повысить точность проекторочных расчётов одноконтурных НЭУ на 18%.

На рисунке 3.16 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ

одноконтурных НЭУ. Для увеличения мощности необходимо увеличить отношение температур рабочего тела за счёт подвода дополнительной тепловой энергии от других источников к рабочему телу, однако, для более корректной оценки показателей эффективности температурные уровни необходимо сохранить на одном уровне.

#### 3.4.2 Анализ характеристик цикла двухконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов

Результаты анализа характеристик цикла двухконтурных НЭУ (рисунок А.3 – А.9, приложение А) с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.5.

На рисунке 3.17 – 3.18 представлены показатели эффективности отдельных контуров двухконтурных НЭУ. На рисунке 3.19 представлены эффективные показатели двухконтурных НЭУ.

Расхождение и сходимостъ значений КПД Карно и КПД Карзона-Новикова напрямую зависит от значений показателя  $1/\tau$ . II контур НЭУ-4, НЭУ-7 и НЭУ-8 характеризуется более высоким тепловым КПД по сравнению со II контуром других НЭУ. Это объясняется тем, что цикл Брайтона наиболее эффективно реализуется в заданных температурных уровнях, соответствующих положению контуров в схемах НЭУ-4 (рисунок А.4), НЭУ-7 (рисунок А.7) и НЭУ-8 (рисунок А.8). Коэффициент возврата энергии криопродукта и максимальный коэффициент возврата энергии криопродукта не определяются для II и выше контуров параллельных НЭУ, так как произведенная работа в данных контурах не зависит от ранее затраченной энергии, затраченной на сжижение криопродукта.

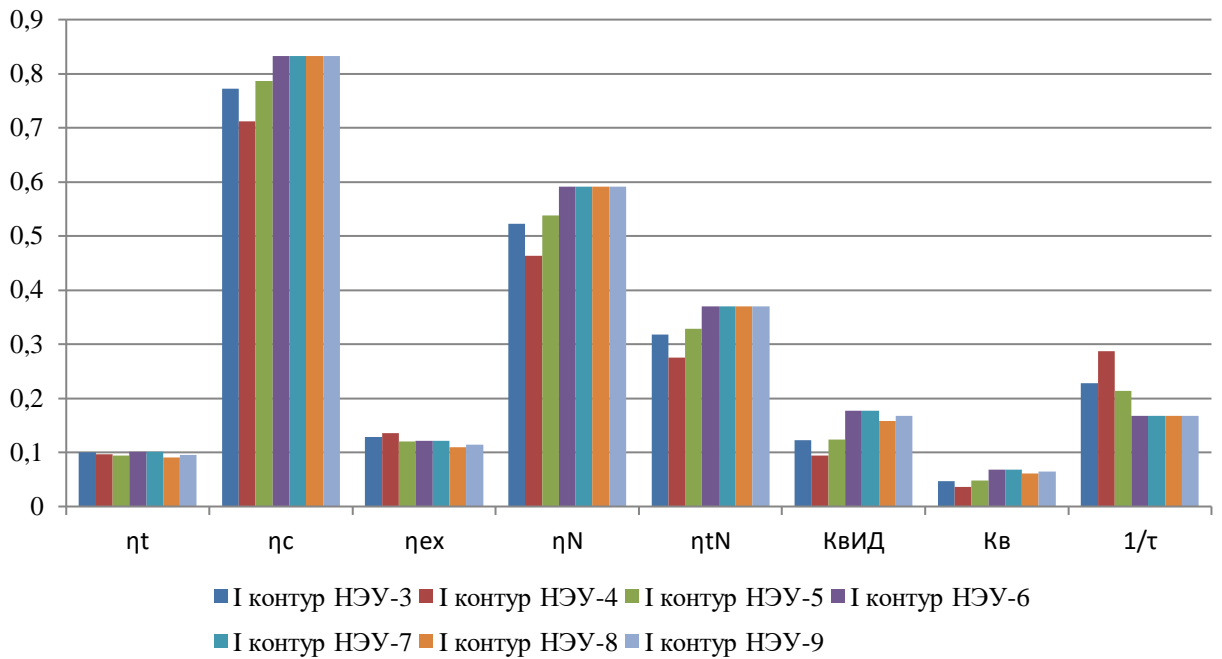
Разница между КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  и тепловым КПД двухконтурных НЭУ составляет 2 – 3%, в то время как разница между КПД Карзона-Новикова и тепловым КПД составляет 19 – 20%, это доказывает, что использование расширенной и уточнённой методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, позволяет повысить точность проектировочных расчётов двухконтурных НЭУ на 17 %.

Таблица 3.5 – Результаты анализа характеристик цикла двухконтурных НЭУ

Параметр	НЭУ-3	НЭУ-4	НЭУ-5	НЭУ-6	НЭУ-7	НЭУ-8	НЭУ-9
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,02496	0,04259	0,01687	0,0459	0,03179	0,0267	0,0453
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	483,018	824,046	326,455	888,274	615,22	516,647	876,659
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	4,39068	3,4767	4,67742	5,98566	5,98566	5,98566	5,98566
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,12271	0,0942	0,12366	0,177	0,177	0,08781	0,16709
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,04709	0,03615	0,04745	0,06792	0,06792	0,0337	0,06412
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,0996	0,09662	0,09437	0,10091	0,10091	0,09114	0,09568
КПД Карно в I контуре, $\eta_{cI}$	0,77224	0,71237	0,78621	0,83293	0,83293	0,83293	0,83293
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,12898	0,13564	0,12004	0,12115	0,12115	0,0606	0,11487
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,52276	0,46369	0,53762	0,59126	0,59126	0,59126	0,59126
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	135,615	104,115	136,664	195,615	195,615	97,0423	184,664
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	4,63889	4,63889	2,83051	2,15484	2,15484	2,15484	2,15484
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИД II}$	0,31433	0,6514	0,17173	0,62673	0,37966	0,37966	0,62613
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{в II}$	0,12063	0,24998	0,0659	0,24051	0,1457	0,1457	0,24028
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,24716	0,38438	0,17814	0,09025	0,32326	0,32326	0,09016
КПД Карно во II контуре, $\eta_{cII}$	0,78443	0,78443	0,64671	0,53593	0,53593	0,53593	0,53593

Продолжение таблицы 3.5

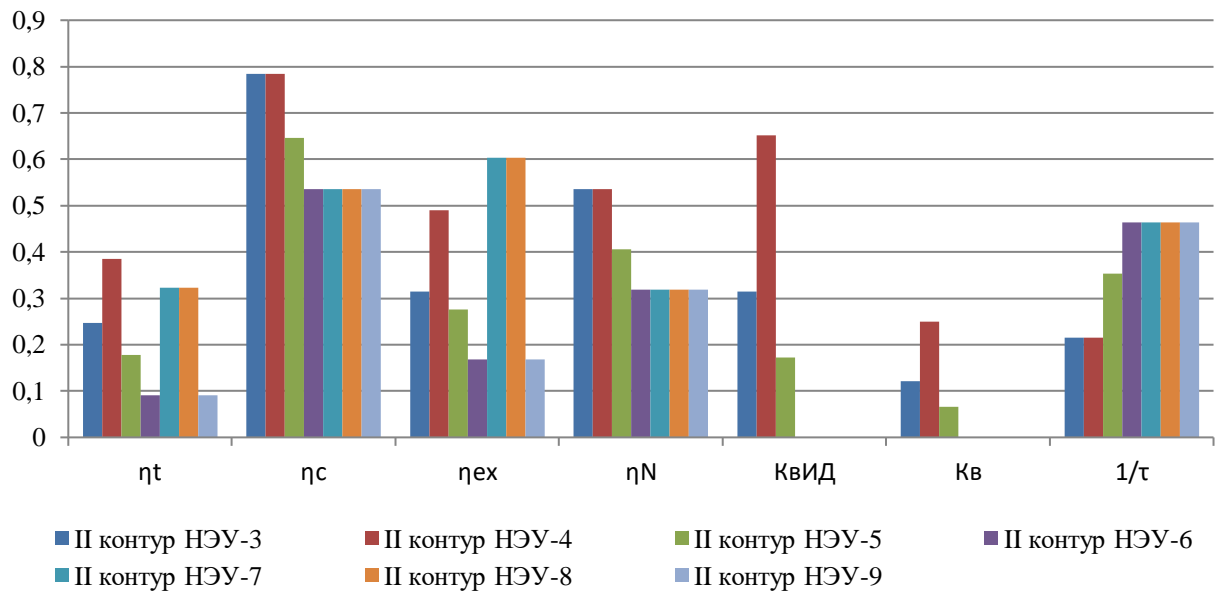
Параметр	НЭУ-3	НЭУ-4	НЭУ-5	НЭУ-6	НЭУ-7	НЭУ-8	НЭУ-9
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{\text{exII}}$	0,31508	0,49001	0,27545	0,16839	0,60318	0,60318	0,16823
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{\text{нп}}$	0,53571	0,53571	0,40562	0,31877	0,31877	0,31877	0,31877
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{\text{удII}}$	347,403	719,931	189,791	692,659	419,605	419,605	691,995
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в НЭУ $K_{\text{видНЭУ}}$	0,43704	0,74561	0,29538	0,80372	0,55666	0,46747	0,79321
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{\text{вНЭУ}}$	0,16771	0,28613	0,11335	0,30843	0,21362	0,17939	0,3044
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{\text{нНЭУ}}$	0,39667	0,40349	0,39354	0,40478	0,39931	0,39734	0,40454
КПД Карно НЭУ, $\eta_{\text{сНЭУ}}$	0,83293	0,83293	0,83293	0,83293	0,83293	0,83293	0,83293
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{\text{exНЭУ}}$	0,47623	0,48442	0,47247	0,48596	0,47941	0,47891	0,48568
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{\text{нНЭУ}}$	0,59126	0,59126	0,59126	0,59126	0,59126	0,59126	0,59126
КПД «карнотизированного» цикла НЭУ, $\eta_{\text{кННЭУ}}$	0,37036	0,37036	0,37036	0,37036	0,37036	0,37036	0,37036
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{\text{СПГ}}$	0,94524	1,61262	0,63886	1,7383	1,20395	1,01105	1,71558
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,15886	0,27594	0,12695	0,05356	0,11188	0,11774	0,05442
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_{\text{I}}$	0,02218	0,02145	0,02094	0,02251	0,02251	0,02014	0,02125
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{\text{II}}$	0,05682	0,1483	0,02908	0,0797	0,04828	0,04828	0,07962
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{\text{тНЭУ}}$	0,39601	0,40528	0,39776	0,40335	0,39468	0,39431	0,40074



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

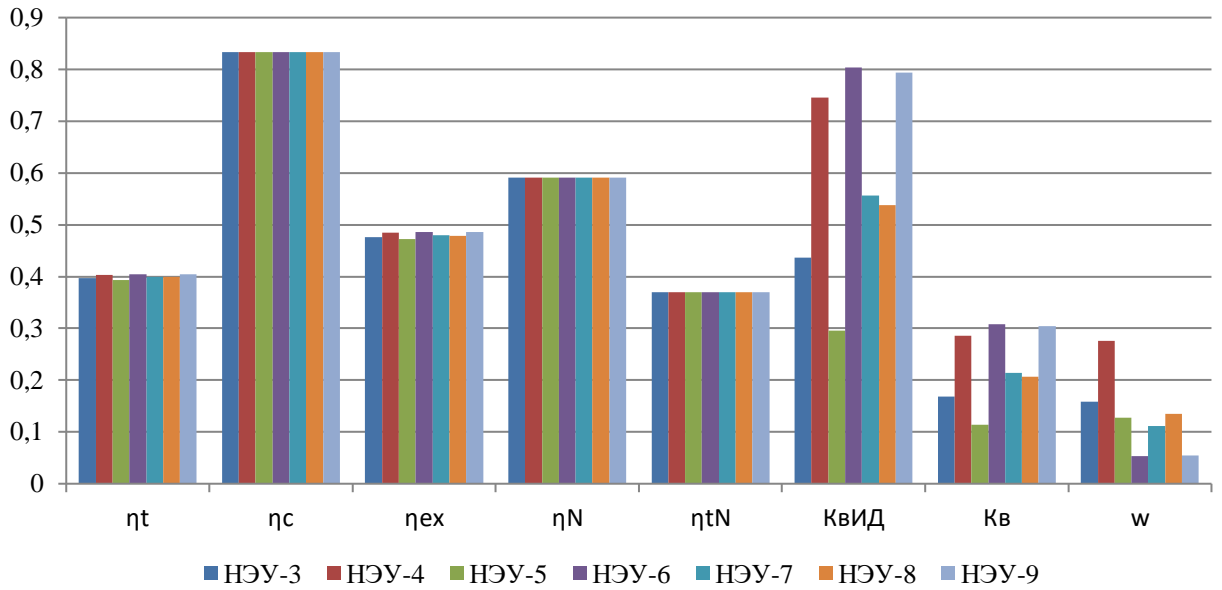
Рисунок 3.17 – Эффективные показатели I контура двухконтурных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.18 – Эффективные показатели II контура двухконтурных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);  
 $К_{вИД}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $К_v$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).  
 Рисунок 3.19 – Эффективные показатели двухконтурных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

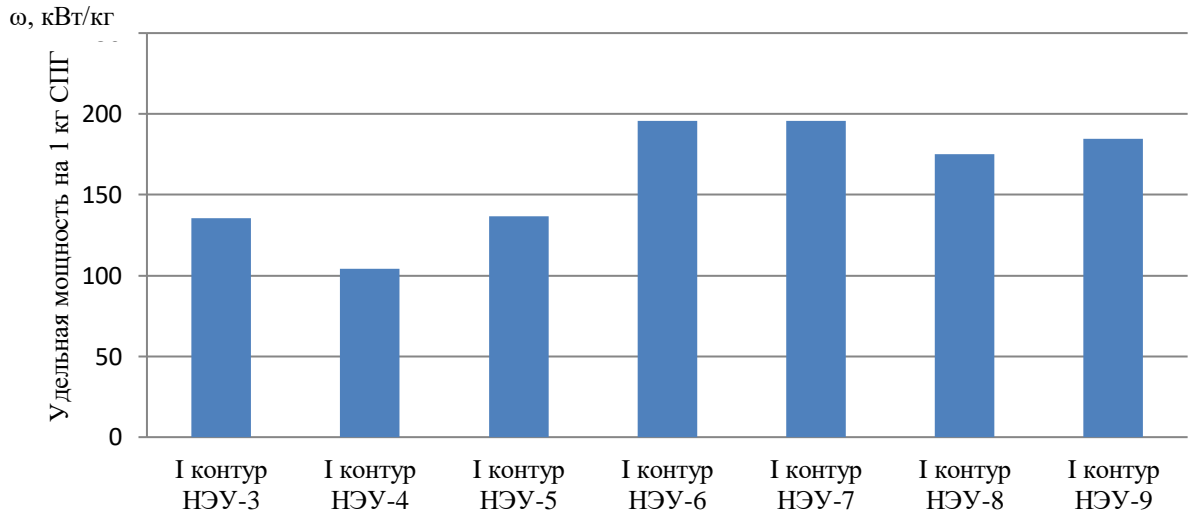


Рисунок 3.20 – Удельная мощность на 1 кг СПГ в I контуре двухконтурных НЭУ

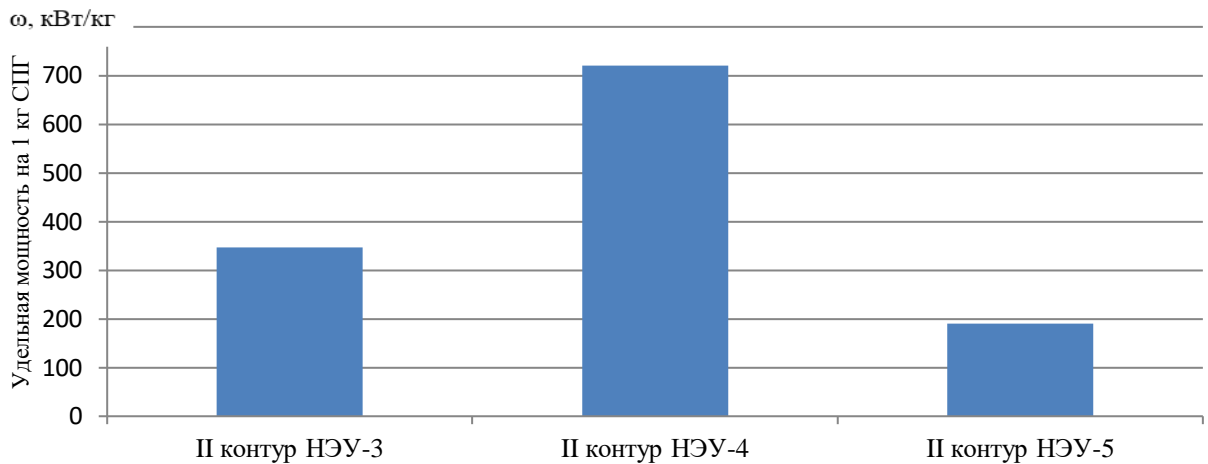


Рисунок 3.21 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) во II контуре двухконтурных НЭУ

На рисунках 3.20 – 3.21 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в отдельных контурах двухконтурных НЭУ. Для увеличения мощности необходимо увеличить отношение температур рабочего тела за счёт подвода дополнительной тепловой энергии от других источников к рабочему телу, однако, для более корректной оценки показателей эффективности температурные уровни необходимо сохранить на одном уровне.

#### 3.4.3 Анализ характеристик цикла трёхконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов

Результаты анализа характеристик цикла последовательных трёхконтурных НЭУ (рисунок А.10 – А.17, приложение А) с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.6.

На рисунках 3.22 – 3.24 представлены показатели эффективности отдельных контуров трёхконтурных последовательных НЭУ. На рисунке 3.25 представлены эффективные показатели трёхконтурных последовательных НЭУ.

Значения теплового КПД и, как следствие, эксергетического КПД напрямую зависят от температурных уровней в контурах.

На рисунках 3.26 – 3.28 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в отдельных контурах трёхконтурных последовательных НЭУ.



Таблица 3.6 – Результаты анализа характеристик цикла трёхконтурных последовательных НЭУ

Параметр	НЭУ-10	НЭУ-11	НЭУ-12	НЭУ-13	НЭУ-14	НЭУ-15	НЭУ-16	НЭУ-17
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,016	0,037	0,022	0,007	0,007	0,046	0,031	0,017
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	301,59	715,66	416,17	130,24	139,62	886,86	598,25	327,09
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	3,387	3,369	2,970	2,742	3,220	2,778	2,733	2,975
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,076	0,086	0,072	0,018	0,072	0,065	0,064	0,062
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,029	0,033	0,028	0,007	0,028	0,025	0,024	0,024
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,081	0,091	0,086	0,023	0,080	0,082	0,081	0,074
КПД Карно в I контуре, $\eta_{cI}$	0,705	0,703	0,663	0,635	0,689	0,640	0,634	0,664
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,114	0,129	0,129	0,036	0,116	0,128	0,128	0,112
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,457	0,455	0,420	0,396	0,443	0,400	0,395	0,420
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	84,106	94,880	79,852	19,874	79,285	71,730	70,271	68,983
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	1,898	3,604	3,276	1,822	1,822	3,090	3,090	1,962
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИД II}$	0,027	0,288	0,154	0,072	0,024	0,274	0,138	0,089
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{в II}$	0,010	0,111	0,059	0,028	0,009	0,105	0,053	0,034
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,086	0,221	0,201	0,217	0,087	0,241	0,198	0,217
КПД Карно во II контуре, $\eta_{cII}$	0,473	0,723	0,695	0,451	0,451	0,676	0,676	0,490
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,181	0,306	0,289	0,480	0,193	0,356	0,292	0,443
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,274	0,473	0,447	0,259	0,259	0,431	0,431	0,286
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{уд II}$	29,577	318,73	170,53	79,447	26,423	303,16	152,67	97,930
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	2,502	3,107	3,732	2,006	2,412	3,023	3,732	2,006
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИД III}$	0,170	0,273	0,150	0,028	0,031	0,463	0,340	0,145

Продолжение таблицы 3.6

Параметр	НЭУ-10	НЭУ-11	НЭУ-12	НЭУ-13	НЭУ-14	НЭУ-15	НЭУ-16	НЭУ-17
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{вIII}$	0,065	0,105	0,058	0,011	0,012	0,178	0,130	0,056
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{III}$	0,287	0,223	0,190	0,132	0,126	0,289	0,290	0,262
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,600	0,678	0,732	0,501	0,585	0,669	0,732	0,501
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,478	0,329	0,260	0,263	0,216	0,432	0,396	0,522
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{NHIII}$	0,368	0,433	0,482	0,294	0,356	0,425	0,482	0,294
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{удIII}$	187,91	302,05	165,78	30,918	33,913	511,97	375,31	160,18
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в НЭУ $K_{видНЭУ}$	0,103	0,374	0,227	0,090	0,096	0,339	0,202	0,151
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,039	0,144	0,087	0,034	0,037	0,130	0,077	0,058
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{НЭУ}$	0,393	0,401	0,395	0,390	0,390	0,405	0,399	0,394
КПД Карно НЭУ, $\eta_{сНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,472	0,482	0,475	0,468	0,468	0,486	0,479	0,472
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{NHНЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{iNHНЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,222	0,809	0,490	0,194	0,207	0,734	0,436	0,327
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,159	0,274	0,220	0,098	0,087	0,336	0,278	0,196
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,018	0,020	0,019	0,005	0,017	0,018	0,018	0,016
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	0,006	0,067	0,040	0,019	0,006	0,075	0,038	0,023
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	0,039	0,064	0,039	0,007	0,007	0,127	0,095	0,038
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{сНЭУ}$	0,395	0,399	0,392	0,388	0,388	0,409	0,398	0,395

Таблица 3.7 – Результаты анализа характеристик цикла трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ

Параметр	НЭУ - 18	НЭУ - 19	НЭУ - 20	НЭУ - 21	НЭУ - 22	НЭУ - 23	НЭУ - 24	НЭУ - 25
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,074	0,121	0,092	0,082	0,090	0,098	0,087	0,084
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	1429,7	2341,2	1775,7	1579,2	1736,0	1905,6	1691,8	1631,1
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	5,323	2,867	3,799	3,799	4,731	4,203	4,203	2,867
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,145	0,068	0,092	0,092	0,125	0,115	0,115	0,068
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,056	0,026	0,035	0,035	0,048	0,044	0,044	0,026
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,096	0,084	0,087	0,087	0,095	0,098	0,098	0,084
КПД Карно в I контуре, $\eta_{cI}$	0,812	0,651	0,737	0,737	0,789	0,762	0,762	0,651
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,118	0,129	0,118	0,118	0,120	0,129	0,129	0,129
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,567	0,409	0,487	0,487	0,540	0,512	0,512	0,409
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	160,66	75,638	101,66	101,66	138,66	127,62	127,62	75,639
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	2,831	4,607	2,831	2,831	2,831	4,607	4,607	4,607
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИД II}$	0,069	0,815	0,259	0,258	0,157	0,336	0,336	0,329
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{в II}$	0,027	0,313	0,099	0,099	0,060	0,129	0,129	0,126
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,082	0,476	0,325	0,324	0,206	0,280	0,280	0,481
КПД Карно во II контуре, $\eta_{cII}$	0,647	0,783	0,647	0,647	0,647	0,783	0,783	0,783
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,127	0,608	0,503	0,501	0,319	0,357	0,357	0,614
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,406	0,534	0,406	0,406	0,406	0,534	0,534	0,534
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{уд II}$	76,662	900,20	285,85	285,11	173,03	371,76	371,76	363,08
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	2,155	2,155	2,155	2,155	2,155	2,155	2,155	2,155
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИД III}$	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 3.7

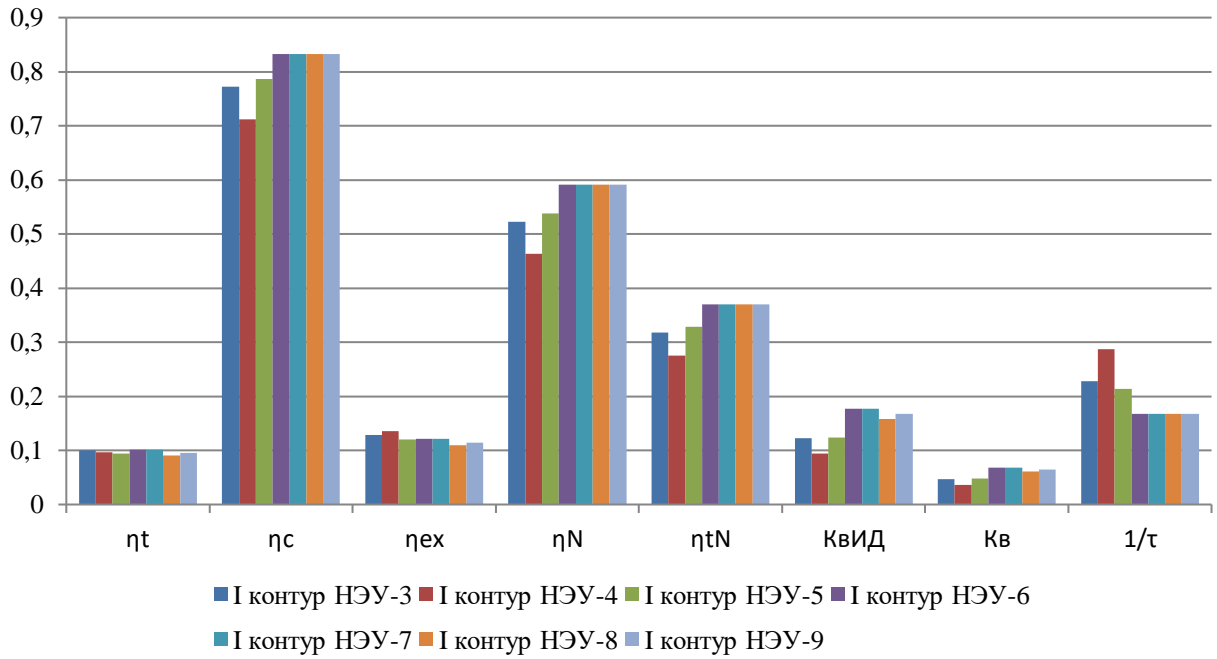
Параметр	НЭУ - 18	НЭУ - 19	НЭУ - 20	НЭУ - 21	НЭУ - 22	НЭУ - 23	НЭУ - 24	НЭУ - 25
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{вIII}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{III}$	0,322	0,091	0,091	0,322	0,091	0,091	0,322	0,322
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,601	0,169	0,169	0,601	0,169	0,169	0,601	0,601
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{НIII}$	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{удIII}$	1192,4	1365,4	1388,1	1192,4	1424,3	1406,2	1192,4	1192,4
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в НЭУ $K_{видНЭУ}$	0,215	0,883	0,351	0,350	0,282	0,452	0,452	0,397
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,082	0,339	0,135	0,134	0,108	0,173	0,173	0,152
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{НЭУ}$	0,416	0,434	0,423	0,419	0,422	0,425	0,421	0,420
КПД Карно НЭУ, $\eta_{сНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,499	0,521	0,507	0,503	0,506	0,510	0,505	0,504
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{ННЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{иННЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,464	1,910	0,758	0,757	0,610	0,977	0,977	0,859
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,208	0,086	0,066	0,263	0,062	0,069	0,257	0,250
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,021	0,018	0,019	0,019	0,021	0,022	0,022	0,018
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	0,010	0,218	0,054	0,054	0,026	0,064	0,064	0,088
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{\Sigma НЭУ}$	0,414	0,434	0,424	0,416	0,418	0,420	0,425	0,414

Таблица 3.8 – Результаты анализа характеристик цикла трёхконтурных параллельных НЭУ

Параметр	НЭУ - 26	НЭУ - 27	НЭУ - 28	НЭУ - 29	НЭУ - 30	НЭУ - 31	НЭУ - 32	НЭУ - 33
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,168	0,161	0,160	0,236	0,160	0,168	0,121	0,246
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	3245,3	3112,8	3091,9	4575,7	3091,9	3245,3	2348,2	4767,4
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,167	0,177	0,177	0,068	0,177	0,167	0,167	0,167
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,064	0,068	0,068	0,026	0,068	0,064	0,064	0,064
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,096	0,101	0,101	0,084	0,101	0,096	0,096	0,096
КПД Карно в I контуре, $\eta_{cI}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,115	0,121	0,121	0,101	0,121	0,115	0,115	0,115
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	184,66	195,62	195,62	75,639	195,62	184,66	184,66	184,66
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	2,155	2,155	2,155	2,134	2,134	2,155	2,155	2,155
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИД II}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{в II}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,091	0,090	0,090	0,323	0,351	0,322	0,090	0,322
КПД Карно во II контуре, $\eta_{cII}$	0,536	0,536	0,536	0,531	0,531	0,536	0,536	0,536
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,169	0,169	0,169	0,609	0,660	0,601	0,169	0,601
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,319	0,319	0,319	0,315	0,315	0,319	0,319	0,319
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{уд II}$	702,66	694,27	694,27	2298,0	2202,1	2358,0	701,68	2358,0
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	2,155	2,134	2,134	2,134	2,155	2,155	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИД III}$	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 3.8

Параметр	НЭУ - 26	НЭУ - 27	НЭУ - 28	НЭУ - 29	НЭУ - 30	НЭУ - 31	НЭУ - 32	НЭУ - 33
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{вIII}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{III}$	0,322	0,185	0,351	0,351	0,090	0,091	0,142	0,351
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,536	0,531	0,531	0,531	0,536	0,536	0,531	0,531
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,601	0,348	0,660	0,660	0,169	0,169	0,267	0,660
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{NHIII}$	0,319	0,315	0,315	0,315	0,319	0,319	0,315	0,315
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{удIII}$	2358,0	2222,9	2202,1	2202,1	694,27	702,66	1461,8	2224,8
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в НЭУ $K_{видНЭУ}$	0,167	0,177	0,177	0,068	0,177	0,167	0,167	0,167
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,064	0,309	0,068	0,026	0,068	0,064	0,064	0,064
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{НЭУ}$	0,452	0,449	0,449	0,479	0,449	0,452	0,434	0,482
КПД Карно НЭУ, $\eta_{сНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,543	0,539	0,539	0,575	0,539	0,543	0,521	0,579
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{NHНЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{iНЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,361	0,383	0,383	0,148	0,383	0,361	0,361	0,361
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,138	0,109	0,135	0,263	0,176	0,138	0,082	0,274
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,021	0,023	0,023	0,018	0,023	0,021	0,021	0,021
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{\Sigma НЭУ}$	0,454	0,432	0,446	0,477	0,453	0,454	0,429	0,481

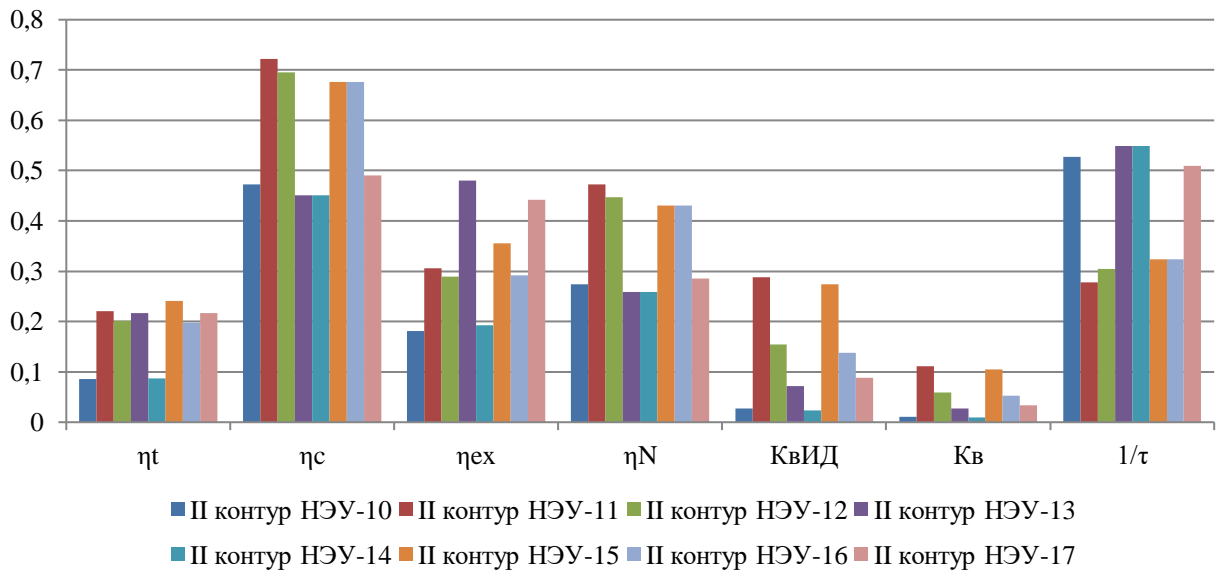


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.22 – Эффективные показатели I контура трёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

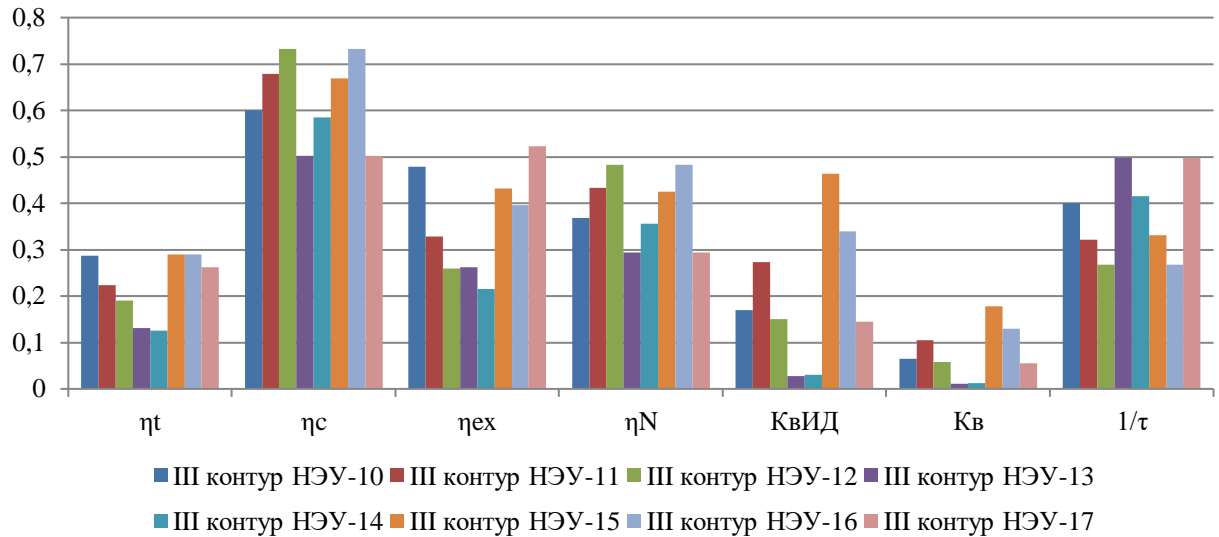


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.23 – Эффективные показатели II контура трёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

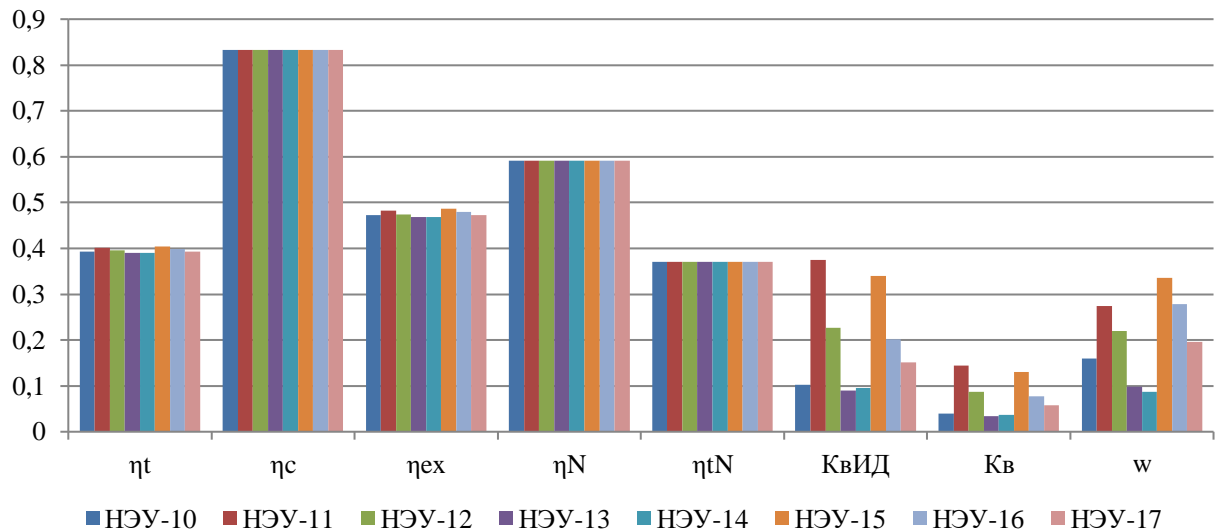
$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.24 – Эффективные показатели III контура трёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.25 – Эффективные показатели трёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)



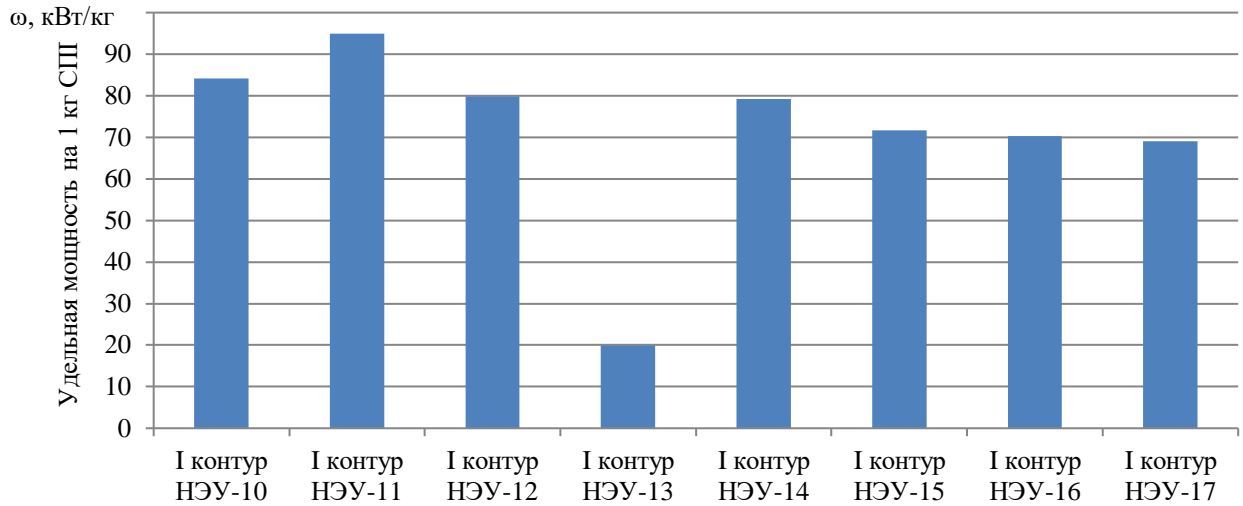


Рисунок 3.26 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в I контуре трёхконтурных последовательных НЭУ

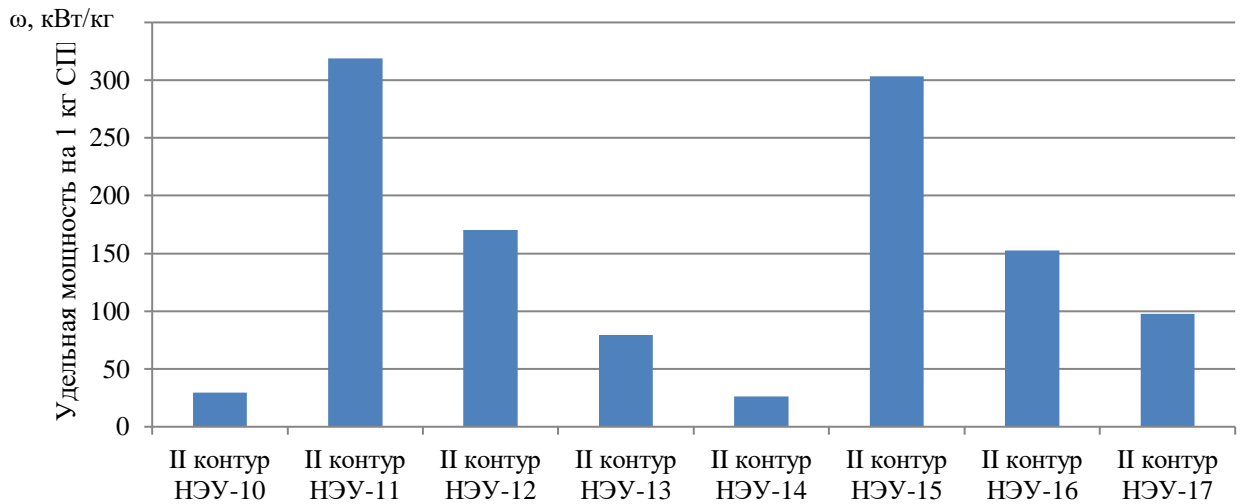


Рисунок 3.27 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) во II контуре трёхконтурных последовательных НЭУ

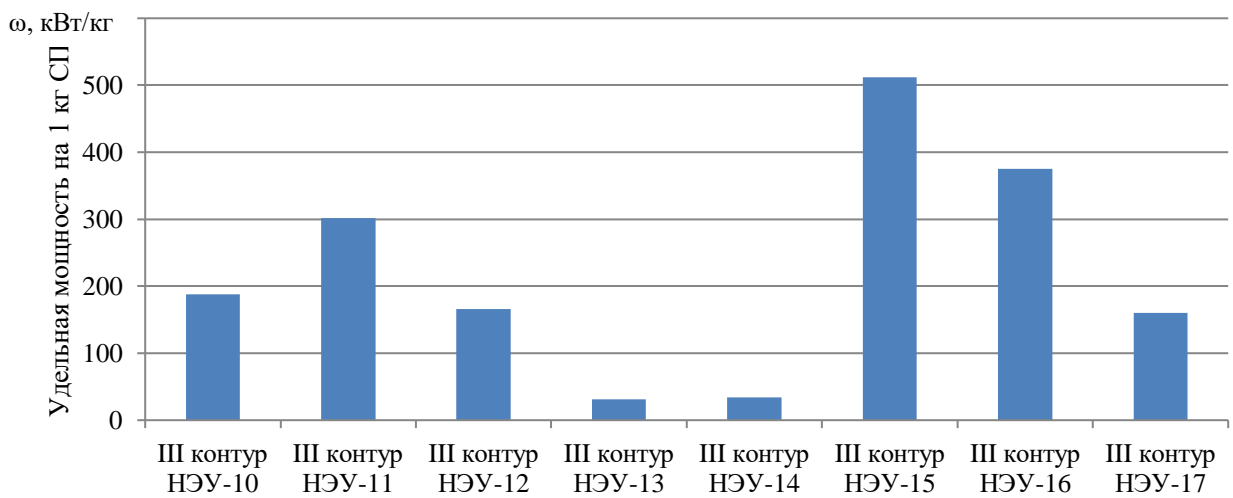
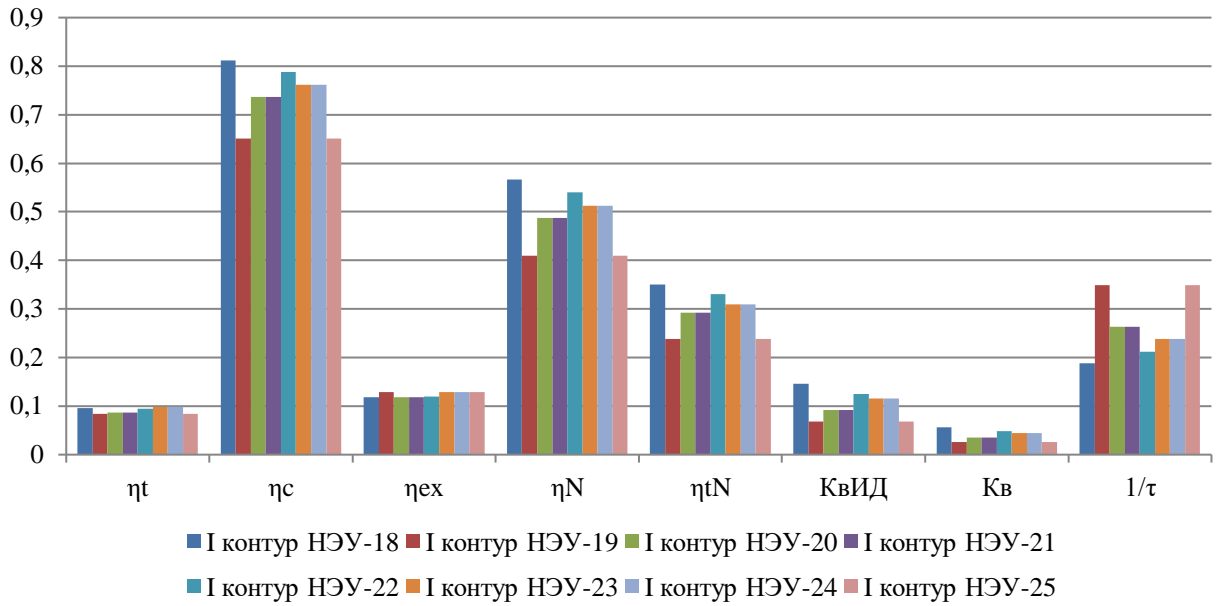


Рисунок 3.28 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в III контуре трёхконтурных последовательных НЭУ

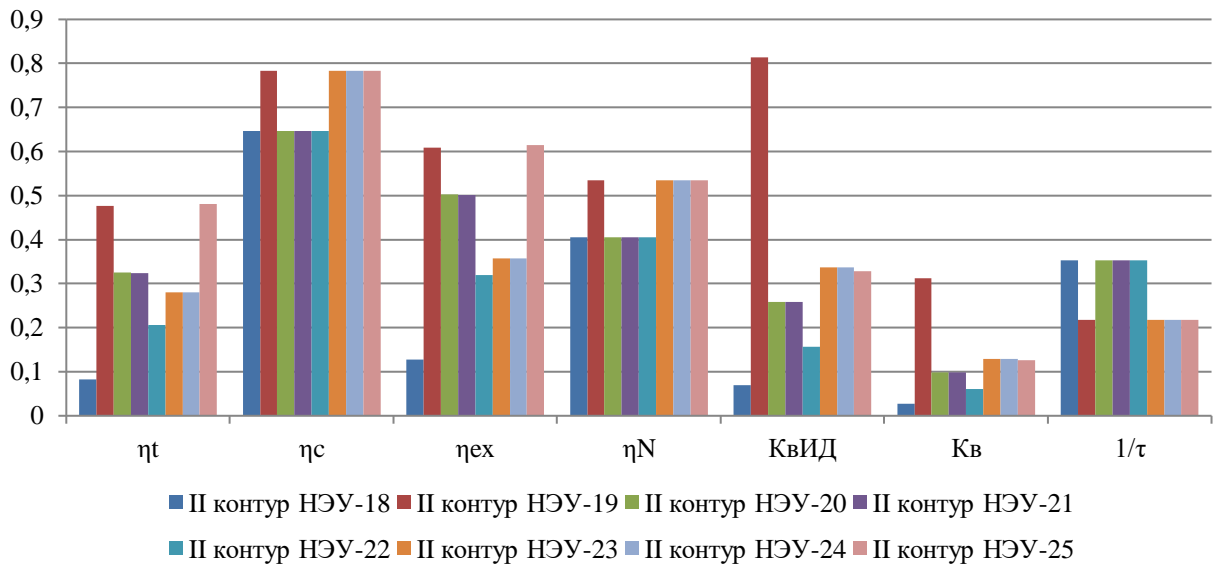


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.29 – Эффективные показатели I контура трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

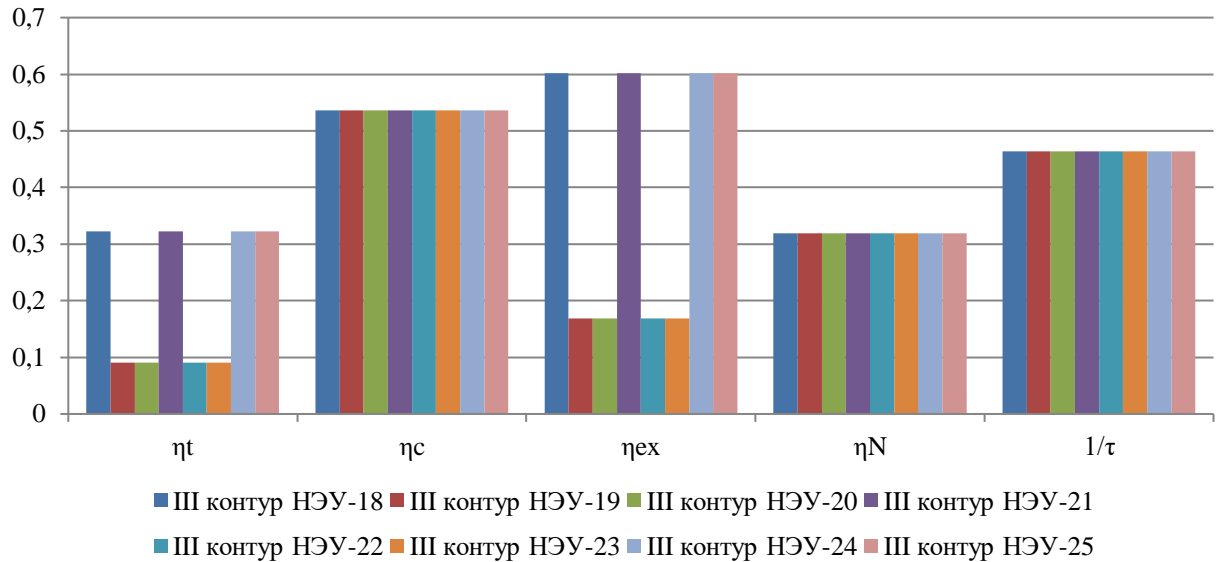


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.30 – Эффективные показатели II контура трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

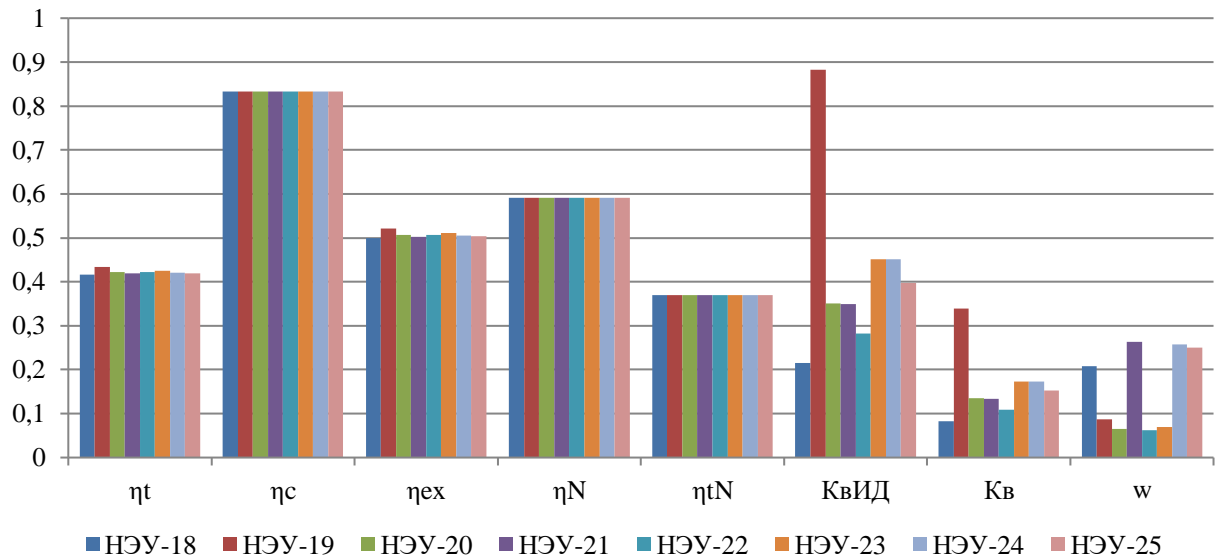
$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.31 – Эффективные показатели III контура трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.32 – Эффективные показатели трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

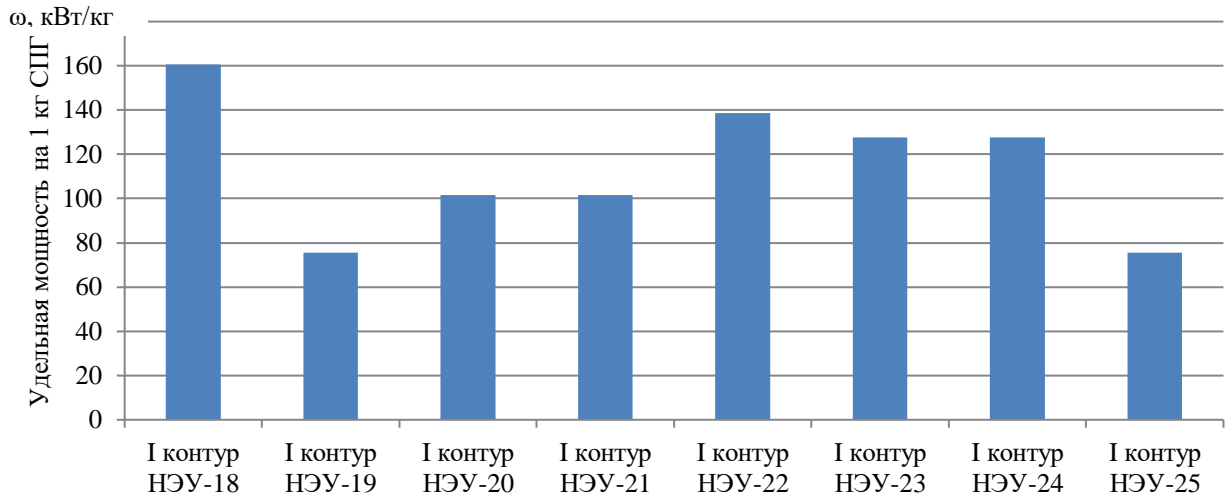


Рисунок 3.33 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в I контуре трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ

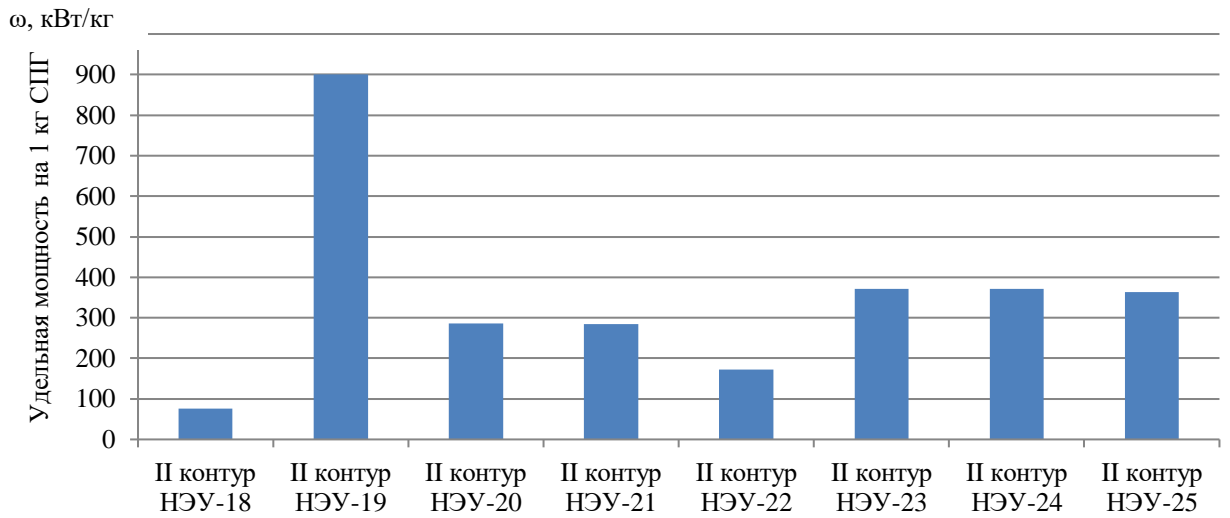
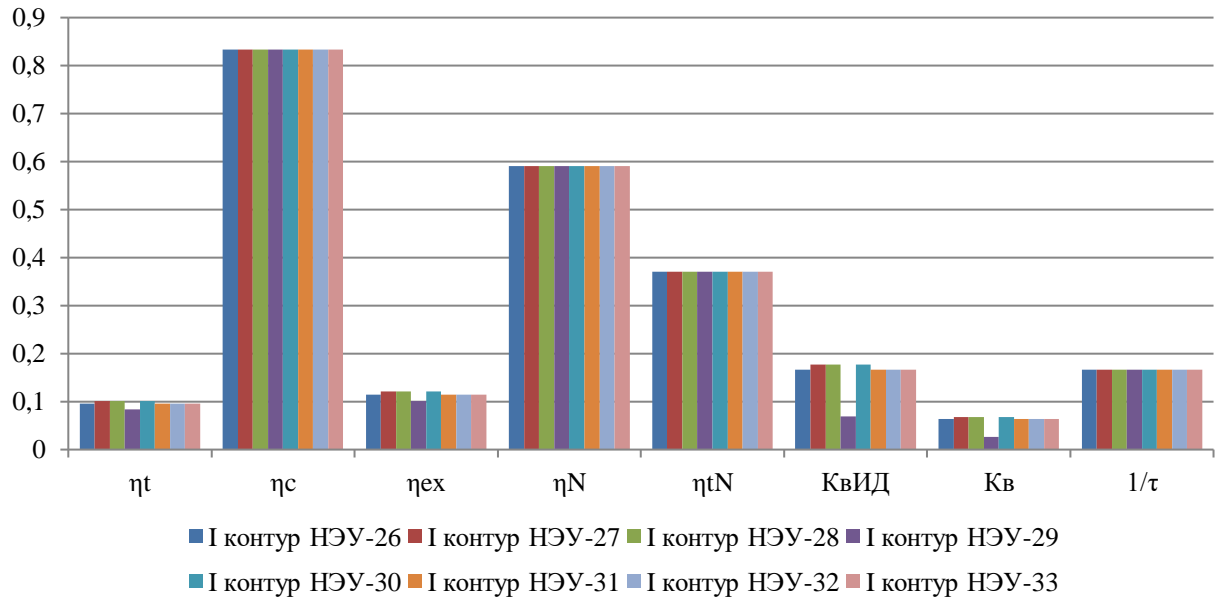


Рисунок 3.34 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) во II контуре трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ

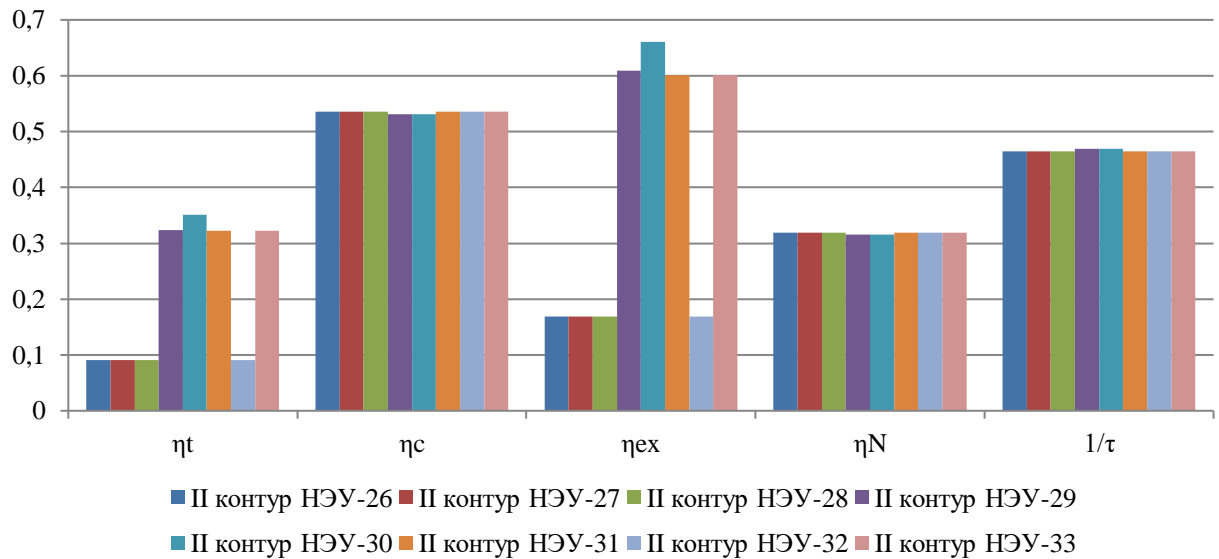


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.35 – Эффективные показатели I контура трёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

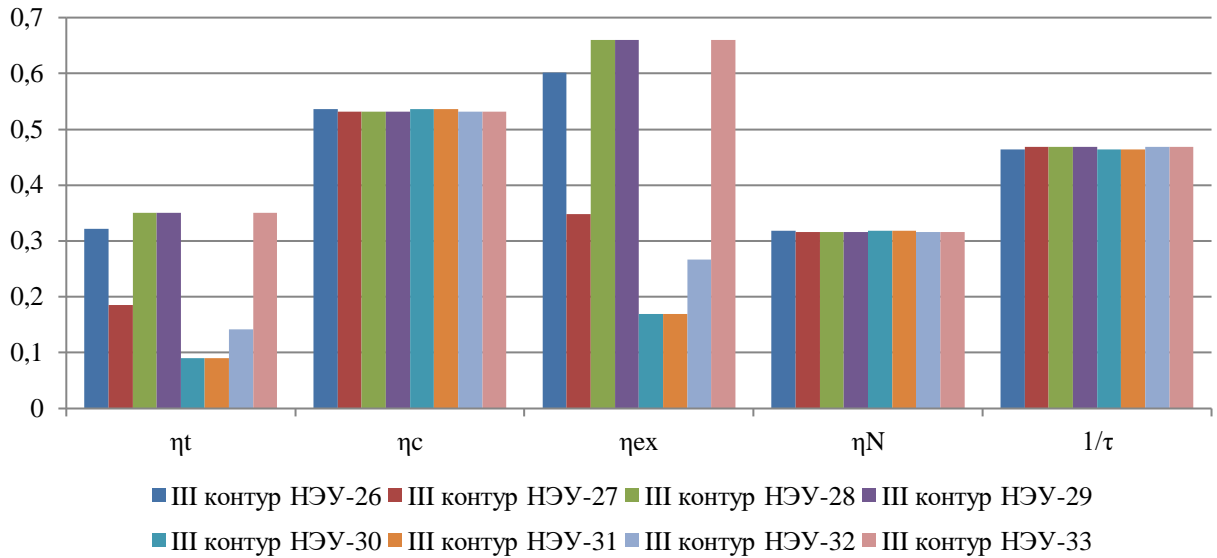


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.36 – Эффективные показатели II контура трёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

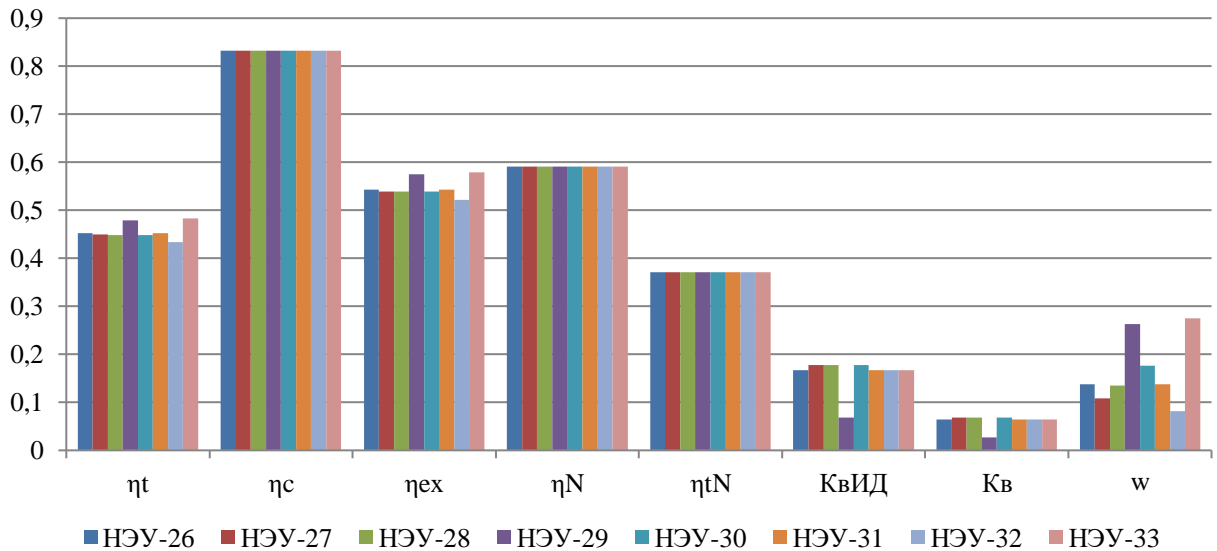
$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.37 – Эффективные показатели III контура трёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.38 – Эффективные показатели трёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

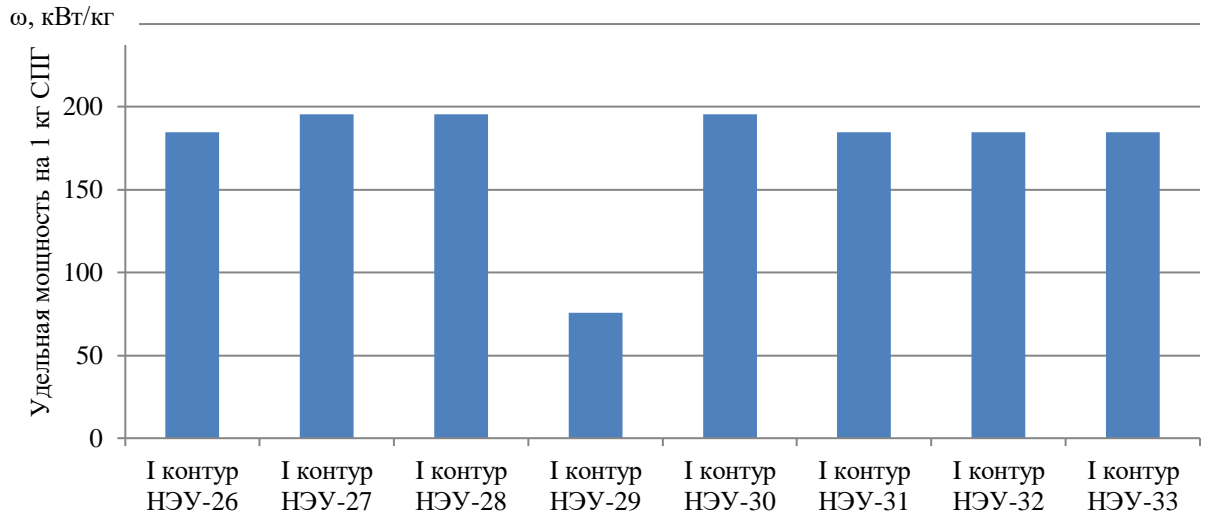


Рисунок 3.39 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в I контуре трёхконтурных параллельных НЭУ

Результаты анализа характеристик цикла трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ (рисунок А.18 – А.25, приложение А) с учётом их состава, рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.7.

На рисунках 3.29 – 3.31 представлены показатели эффективности отдельных контуров трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ. На рисунке 3.32 представлены эффективные показатели трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ.

На рисунках 3.33 – 3.34 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в I и II контурах трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ. Значения удельной мощности на 1 кг СПГ в III контуре трёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ не вычисляются, так как вырабатываемая мощность в III контуре не зависит от нижнего температурного уровня всей НЭУ, устанавливаемого криопродуктом.

Результаты анализа характеристик цикла трёхконтурных параллельных НЭУ (рисунок А.26 – А.33, приложение А) с учётом их состава, рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.8.

На рисунках 3.35 – 3.37 представлены показатели эффективности отдельных контуров трёхконтурных параллельных НЭУ. На рисунке 3.38 представлены эффективные показатели трёхконтурных параллельных НЭУ.

На рисунках 3.39 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в I контуре трёхконтурных параллельных НЭУ. Значения удельной мощности на 1 кг СПГ во II и III контурах трёхконтурных параллельных НЭУ не вычисляются, так как вырабатываемая мощность во II и III контурах не зависит от нижнего температурного уровня всей НЭУ, устанавливаемого температурой криопродукта.

Разница между КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  и тепловым КПД трёхконтурных НЭУ составляет 6 – 11%, в то время как разница между КПД Карзона-Новикова и тепловым КПД составляет 11 – 16%, это доказывает, что использование расширенной и уточнённой методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, позволяет повысить точность проектировочных расчётов трёхконтурных НЭУ в среднем на 10 %.

#### 3.4.4 Анализ характеристик цикла четырёхконтурных НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов

Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных последовательных НЭУ (рисунок А.34 – А.47, приложение А) с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.9.

На рисунках 3.40 – 3.43 представлены показатели эффективности отдельных контуров четырёхконтурных последовательных НЭУ. На рисунке 3.44 представлены эффективные показатели четырёхконтурных последовательных НЭУ.

На рисунках 3.45 – 3.48 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в отдельных контурах четырёхконтурных последовательных НЭУ.



Таблица 3.9 – Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных последовательных НЭУ

Параметр	НЭУ-34	НЭУ-35	НЭУ-36	НЭУ-37	НЭУ-38	НЭУ-39	НЭУ-40	НЭУ-41	НЭУ-42	НЭУ-43	НЭУ-44	НЭУ-45	НЭУ-46	НЭУ-47
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,026	0,031	0,029	0,037	0,007	0,029	0,032	0,010	0,044	0,010	0,012	0,011	0,014	0,009
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	494,6	595,4	553,9	715,6	134,2	559,8	623,4	197,7	842,4	191,6	241,0	220,5	275,1	173,7
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,061	0,061	0,061	0,061	0,051	0,061	0,061	0,051	0,061	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,023	0,023	0,023	0,023	0,020	0,023	0,023	0,020	0,023	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,080	0,080	0,080	0,080	0,067	0,080	0,080	0,067	0,080	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
КПД Карно в I контуре, $\eta_{сI}$	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,128	0,128	0,128	0,128	0,108	0,128	0,128	0,108	0,128	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	67,44	67,44	67,44	67,44	56,49	67,44	67,44	56,49	67,44	56,49	56,49	56,49	56,49	56,49
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	3,083	3,083	3,083	3,083	1,894	3,083	3,083	1,898	3,083	1,894	1,898	1,901	1,901	1,894
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИД II}$	0,153	0,153	0,153	0,308	0,044	0,153	0,308	0,088	0,308	0,044	0,088	0,089	0,088	0,044
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{в II}$	0,059	0,059	0,059	0,118	0,017	0,059	0,118	0,034	0,118	0,017	0,034	0,034	0,034	0,017
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,224	0,224	0,224	0,269	0,245	0,224	0,269	0,268	0,269	0,245	0,268	0,269	0,269	0,245
КПД Карно во II контуре, $\eta_{сII}$	0,676	0,676	0,676	0,676	0,472	0,676	0,676	0,473	0,676	0,472	0,473	0,474	0,474	0,472
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,331	0,331	0,331	0,398	0,518	0,331	0,398	0,567	0,398	0,518	0,567	0,568	0,568	0,518
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,430	0,430	0,430	0,430	0,273	0,430	0,430	0,274	0,430	0,273	0,274	0,275	0,275	0,273
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{уд II}$	168,9	168,9	168,9	340,0	49,13	168,9	340,0	97,18	339,9	49,13	97,30	97,89	97,30	49,13
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	3,068	3,068	3,068	2,343	2,015	3,068	2,343	1,530	2,343	2,015	1,530	1,532	1,532	2,015
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИД III}$	0,087	0,087	0,120	0,118	0,017	0,120	0,146	0,027	0,146	0,032	0,027	0,044	0,044	0,017
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{в III}$	0,033	0,033	0,046	0,045	0,006	0,046	0,056	0,010	0,056	0,012	0,010	0,017	0,017	0,006
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{IV}$	0,121	0,121	0,118	0,130	0,096	0,118	0,113	0,117	0,113	0,119	0,117	0,117	0,117	0,096
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,674	0,674	0,674	0,573	0,504	0,674	0,573	0,346	0,573	0,504	0,346	0,347	0,347	0,504
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,179	0,179	0,176	0,227	0,190	0,176	0,198	0,337	0,198	0,236	0,337	0,338	0,338	0,190
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{NIII}$	0,429	0,429	0,429	0,347	0,296	0,429	0,347	0,191	0,347	0,296	0,191	0,192	0,192	0,296
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{уд III}$	96,17	96,17	133,1	130,9	18,65	133,1	161,5	29,58	161,5	35,29	29,69	48,32	48,32	18,65

Продолжение таблицы 3.9

Параметр	НЭУ-34	НЭУ-35	НЭУ-36	НЭУ-37	НЭУ-38	НЭУ-39	НЭУ-40	НЭУ-41	НЭУ-42	НЭУ-43	НЭУ-44	НЭУ-45	НЭУ-46	НЭУ-47
Отношение температур в IV контуре, $\tau_{IV}$	3,227	3,227	2,813	2,550	2,234	2,898	2,288	1,740	2,288	1,999	1,738	1,557	1,557	2,237
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в IV контуре, $K_{вИВ}$	0,147	0,238	0,167	0,160	0,009	0,172	0,049	0,013	0,248	0,046	0,052	0,016	0,066	0,045
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в IV контуре, $K_{вIV}$	0,056	0,091	0,064	0,062	0,003	0,066	0,019	0,005	0,095	0,018	0,020	0,006	0,025	0,017
Тепловой КПД в IV контуре, $\eta_{IV}$	0,177	0,217	0,186	0,161	0,061	0,145	0,060	0,069	0,161	0,146	0,141	0,074	0,150	0,160
КПД Карно в IV контуре, $\eta_{cIV}$	0,690	0,690	0,644	0,608	0,552	0,655	0,563	0,425	0,563	0,500	0,425	0,358	0,358	0,553
Эксергетический КПД в IV контуре, $\eta_{exIV}$	0,256	0,314	0,288	0,265	0,110	0,221	0,107	0,162	0,286	0,292	0,332	0,206	0,420	0,290
КПД Карзона-Новикова в IV контуре, $\eta_{NIV}$	0,443	0,443	0,404	0,374	0,331	0,413	0,339	0,242	0,339	0,293	0,241	0,199	0,199	0,331
Удельная мощность IV контура на 1 кг СПГ, $W_{удIV}$	162,1	262,9	184,6	177,3	9,927	190,4	54,38	14,44	273,6	50,70	57,49	17,82	73,00	49,43
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в НЭУ $K_{вИДНЭУ}$	0,214	0,214	0,214	0,369	0,096	0,214	0,369	0,139	0,369	0,096	0,139	0,140	0,139	0,096
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,082	0,082	0,082	0,141	0,037	0,082	0,141	0,053	0,141	0,037	0,053	0,054	0,053	0,037
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{cНЭУ}$	0,397	0,399	0,398	0,401	0,390	0,398	0,399	0,391	0,404	0,391	0,392	0,391	0,393	0,390
КПД Карно НЭУ, $\eta_{cНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,477	0,479	0,478	0,482	0,468	0,478	0,480	0,469	0,485	0,469	0,470	0,470	0,471	0,469
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{NНЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{cNНЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,462	0,462	0,462	0,797	0,207	0,462	0,797	0,301	0,797	0,207	0,301	0,302	0,301	0,207
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,255	0,291	0,271	0,328	0,113	0,261	0,274	0,154	0,333	0,150	0,181	0,164	0,195	0,141
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,017	0,017	0,017	0,017	0,015	0,017	0,017	0,015	0,017	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	0,044	0,044	0,044	0,088	0,013	0,044	0,088	0,025	0,088	0,013	0,025	0,025	0,025	0,013
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	0,025	0,025	0,034	0,034	0,005	0,034	0,042	0,008	0,042	0,009	0,008	0,012	0,012	0,005
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно IV контура, $K_{IV}$	0,042	0,068	0,048	0,046	0,003	0,049	0,014	0,004	0,071	0,013	0,015	0,005	0,019	0,013
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{cНЭУ}$	0,392	0,408	0,392	0,396	0,380	0,394	0,393	0,392	0,400	0,393	0,390	0,398	0,394	0,392

Таблица 3.10 – Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ

Параметр	НЭУ-48	НЭУ-49	НЭУ-50	НЭУ-51	НЭУ-52	НЭУ-53	НЭУ-54	НЭУ-55	НЭУ-56	НЭУ-57	НЭУ-58	НЭУ-59	НЭУ-60	НЭУ-61
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,097	0,085	0,103	0,105	0,085	0,088	0,116	0,078	0,103	0,069	0,066	0,085	0,074	0,068
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	1868,562	1643,329	2000,107	2036,286	1638,105	1704,941	2237,823	1505,299	1993,364	1333,158	1278,056	1652,144	1424,901	1310,048
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	2,988	2,988	2,728	3,360	3,172	2,728	2,778	2,742	2,778	2,930	2,742	2,742	2,742	3,172
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИДI}$	0,073	0,073	0,064	0,086	0,071	0,064	0,065	0,055	0,065	0,062	0,055	0,055	0,055	0,071
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{вI}$	0,028	0,028	0,024	0,033	0,027	0,024	0,025	0,021	0,025	0,024	0,021	0,021	0,021	0,027
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,087	0,087	0,081	0,092	0,080	0,081	0,082	0,071	0,082	0,075	0,071	0,071	0,071	0,080
КПД Карно в I контуре, $\eta_{сI}$	0,665	0,665	0,633	0,702	0,685	0,633	0,640	0,635	0,640	0,659	0,635	0,635	0,635	0,685
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,130	0,130	0,128	0,130	0,117	0,128	0,128	0,111	0,128	0,114	0,111	0,111	0,111	0,117
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,422	0,422	0,395	0,454	0,439	0,395	0,400	0,396	0,400	0,416	0,396	0,396	0,396	0,439
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{удI}$	81,13	81,13	70,20	95,49	78,48	70,20	72,21	60,99	72,21	68,97	60,99	60,99	60,99	78,48
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	3,507	3,507	3,090	3,572	2,020	3,090	3,090	1,829	3,090	1,905	1,829	1,829	1,829	2,020
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИДII}$	0,212	0,212	0,139	0,287	0,057	0,139	0,274	0,073	0,274	0,046	0,073	0,073	0,073	0,057
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{вII}$	0,081	0,081	0,053	0,110	0,022	0,053	0,105	0,028	0,105	0,018	0,028	0,028	0,028	0,022
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,260	0,260	0,199	0,221	0,194	0,199	0,241	0,218	0,241	0,194	0,218	0,218	0,218	0,194
КПД Карно во II контуре, $\eta_{сII}$	0,715	0,715	0,676	0,720	0,505	0,676	0,676	0,453	0,676	0,475	0,453	0,453	0,453	0,505
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,364	0,364	0,294	0,307	0,384	0,294	0,356	0,480	0,356	0,408	0,480	0,480	0,480	0,384
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,466	0,466	0,431	0,471	0,296	0,431	0,431	0,261	0,431	0,275	0,261	0,261	0,261	0,296
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{удII}$	233,8	233,8	153,3	317,7	63,21	153,3	303,2	80,37	303,2	50,89	80,37	80,37	80,37	63,22
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	3,774	3,774	3,732	3,084	2,477	3,766	3,023	2,012	3,023	2,477	2,012	2,012	2,012	2,477
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИДIII}$	0,201	0,201	0,340	0,275	0,056	0,340	0,463	0,028	0,463	0,097	0,028	0,161	0,161	0,056
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{вIII}$	0,077	0,077	0,130	0,106	0,022	0,130	0,178	0,011	0,178	0,037	0,011	0,062	0,062	0,022
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{IV}$	0,218	0,218	0,290	0,225	0,222	0,290	0,289	0,130	0,289	0,288	0,130	0,325	0,325	0,222
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,735	0,735	0,732	0,676	0,596	0,734	0,669	0,503	0,669	0,596	0,503	0,503	0,503	0,596
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,296	0,296	0,396	0,333	0,373	0,395	0,432	0,259	0,432	0,483	0,259	0,645	0,645	0,373
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{NIII}$	0,485	0,485	0,482	0,431	0,365	0,485	0,425	0,295	0,425	0,365	0,295	0,295	0,295	0,365
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{удIII}$	222,3	222,3	375,4	304,0	62,32	375,4	512,0	30,67	512,0	107,3	30,67	177,5	177,5	62,32

Продолжение таблицы 3.10

Параметр	НЭУ-48	НЭУ-49	НЭУ-50	НЭУ-51	НЭУ-52	НЭУ-53	НЭУ-54	НЭУ-55	НЭУ-56	НЭУ-57	НЭУ-58	НЭУ-59	НЭУ-60	НЭУ-61
Отношение температур в IV контуре, $\tau_{IV}$	2,155	2,134	2,155	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в IV контуре, $K_{видIV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в IV контуре, $K_{вIV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в IV контуре, $\eta_{IV}$	0,091	0,305	0,091	0,087	0,091	0,305	0,091	0,197	0,305	0,305	0,305	0,197	0,305	0,305
КПД Карно в IV контуре, $\eta_{cIV}$	0,536	0,531	0,536	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531
Эксергетический КПД в IV контуре, $\eta_{exIV}$	0,169	0,575	0,169	0,163	0,171	0,575	0,171	0,370	0,575	0,575	0,575	0,370	0,575	0,575
КПД Карзона-Новикова в IV контуре, $\eta_{NIV}$	0,319	0,315	0,319	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
Удельная мощность IV контура на 1 кг СПГ, $W_{удIV}$	1331,263	1106,030	1401,232	1319,155	1434,087	1106,030	1350,490	1333,272	1106,030	1106,030	1106,030	1333,272	1106,030	1106,030
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в ЭУ $K_{видНЭУ}$	0,285	0,285	0,202	0,374	0,128	0,202	0,340	0,128	0,340	0,108	0,128	0,128	0,128	0,128
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,109	0,109	0,078	0,143	0,049	0,078	0,130	0,049	0,130	0,042	0,049	0,049	0,049	0,049
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{цНЭУ}$	0,424	0,420	0,427	0,428	0,420	0,421	0,432	0,417	0,427	0,414	0,413	0,420	0,416	0,413
КПД Карно НЭУ, $\eta_{cНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,510	0,504	0,513	0,514	0,504	0,506	0,518	0,501	0,512	0,497	0,495	0,504	0,499	0,496
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{NНЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{цNНЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,616	0,616	0,437	0,809	0,277	0,437	0,735	0,277	0,735	0,235	0,277	0,277	0,277	0,277
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,068	0,293	0,074	0,075	0,061	0,295	0,084	0,150	0,318	0,342	0,258	0,162	0,278	0,258
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,019	0,019	0,018	0,020	0,017	0,018	0,018	0,015	0,018	0,016	0,015	0,015	0,015	0,017
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	0,055	0,055	0,039	0,067	0,014	0,039	0,075	0,020	0,075	0,012	0,020	0,020	0,020	0,014
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	0,052	0,052	0,095	0,064	0,014	0,095	0,127	0,008	0,127	0,026	0,008	0,045	0,045	0,014
Коэффициент использования доп. работы по циклу Карно IV контура, $K_{IV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{цНЭУ}$	0,423	0,417	0,425	0,422	0,408	0,423	0,435	0,412	0,422	0,414	0,417	0,425	0,418	0,414

Таблица 3.11 – Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ

Параметр	НЭУ-62	НЭУ-63	НЭУ-64	НЭУ-65	НЭУ-66	НЭУ-67	НЭУ-68	НЭУ-69	НЭУ-70	НЭУ-71	НЭУ-72	НЭУ-73	НЭУ-74	НЭУ-75
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,199	0,176	0,176	0,241	0,190	0,260	0,219	0,217	0,278	0,252	0,193	0,193	0,254	0,190
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	3851,833	3401,977	3401,977	4671,741	3681,786	5027,756	4234,281	4189,693	5377,396	4873,164	3738,396	3738,396	4915,765	3683,659
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	4,194	4,194	4,194	2,863	4,868	4,194	2,863	3,799	2,863	4,868	3,799	3,799	3,799	4,868
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИД I}$	0,116	0,116	0,116	0,069	0,130	0,116	0,069	0,094	0,069	0,130	0,094	0,094	0,094	0,130
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{в I}$	0,045	0,045	0,045	0,026	0,050	0,045	0,026	0,036	0,026	0,050	0,036	0,036	0,036	0,050
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,099	0,099	0,099	0,084	0,095	0,099	0,084	0,089	0,084	0,095	0,089	0,089	0,089	0,095
КПД Карно в I контуре, $\eta_{сI}$	0,762	0,762	0,762	0,651	0,795	0,762	0,651	0,737	0,651	0,795	0,737	0,737	0,737	0,795
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,130	0,130	0,130	0,129	0,120	0,130	0,129	0,121	0,129	0,120	0,121	0,121	0,121	0,120
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,512	0,512	0,512	0,409	0,547	0,512	0,409	0,487	0,409	0,547	0,487	0,487	0,487	0,547
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{уд I}$	128,6	128,6	128,6	75,85	143,9	128,6	75,85	103,9	75,80	143,9	103,9	103,9	103,9	143,9
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	4,607	4,607	4,607	4,607	2,840	4,607	4,607	2,840	4,607	2,840	2,840	2,840	2,840	2,840
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИД II}$	0,351	0,351	0,351	0,826	0,142	0,351	0,826	0,259	0,826	0,142	0,259	0,259	0,259	0,142
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{в II}$	0,135	0,135	0,135	0,317	0,054	0,135	0,317	0,100	0,317	0,054	0,100	0,100	0,100	0,054
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,282	0,282	0,282	0,482	0,181	0,282	0,482	0,325	0,482	0,181	0,325	0,325	0,325	0,181
КПД Карно во II контуре, $\eta_{сII}$	0,783	0,783	0,783	0,783	0,648	0,783	0,783	0,648	0,783	0,648	0,648	0,648	0,648	0,648
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,360	0,360	0,360	0,616	0,279	0,360	0,616	0,502	0,616	0,279	0,502	0,502	0,502	0,279
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,534	0,534	0,534	0,534	0,407	0,534	0,534	0,407	0,534	0,407	0,407	0,407	0,407	0,407
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{уд II}$	387,4	387,4	387,4	912,6	156,6	387,4	912,6	286,6	912,4	156,6	286,6	286,6	286,6	156,6
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИД III}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{в III}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{III}$	0,091	0,091	0,305	0,150	0,091	0,305	0,305	0,150	0,305	0,305	0,150	0,305	0,305	0,150
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,171	0,171	0,575	0,282	0,171	0,575	0,575	0,282	0,575	0,575	0,282	0,575	0,575	0,282
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{NIII}$	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{уд III}$	695,0	695,0	2191	1115	704,7	2191	2130	1150	2130	2221	1150	2198	2198	1163

Продолжение таблицы 3.11

Параметр	НЭУ-62	НЭУ-63	НЭУ-64	НЭУ-65	НЭУ-66	НЭУ-67	НЭУ-68	НЭУ-69	НЭУ-70	НЭУ-71	НЭУ-72	НЭУ-73	НЭУ-74	НЭУ-75
Отношение температур в IV контуре, $\tau_{IV}$	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в IV контуре, $K_{видIV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в IV контуре, $K_{вIV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в IV контуре, $\eta_{IV}$	0,243	0,305	0,091	0,243	0,243	0,323	0,150	0,243	0,323	0,323	0,305	0,150	0,323	0,305
КПД Карно в IV контуре, $\eta_{cIV}$	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531
Эксергетический КПД в IV контуре, $\eta_{exIV}$	0,458	0,575	0,171	0,458	0,458	0,609	0,282	0,458	0,609	0,609	0,575	0,282	0,609	0,575
КПД Карзона-Новикова в IV контуре, $\eta_{NIV}$	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
Удельная мощность IV контура на 1 кг СПГ, $W_{удIV}$	2640,791	2190,935	695,042	2567,953	2676,568	2320,821	1115,320	2648,813	2258,718	2352,166	2197,516	1150,378	2327,748	2220,521
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в ЭУ $K_{видНЭУ}$	0,467	0,467	0,467	0,894	0,272	0,467	0,894	0,353	0,894	0,272	0,353	0,353	0,353	0,272
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,179	0,179	0,179	0,343	0,104	0,179	0,343	0,136	0,343	0,104	0,136	0,136	0,136	0,104
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{цНЭУ}$	0,464	0,455	0,455	0,480	0,461	0,488	0,472	0,471	0,495	0,484	0,462	0,462	0,485	0,461
КПД Карно НЭУ, $\eta_{cНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,557	0,546	0,546	0,577	0,553	0,585	0,566	0,565	0,594	0,582	0,554	0,554	0,583	0,553
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{NНЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{цNНЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	1,010	1,010	1,010	1,934	0,588	1,010	1,934	0,764	1,934	0,588	0,764	0,764	0,764	0,588
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,015	0,014	0,014	0,011	0,010	0,021	0,010	0,008	0,013	0,014	0,007	0,007	0,010	0,010
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,022	0,022	0,022	0,018	0,021	0,022	0,018	0,020	0,018	0,021	0,020	0,020	0,020	0,021
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	0,066	0,066	0,066	0,221	0,023	0,066	0,221	0,054	0,221	0,023	0,054	0,054	0,054	0,023
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент использования доп. работы по циклу Карно IV контура, $K_{IV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{цНЭУ}$	0,461	0,451	0,451	0,480	0,459	0,484	0,471	0,472	0,492	0,479	0,468	0,468	0,486	0,460

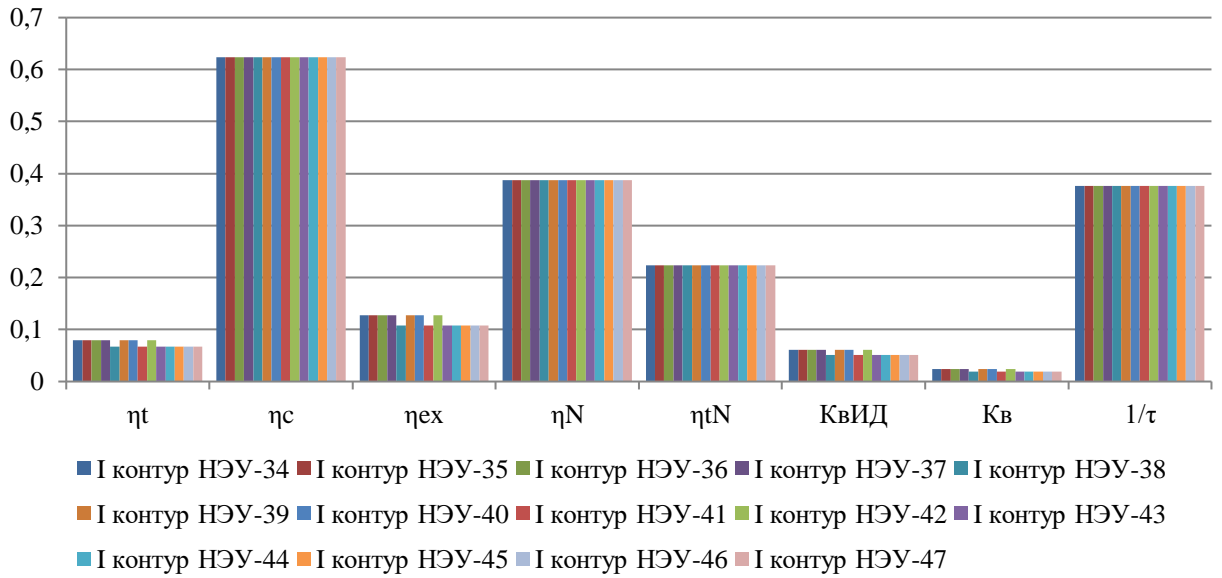
Таблица 3.12 – Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных параллельных НЭУ

Параметр	НЭУ-76	НЭУ-77	НЭУ-78	НЭУ-79	НЭУ-80	НЭУ-81	НЭУ-82	НЭУ-83	НЭУ-84	НЭУ-85	НЭУ-86	НЭУ-87	НЭУ-88	НЭУ-89
Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ, $w$	0,224	0,214	0,214	0,214	0,226	0,203	0,203	0,220	0,244	0,205	0,205	0,205	0,250	0,220
Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта, $q_{СПГ}$ , кВт/кг	4341,905	4143,341	4143,341	4143,341	4372,544	3932,124	3932,124	4258,544	4717,857	3958,555	3958,555	3958,555	4839,927	4258,544
Отношение температур в I контуре, $\tau_I$	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986	5,986
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в I контуре, $K_{вИДI}$	0,178	0,178	0,178	0,178	0,166	0,178	0,178	0,166	0,178	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в I контуре, $K_{вI}$	0,068	0,068	0,068	0,068	0,064	0,068	0,068	0,064	0,068	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Тепловой КПД в I контуре, $\eta_{II}$	0,101	0,101	0,101	0,101	0,097	0,101	0,101	0,097	0,101	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
КПД Карно в I контуре, $\eta_{сI}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД в I контуре, $\eta_{exI}$	0,122	0,122	0,122	0,122	0,116	0,122	0,122	0,116	0,122	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
КПД Карзона-Новикова в I контуре, $\eta_{NI}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
Удельная мощность I контура на 1 кг СПГ, $W_{удI}$	196,6	196,6	196,6	196,6	184,0	196,6	196,6	184,0	196,6	184,0	184,0	184,0	184,0	184,0
Отношение температур во II контуре, $\tau_{II}$	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта во II контуре, $K_{вИДII}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь во II контуре, $K_{вII}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД во II контуре, $\eta_{III}$	0,150	0,150	0,150	0,305	0,150	0,150	0,323	0,323	0,344	0,150	0,323	0,323	0,344	0,150
КПД Карно во II контуре, $\eta_{сII}$	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531
Эксергетический КПД во II контуре, $\eta_{exII}$	0,282	0,282	0,282	0,575	0,282	0,282	0,609	0,609	0,648	0,282	0,609	0,609	0,648	0,282
КПД Карзона-Новикова во II контуре, $\eta_{NII}$	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
Удельная мощность II контура на 1 кг СПГ, $W_{удII}$	757,286	757,286	757,286	1446,245	765,367	757,286	1531,979	1547,945	1543,019	765,367	1547,945	1547,945	1646,739	765,367
Отношение температур в III контуре, $\tau_{III}$	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в III контуре, $K_{вИДIII}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в III контуре, $K_{вIII}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в III контуре, $\eta_{IV}$	0,243	0,243	0,305	0,150	0,243	0,323	0,305	0,150	0,323	0,323	0,150	0,305	0,323	0,243
КПД Карно в III контуре, $\eta_{сIII}$	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531
Эксергетический КПД в III контуре, $\eta_{exIII}$	0,458	0,458	0,575	0,282	0,458	0,609	0,575	0,282	0,609	0,609	0,282	0,575	0,609	0,458
КПД Карзона-Новикова в III контуре, $\eta_{NIII}$	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
Удельная мощность III контура на 1 кг СПГ, $W_{удIII}$	1743	1743	1446	757,3	1761	1532	1446	765,4	1532	1548	765,4	1461	1548	1761

Продолжение таблицы 3.12

Параметр	НЭУ-76	НЭУ-77	НЭУ-78	НЭУ-79	НЭУ-80	НЭУ-81	НЭУ-82	НЭУ-83	НЭУ-84	НЭУ-85	НЭУ-86	НЭУ-87	НЭУ-88	НЭУ-89
Отношение температур в IV контуре, $\tau_{IV}$	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в IV контуре, $K_{видIV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в IV контуре, $K_{вIV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД в IV контуре, $\eta_{IV}$	0,203	0,305	0,243	0,243	0,203	0,305	0,150	0,243	0,305	0,305	0,305	0,150	0,305	0,323
КПД Карно в IV контуре, $\eta_{cIV}$	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531	0,531
Эксергетический КПД в IV контуре, $\eta_{exIV}$	0,381	0,575	0,458	0,458	0,381	0,575	0,282	0,458	0,575	0,575	0,575	0,282	0,575	0,609
КПД Карзона-Новикова в IV контуре, $\eta_{NIV}$	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
Удельная мощность IV контура на 1 кг СПГ, $W_{удIV}$	1644,809	1446,245	1743,195	1743,195	1661,945	1446,245	757,286	1761,276	1446,245	1461,287	1461,287	765,367	1461,287	1547,945
Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта в ЭУ $K_{видНЭУ}$	0,178	0,178	0,178	0,178	0,166	0,178	0,178	0,166	0,178	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166
Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь в НЭУ, $K_{вНЭУ}$	0,068	0,068	0,068	0,068	0,064	0,068	0,068	0,064	0,068	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Тепловой КПД НЭУ, $\eta_{цНЭУ}$	0,474	0,470	0,470	0,470	0,474	0,466	0,466	0,472	0,481	0,466	0,466	0,466	0,484	0,472
КПД Карно НЭУ, $\eta_{cНЭУ}$	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
Эксергетический КПД НЭУ, $\eta_{exНЭУ}$	0,569	0,564	0,564	0,564	0,570	0,559	0,559	0,567	0,578	0,560	0,560	0,560	0,581	0,567
КПД Карзона-Новикова в НЭУ, $\eta_{NНЭУ}$	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени $m$ НЭУ, $\eta_{цNНЭУ}$	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом НЭ только фазового перехода, $\omega_{СПГ}$	0,385	0,385	0,385	0,385	0,360	0,385	0,385	0,360	0,385	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360
Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе НЭУ, $\omega$	0,152	0,164	0,164	0,164	0,155	0,180	0,180	0,172	0,260	0,185	0,185	0,185	0,270	0,172
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно I контура, $K_I$	0,023	0,023	0,023	0,023	0,021	0,023	0,023	0,021	0,023	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно II контура, $K_{II}$	0,087	0,087	0,087	0,166	0,088	0,087	0,176	0,178	0,178	0,088	0,178	0,178	0,190	0,088
Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно III контура, $K_{III}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Коэффициент использования доп. работы по циклу Карно IV контура, $K_{IV}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Тепловой КПД НЭУ через тепловой КПД контуров, $\eta_{цНЭУ}$	0,464	0,465	0,465	0,465	0,462	0,463	0,463	0,469	0,481	0,462	0,462	0,462	0,480	0,469



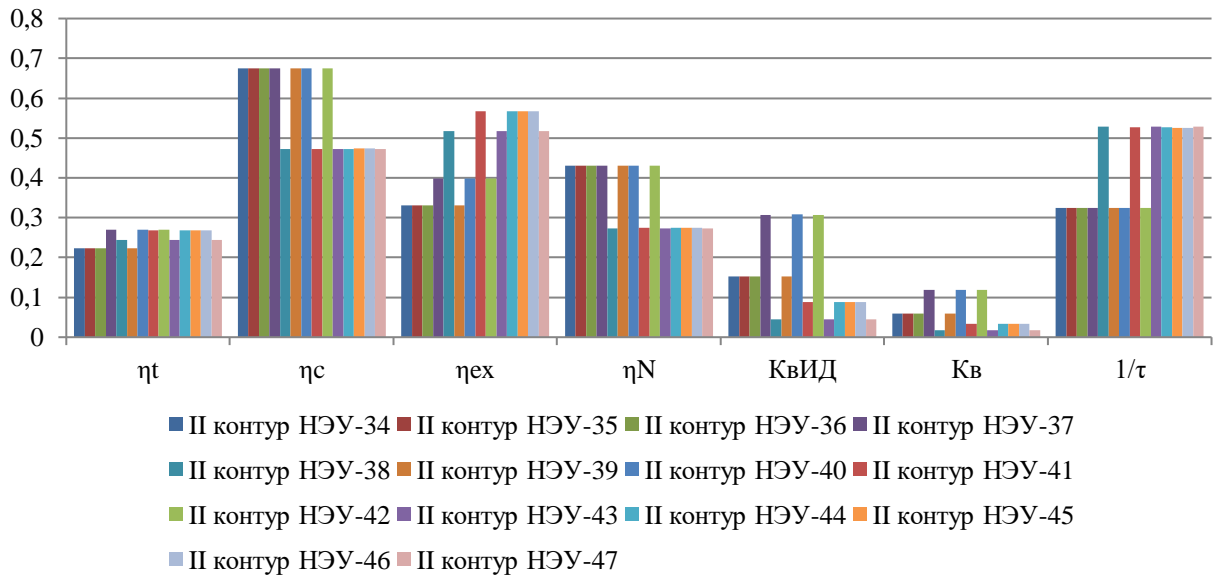


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.40 – Эффективные показатели I контура четырёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

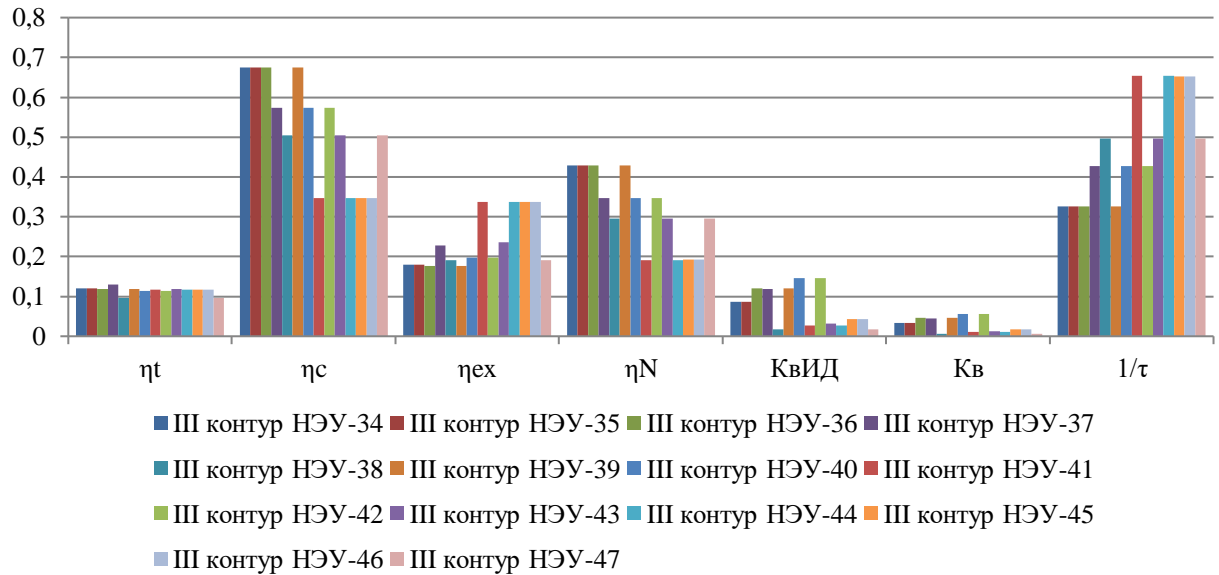


$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.41 – Эффективные показатели II контура четырёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

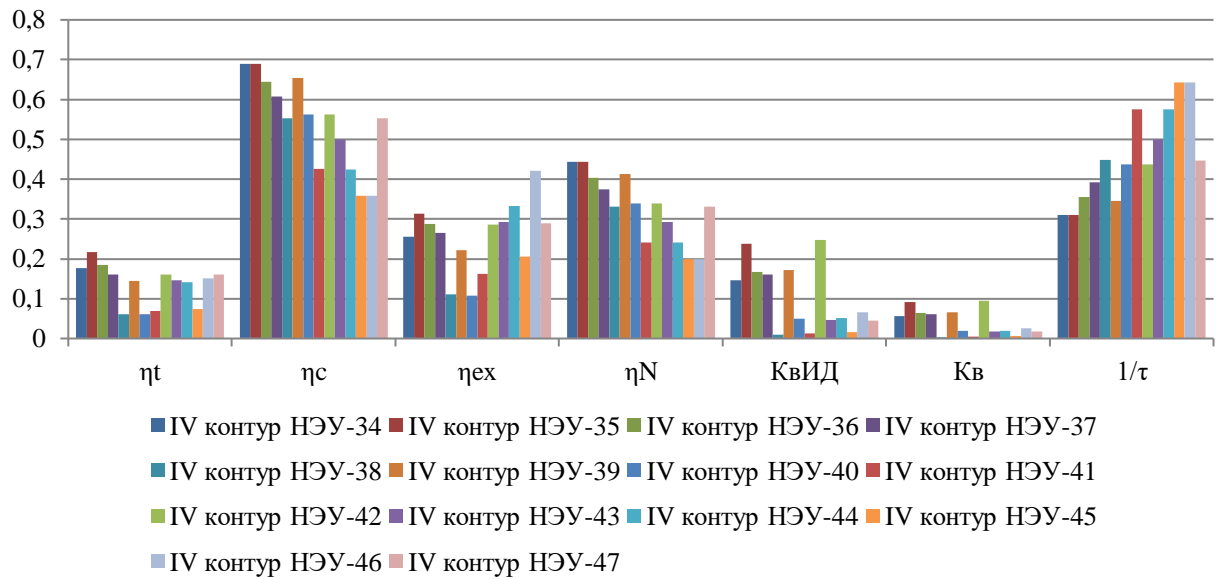
$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.42 – Эффективные показатели III контура четырёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);

$\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);

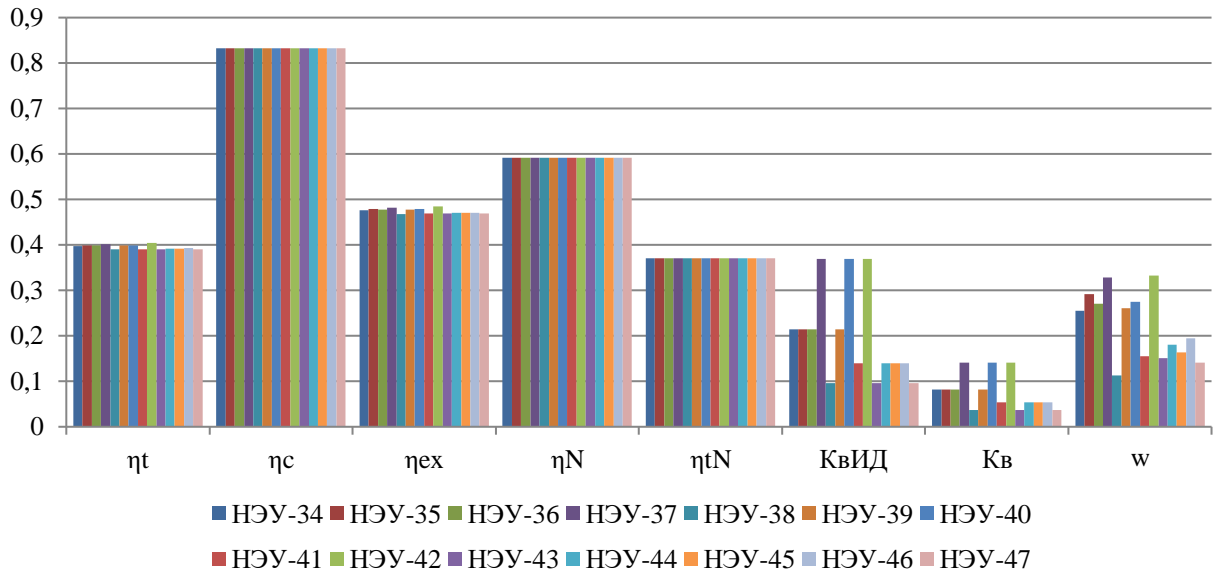
$\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);

$\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.43 – Эффективные показатели IV контура четырёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.44 – Эффективные показатели четырёхконтурных последовательных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

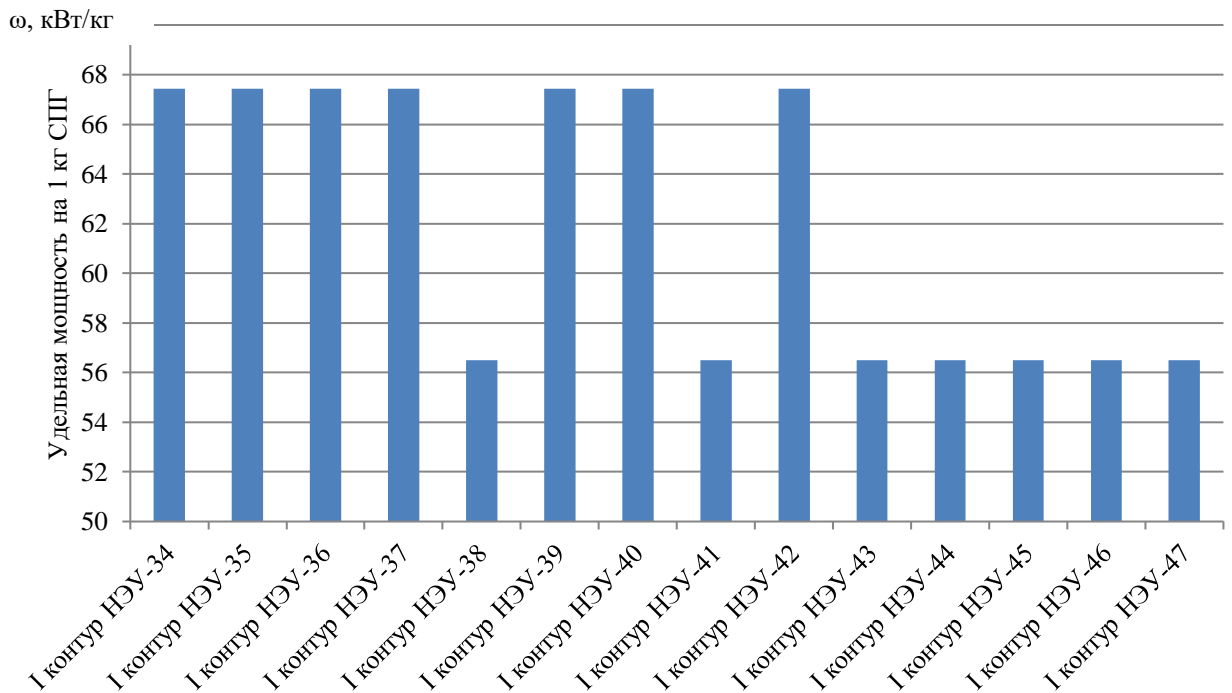


Рисунок 3.45 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в I контуре четырёхконтурных последовательных НЭУ

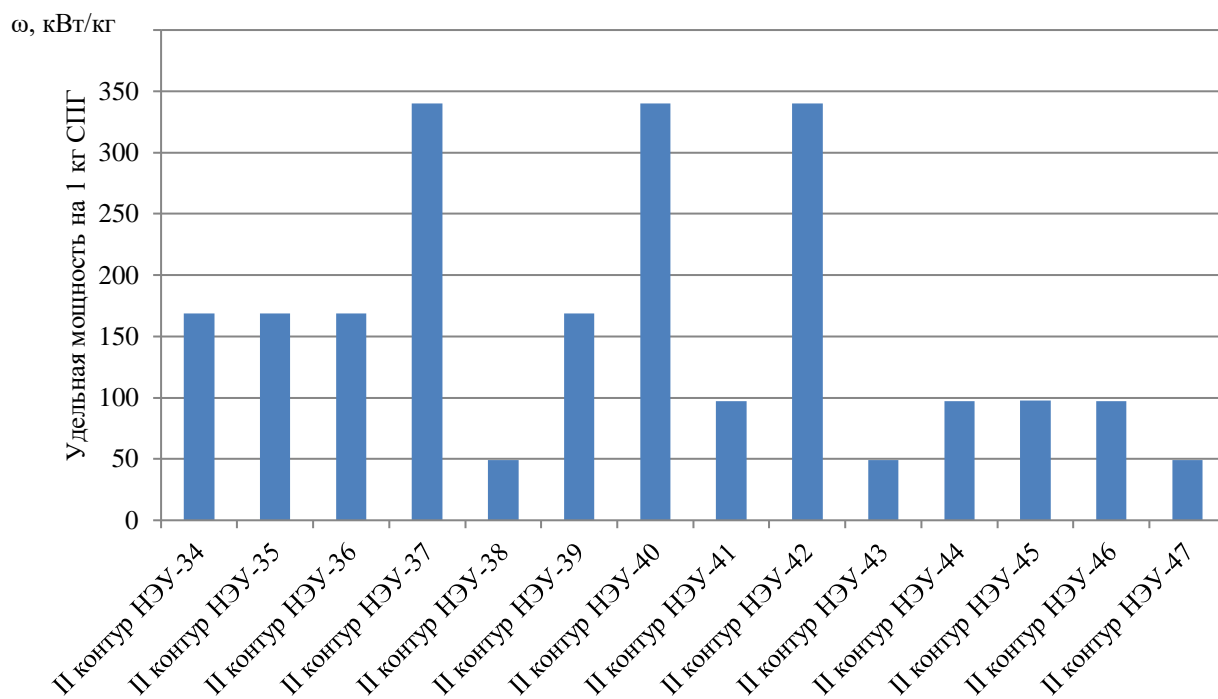


Рисунок 3.46 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) во II контуре четырёхконтурных последовательных НЭУ

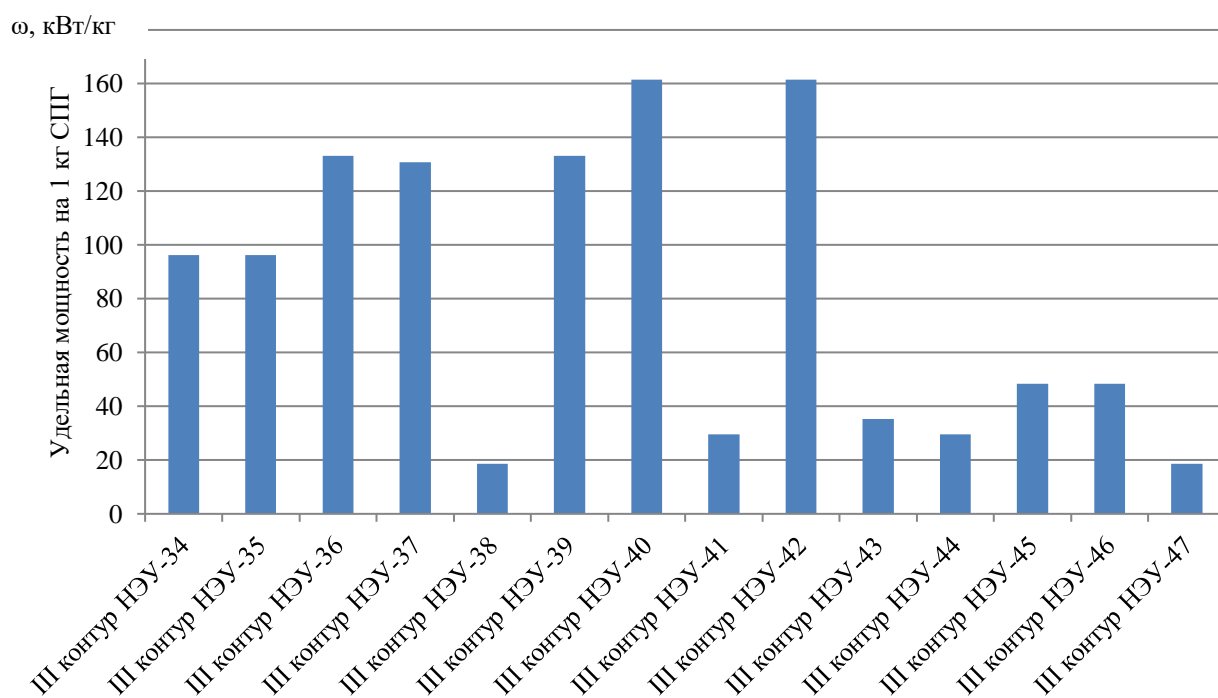


Рисунок 3.47 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в III контуре четырёхконтурных последовательных НЭУ

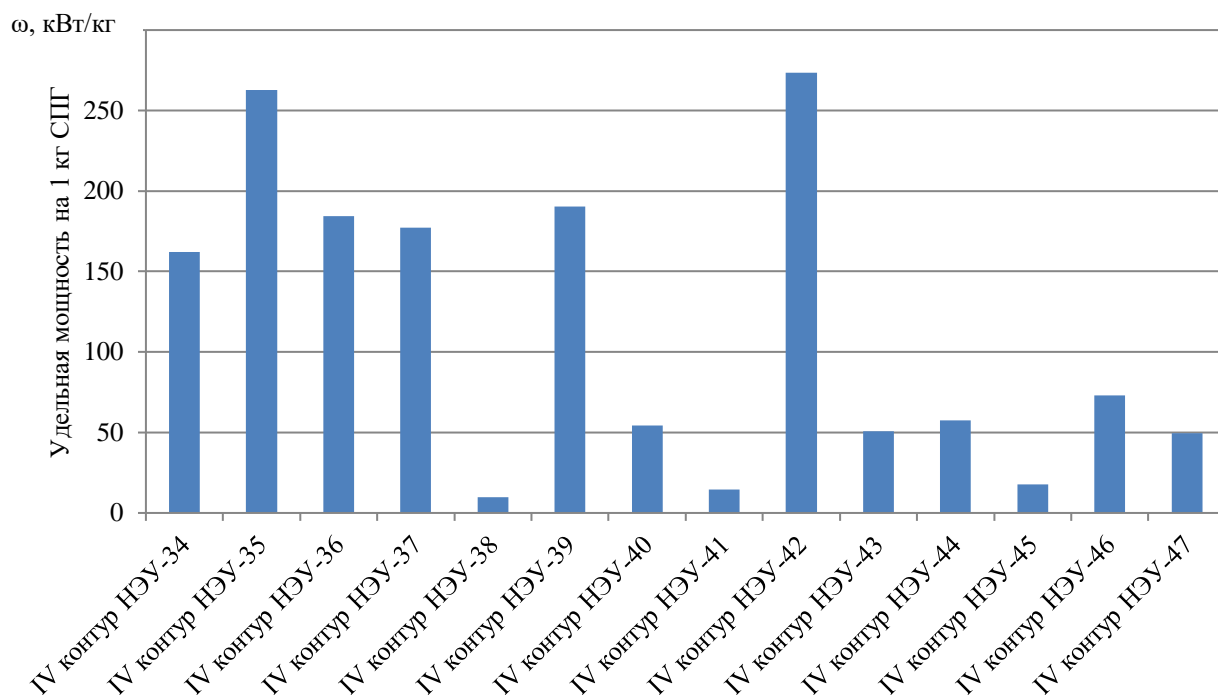
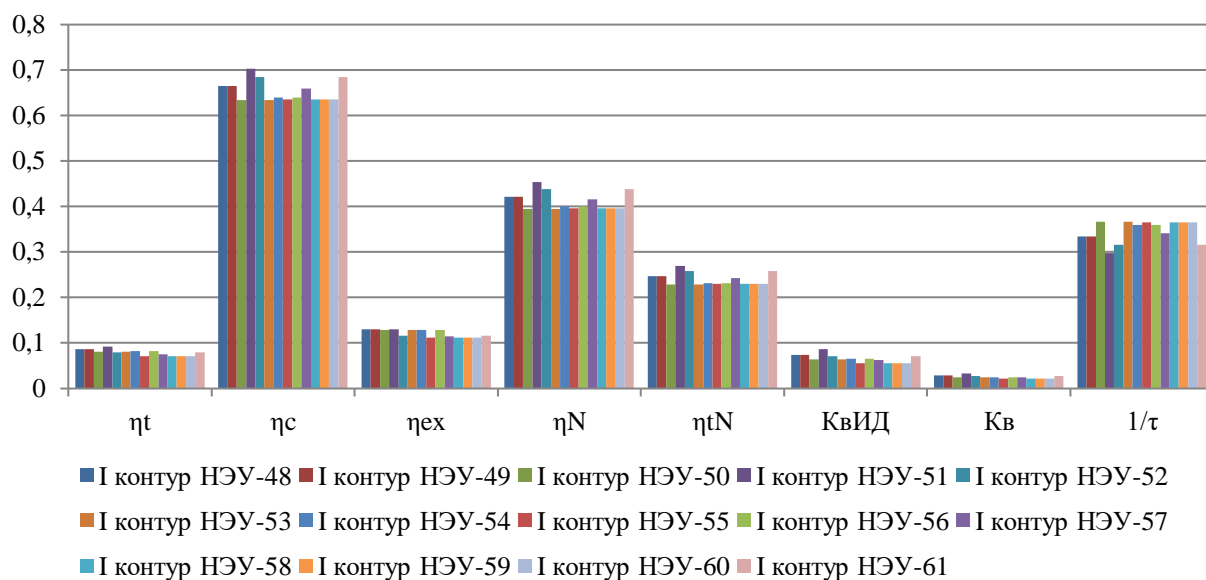


Рисунок 3.48 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в IV контуре четырёхконтурных последовательных НЭУ

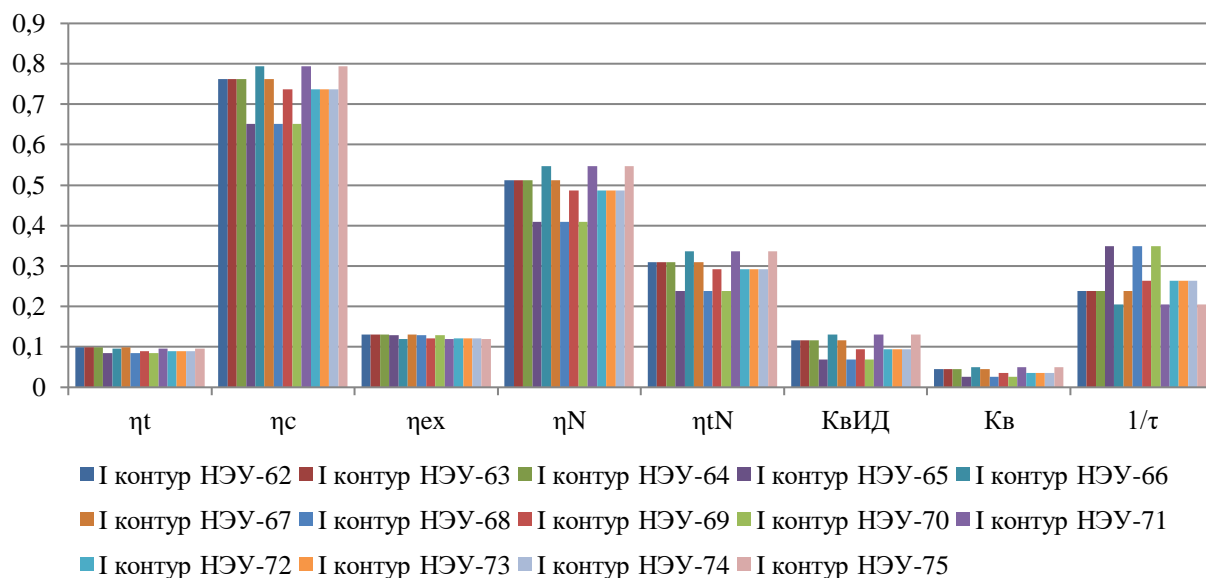
Результаты анализа характеристик четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит два последовательных и два параллельных контура (рисунок А.48 – А.61, приложение А), с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.10.

На рисунках 3.49а – 3.52а представлены показатели эффективности отдельных контуров четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит два последовательных и два параллельных контура. На рисунке 3.53а представлены эффективные показатели данных НЭУ.

На рисунках 3.54а – 3.56 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в I, II и III контурах четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит два последовательных и два параллельных контура. Значения удельной мощности на 1 кг СПГ в IV контуре не вычисляются, так как вырабатываемая мощность в IV контуре не зависит от нижнего температурного уровня всей НЭУ, устанавливаемого температурой криопродукта.



а)



б)

$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

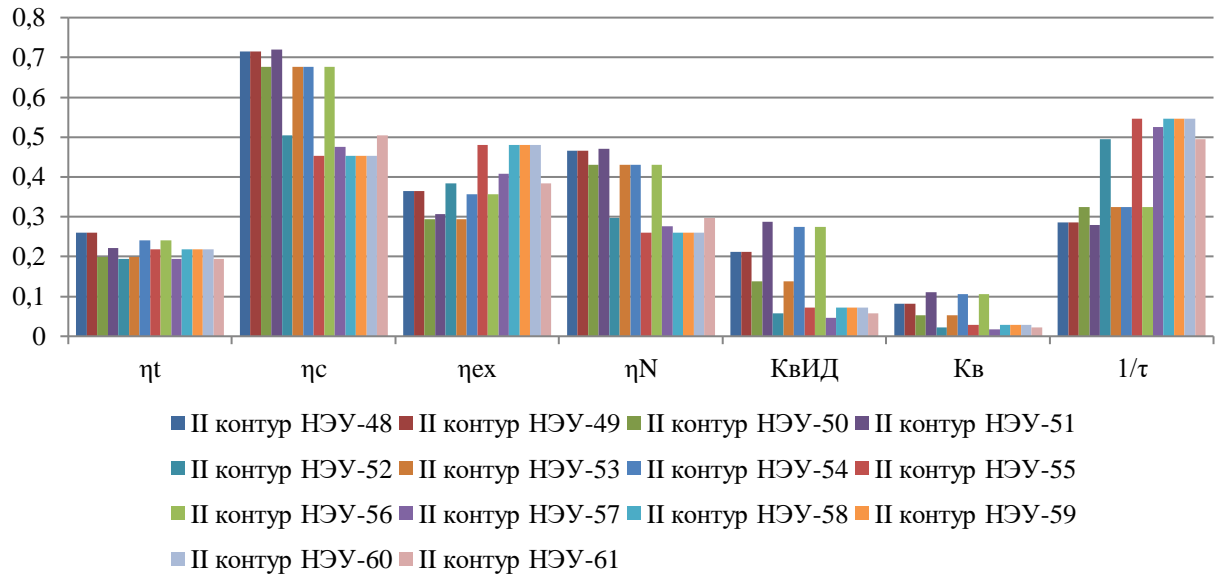
$K_{вИД}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_v$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

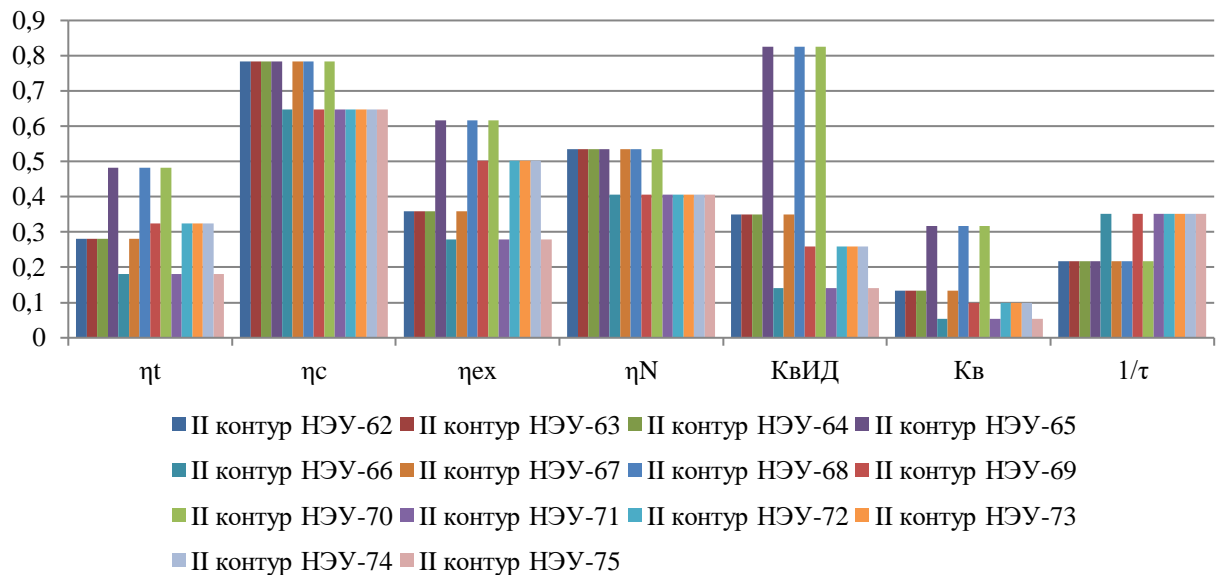
а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

Рисунок 3.49 – Эффективные показатели I контура четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)



а)



б)

$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

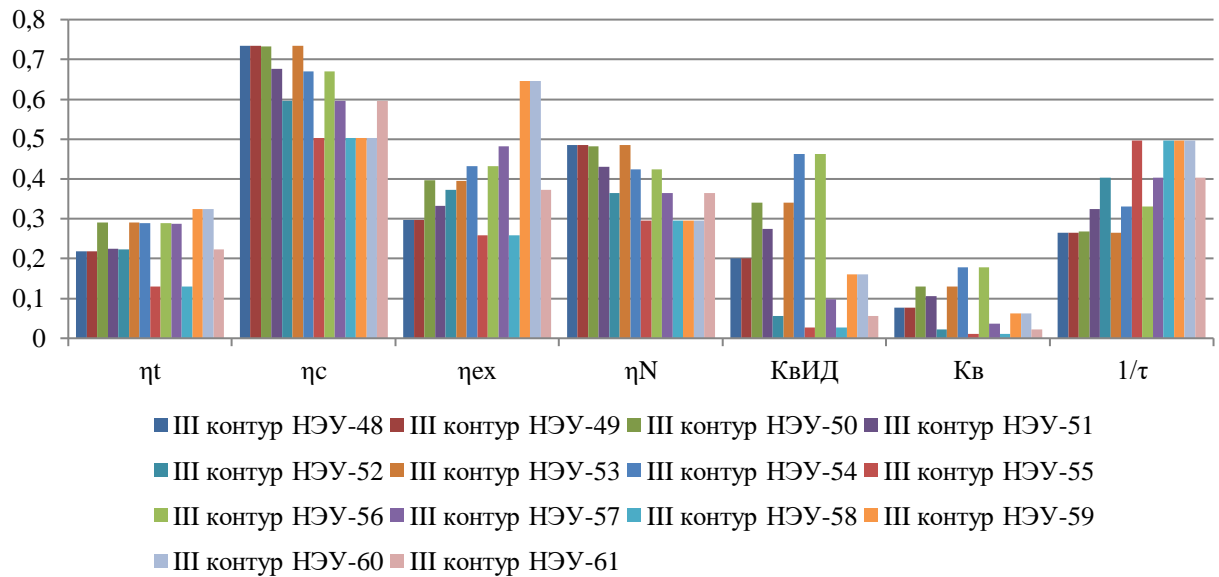
$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

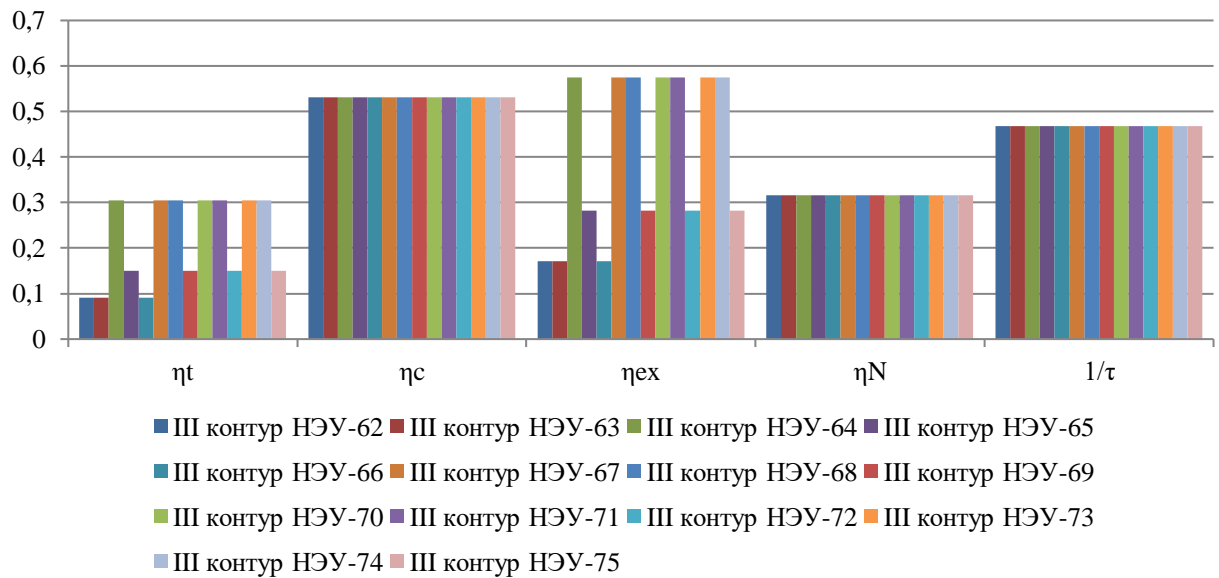
а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

Рисунок 3.50 – Эффективные показатели II контура четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



а)



б)

$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

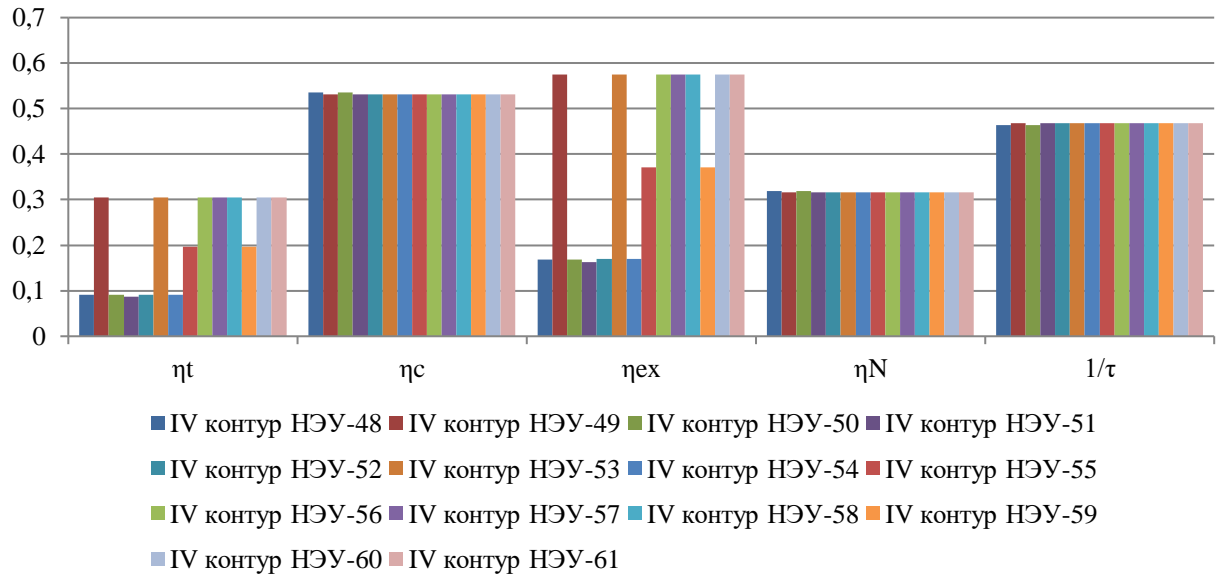
$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

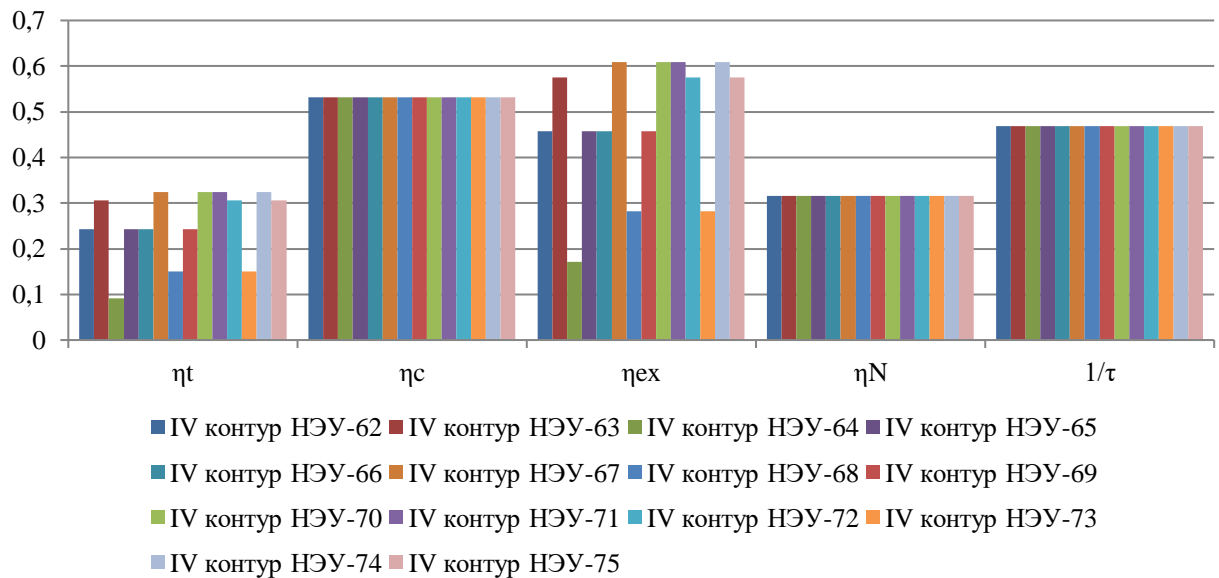
б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

Рисунок 3.51 – Эффективные показатели III контура четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)





а)



б)

$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

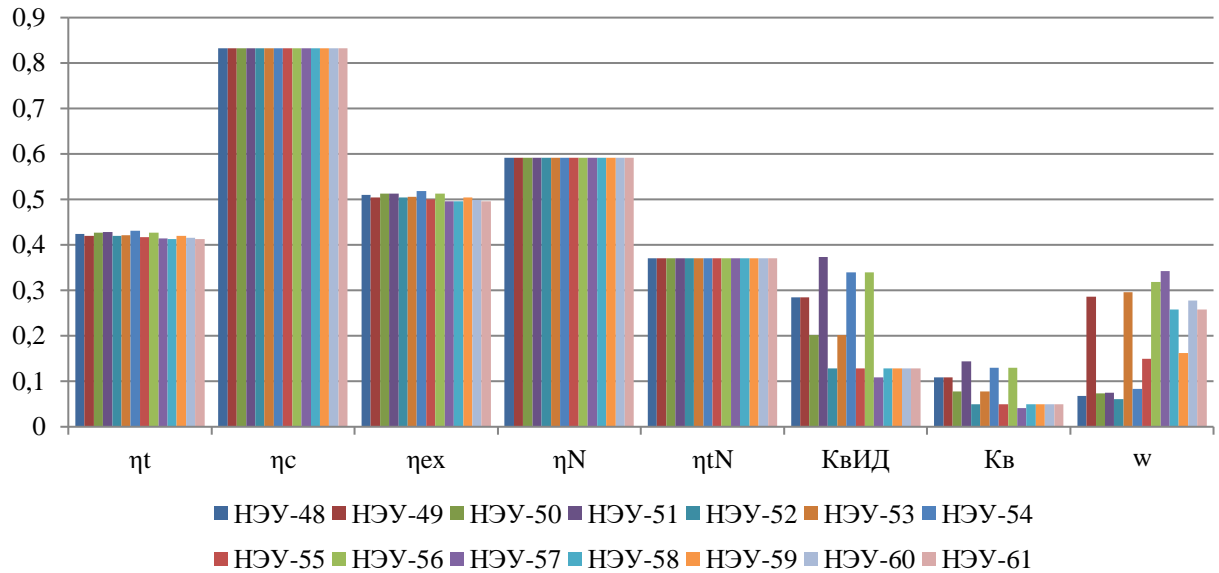
$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

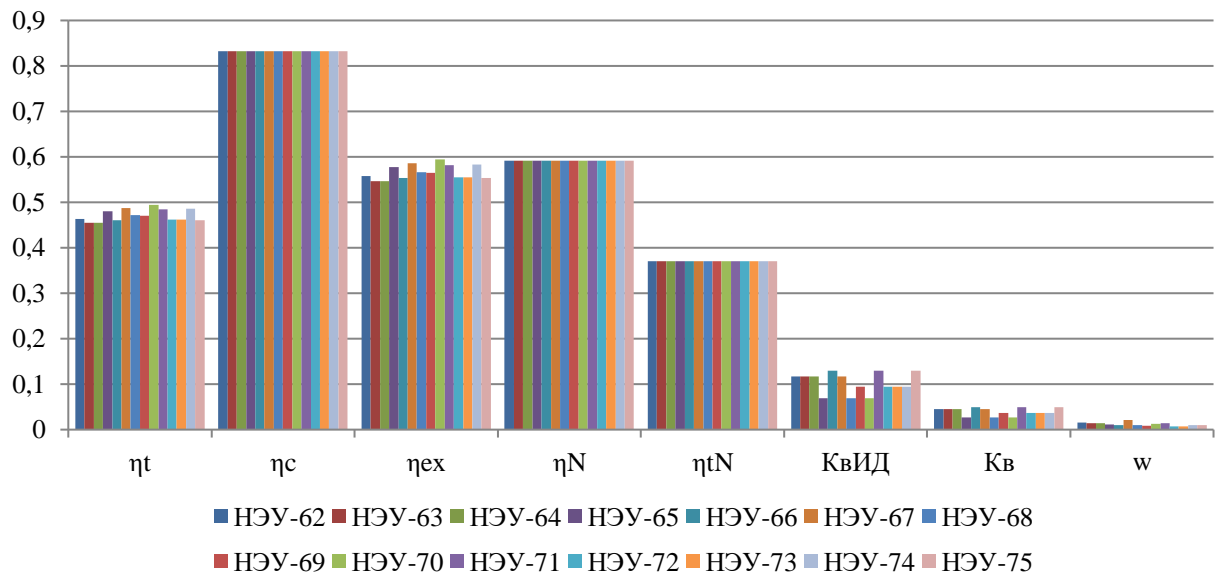
а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

Рисунок 3.52 – Эффективные показатели IV контура четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



а)



б)

$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

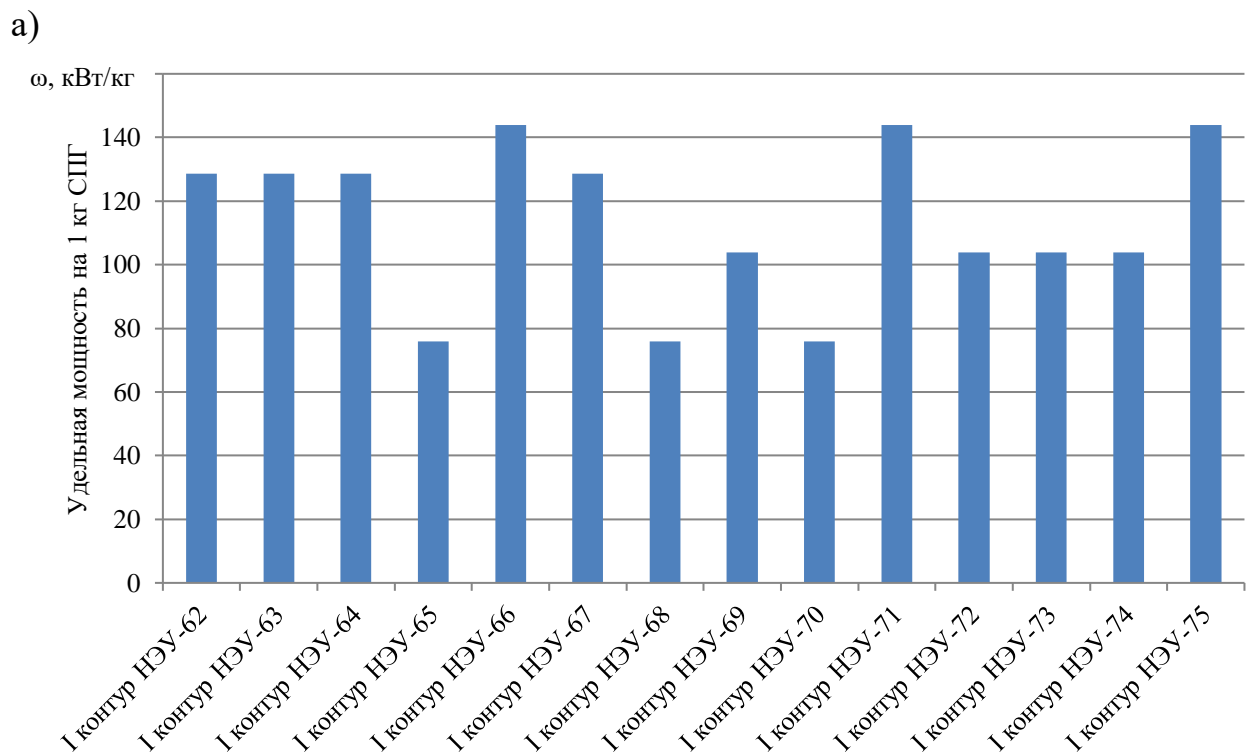
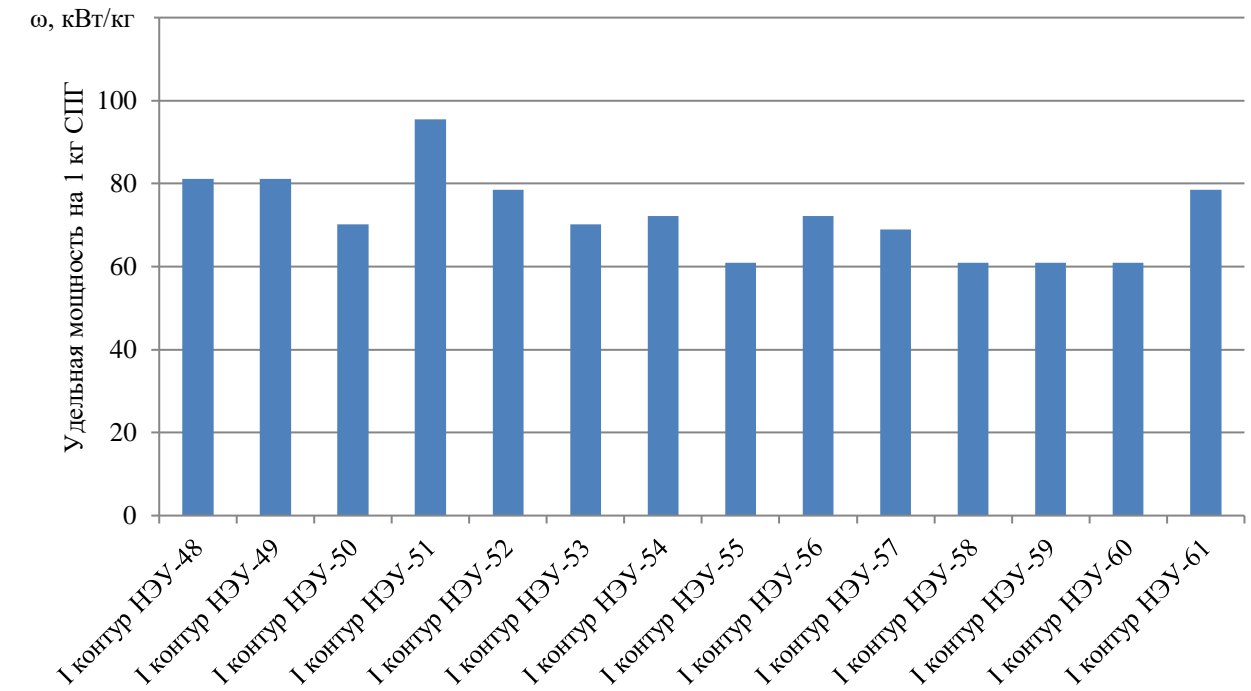
$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);

$K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

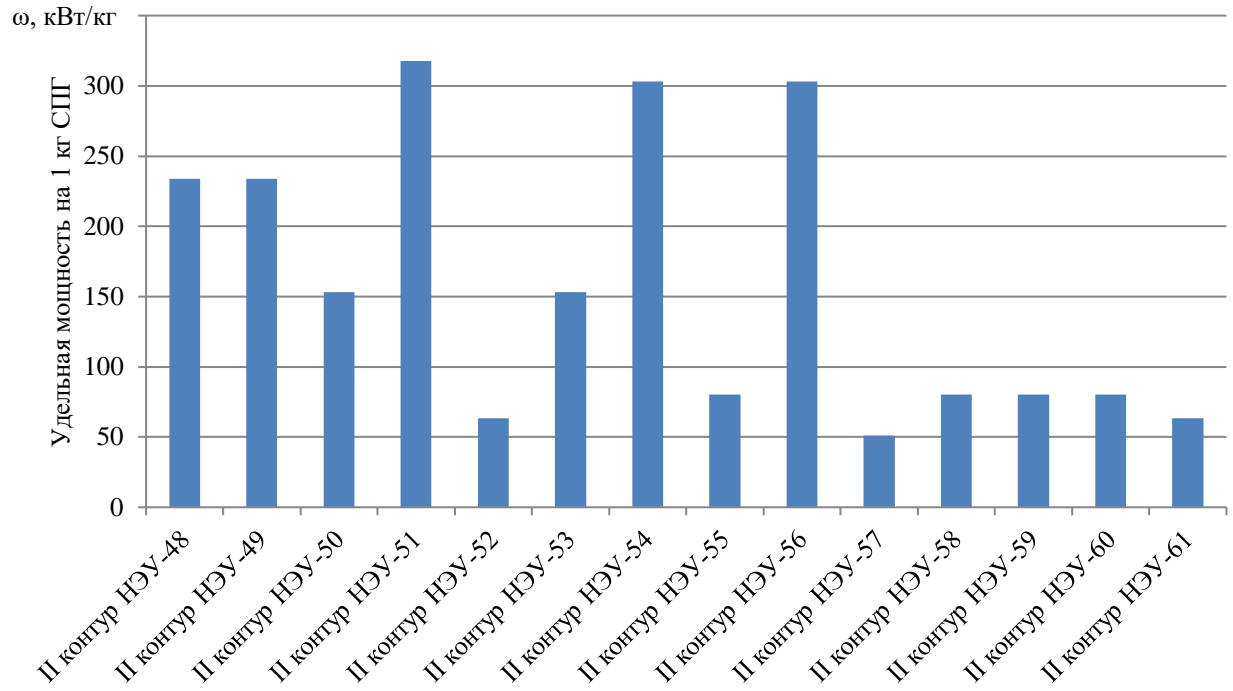
Рисунок 3.53 – Эффективные показатели четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)



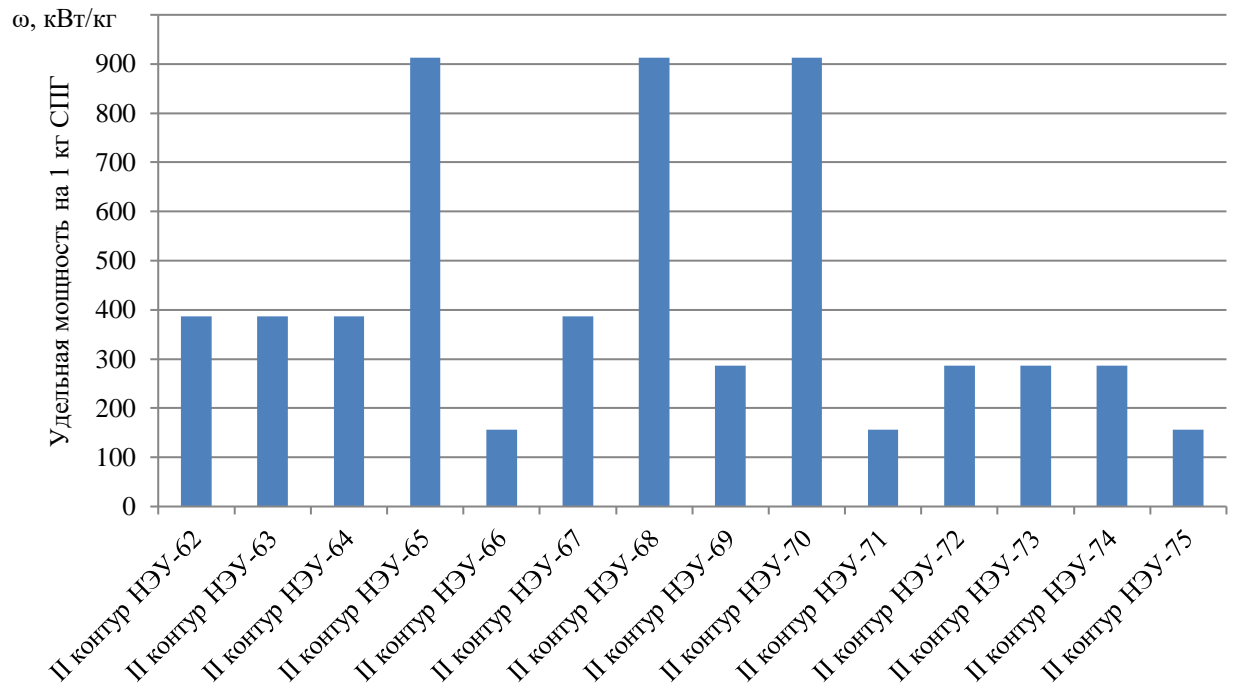
а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

Рисунок 3.54 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в I контуре четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ



а)



а) в состав НЭУ входит два последовательных и два параллельных контура

б) в состав НЭУ входит три последовательных и один параллельный контур

Рисунок 3.55 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) во II контуре четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ

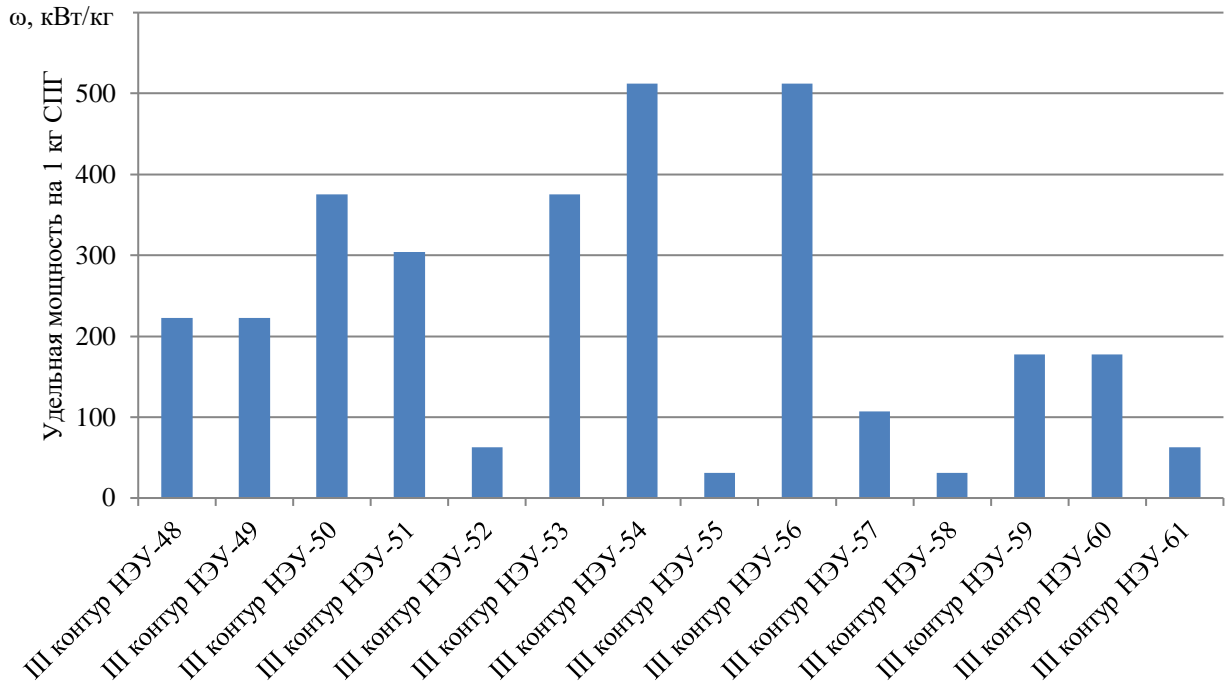
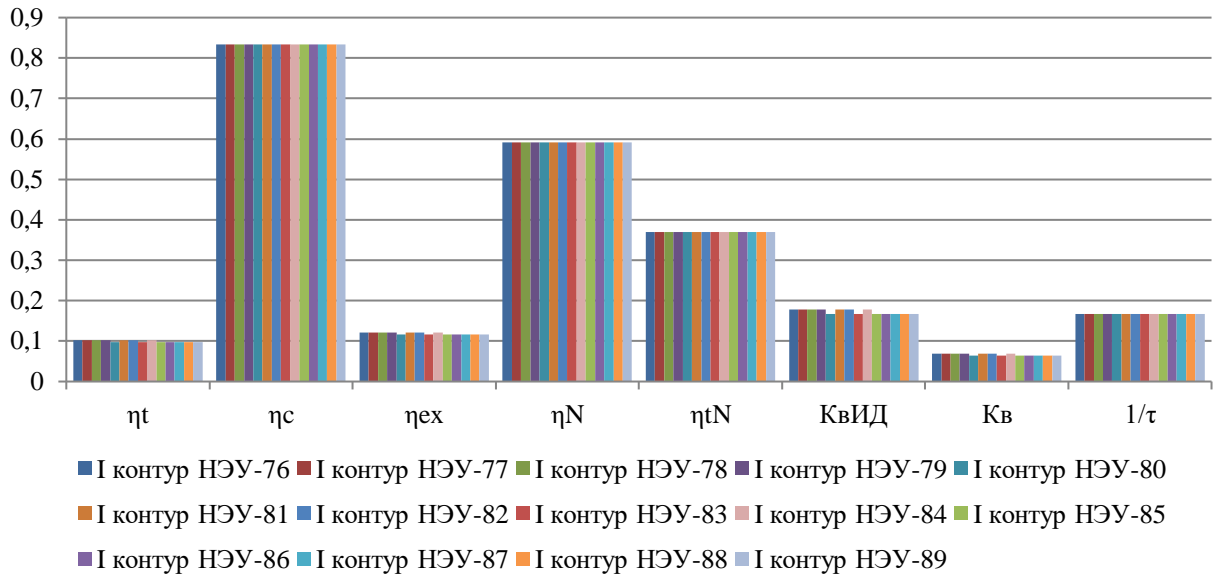


Рисунок 3.56 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в III контуре четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит два последовательных и два параллельных контура

Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит три последовательных и один параллельный контур (рисунок А.62 – А.75, приложение А), с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.11.

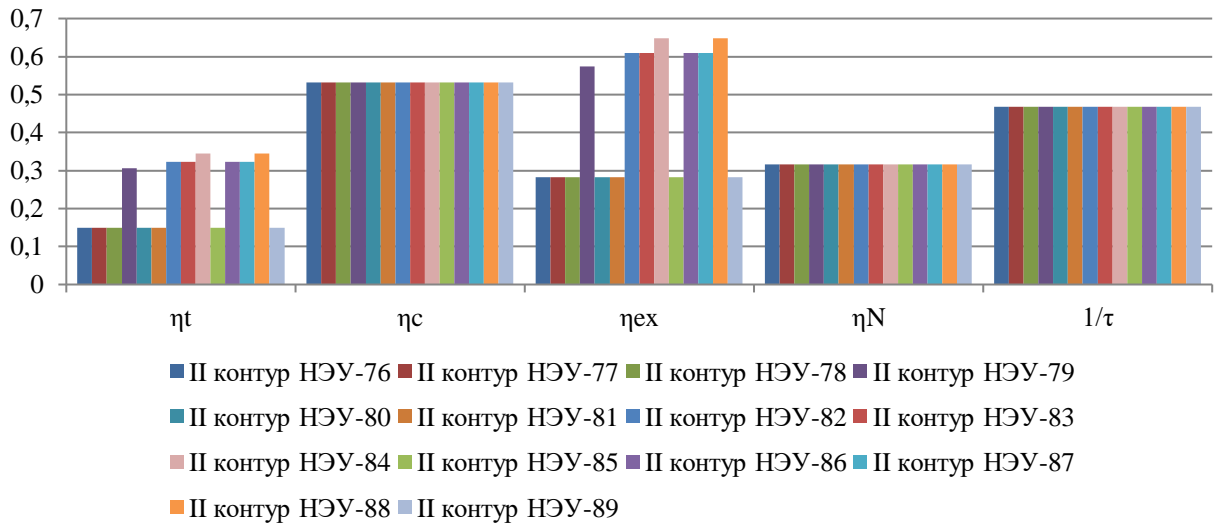
На рисунках 3.49б – 3.52б представлены показатели эффективности отдельных контуров четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит три последовательных и один параллельный контур. На рисунке 3.53б представлены эффективные показатели данных НЭУ.

На рисунках 3.54б – 3.55б представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в I и II четырёхконтурных последовательно-параллельных НЭУ, в состав которых входит три последовательных и один параллельный контур. Значения удельной мощности на 1 кг СПГ в III и IV контурах таких НЭУ не вычисляются, так как вырабатываемая мощность в III и IV контурах не зависит от нижнего температурного уровня всей НЭУ, устанавливаемого температурой криопродукта.



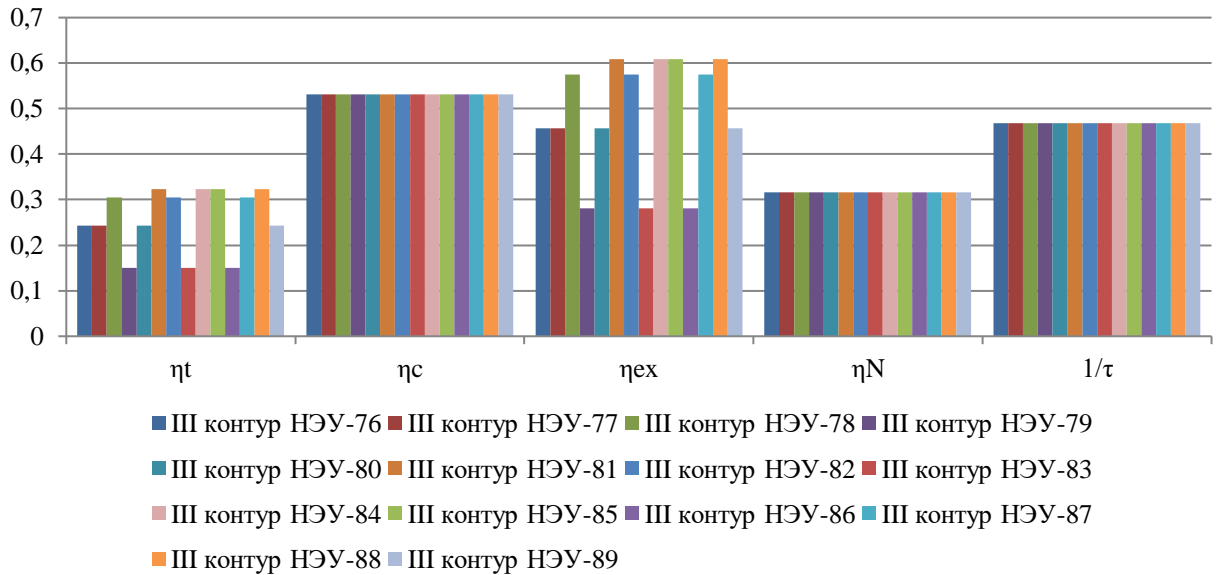
$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);  
 $K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.57 – Эффективные показатели I контура четырёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);  
 $K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

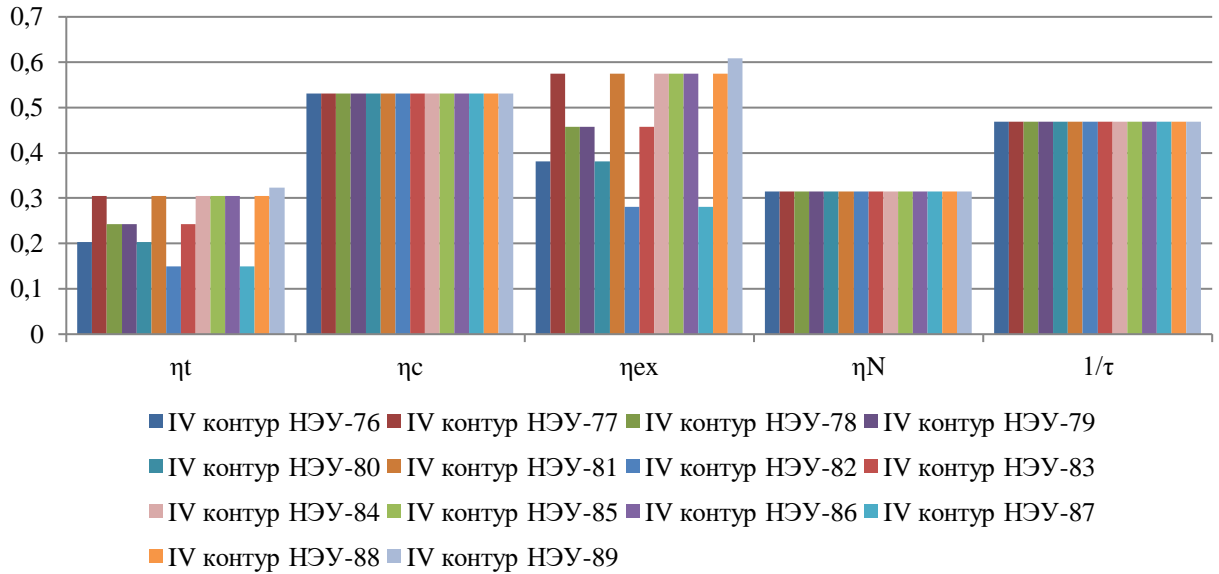
Рисунок 3.58 – Эффективные показатели II контура четырёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

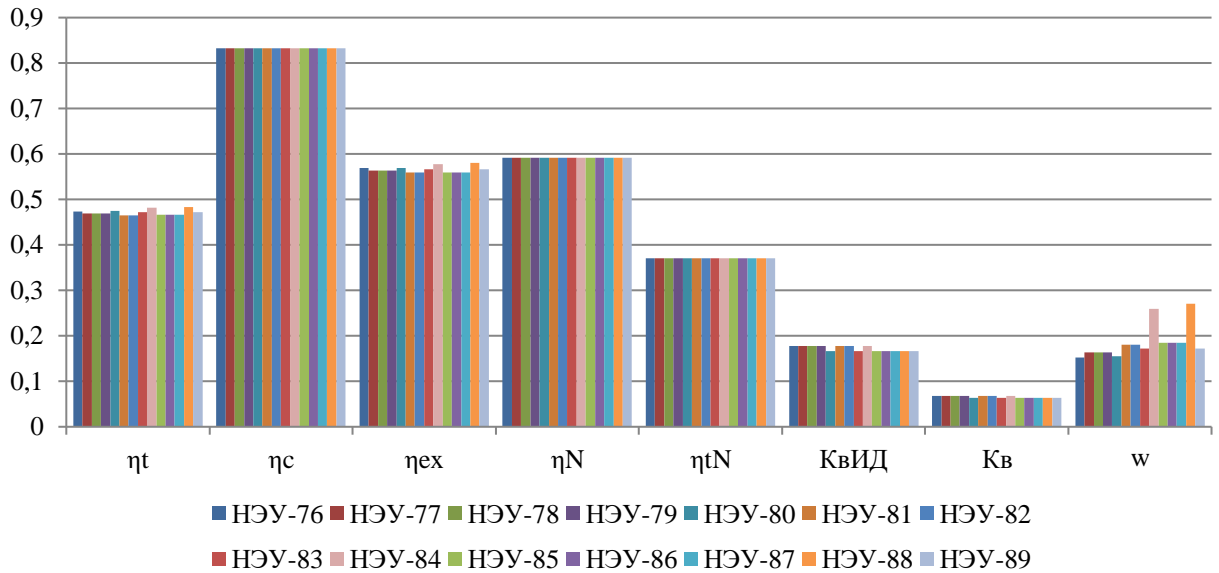
Рисунок 3.59 – Эффективные показатели III контура четырёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);

$K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.60 – Эффективные показатели IV контура четырёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10)



$\eta_c$  – КПД Карно по (3.7);  
 $\eta_t$  – тепловой КПД по (3.8);  
 $\eta_{ex}$  – эксергетический КПД по (3.10);  
 $\eta_N$  – КПД Карзона-Новикова по (3.9);  
 $\eta_{tN}$  – КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  по (3.12);  
 $\tau$  – отношение температур по (3.3);  
 $K_{вид}$  – максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта по (3.5);  
 $K_b$  – коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь по (3.6).

Рисунок 3.61 – Эффективные показатели четырёхконтурных параллельных НЭУ при оценке по (3.3), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12)

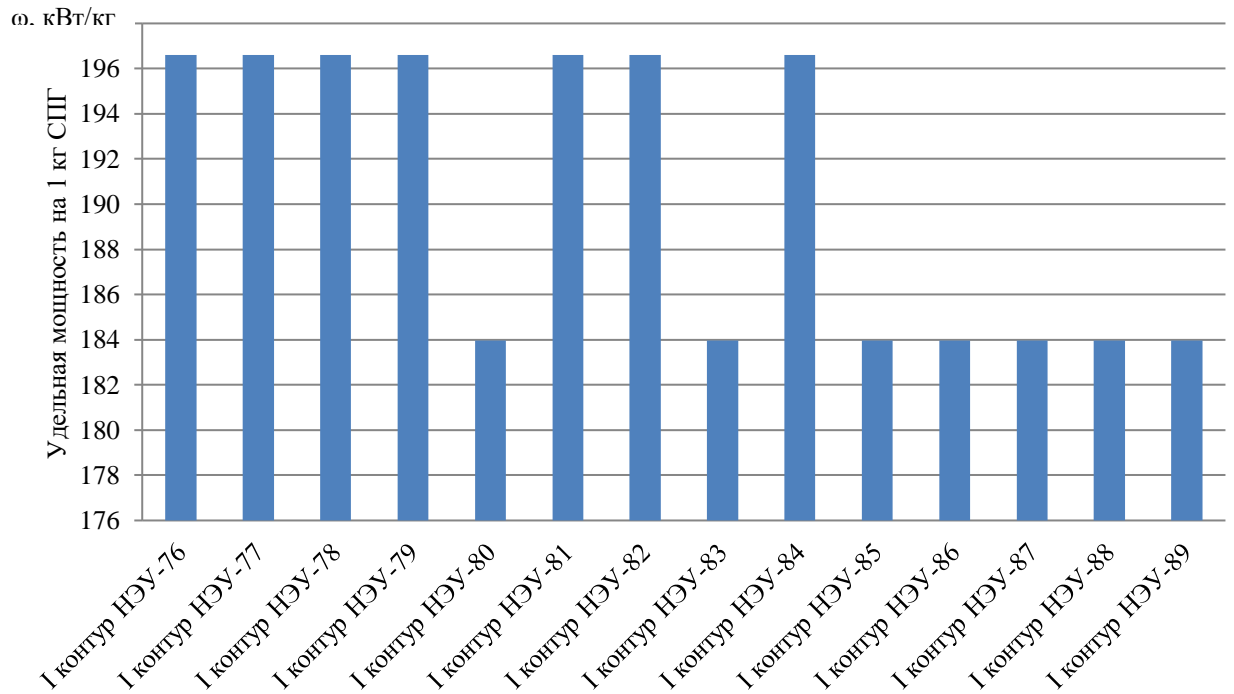


Рисунок 3.62 – Удельная мощность на 1 кг СПГ при оценке по (3.19) в I контуре четырёхконтурных параллельных НЭУ



Результаты анализа характеристик цикла четырёхконтурных параллельных НЭУ (рисунок А.76 – А.89, приложение А) с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов представлены в таблице 3.12.

На рисунках 3.57 – 3.60 представлены показатели эффективности отдельных контуров четырёхконтурных параллельных НЭУ. На рисунке 3.61 представлены эффективные показатели четырёхконтурных параллельных НЭУ.

На рисунке 3.62 представлены значения удельной мощности на 1 кг СПГ в I контуре четырёхконтурных параллельных НЭУ. Значения удельной мощности на 1 кг СПГ во II, III и IV контурах четырёхконтурных параллельных НЭУ не вычисляются, так как вырабатываемая мощность во II, III и IV контурах не зависит от нижнего температурного уровня всей НЭУ, устанавливаемого температурой криопродукта.

Разница между КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  и тепловым КПД четырёхконтурных НЭУ составляет 10%, в то время как разница между КПД Карзона-Новикова и тепловым КПД составляет 12 – 13%, это доказывает, что использование расширенной и уточнённой методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, позволяет повысить точность проектировочных расчётов четырёхконтурных НЭУ на 2 – 3 %.

Построены поля характеристик НЭУ, результаты которых представлены в приложении Б. Поля характеристик дают возможность определить энергоэкономические характеристики проектируемых НЭУ на предпроектном этапе.

### 3.5 Основные результаты и выводы по главе 3

1. Тепловой КПД (как общепринятый тепловой КПД для высокотемпературных и среднетемпературных ЭУ, так и предложенный КПД для НЭУ) коррелирует с КПД Карзона-Новикова, что подтверждает корректность методологии сравнительной оценки НЭУ. Так, например, тепловой КПД по контурам всех НЭУ качественно коррелирует с КПД Карзона-Новикова – следовательно, применение КПД Карзона-Новикова вполне приемлемо для предпроектной оценки многоконтурных систем.

2. Подтверждена корреляция теплового КПД и коэффициента возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь, т.е. оба этих показателя могут быть применимы для проектных оценок. Оценка максимального коэффициента возврата НЭ

криопродукта относительно минимальных затрат энергии (при ожижении по идеальным циклам) показывает предельную величину возвращаемой энергии, ранее затраченной на его ожижение. В то же время коэффициент возврата НЭ позволяет получить реальный ожидаемый эффект от утилизации НЭ криопродукта.

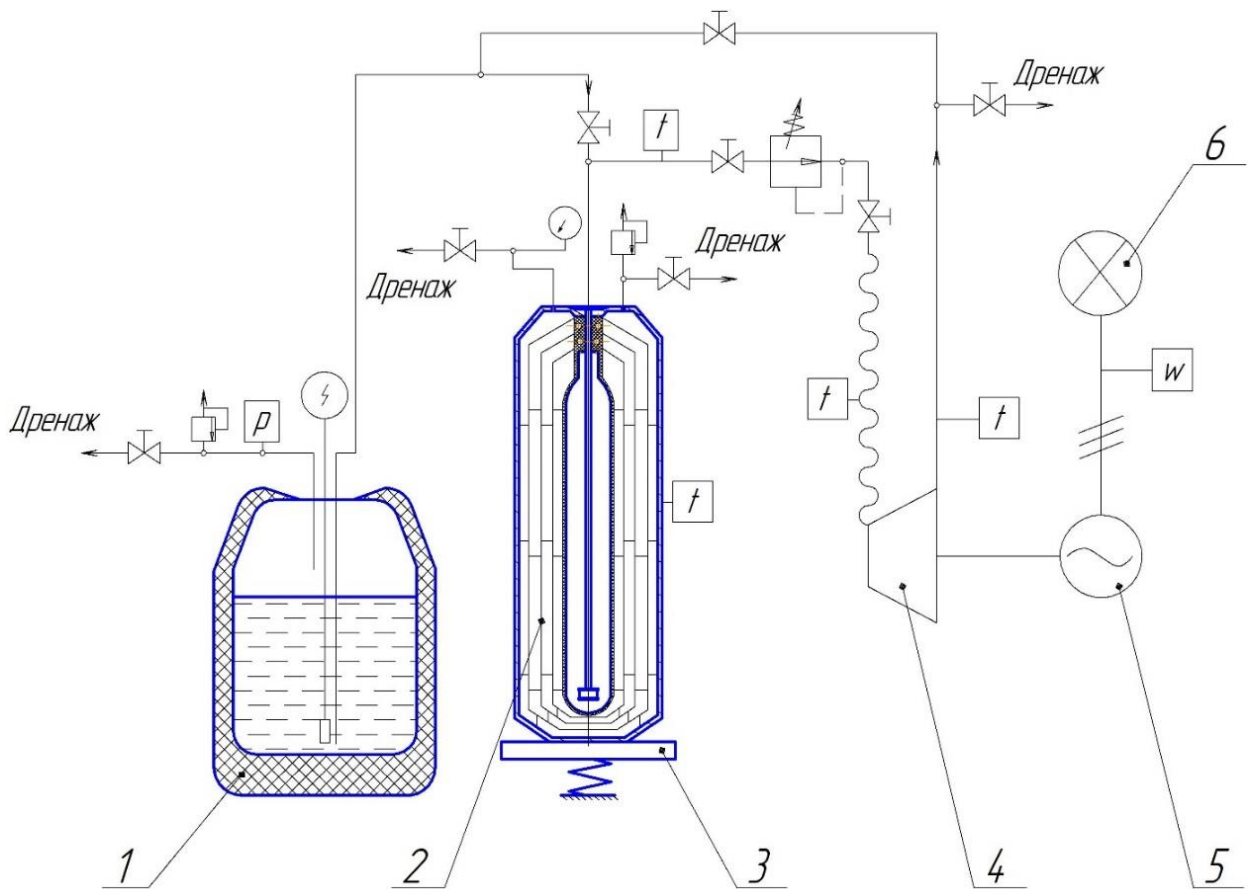
3. При сравнении одно-, двух-, трёх- и четырёхконтурных НЭУ КПД Карзона-Новикова и КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  качественно и количественно коррелируются, что также подтверждает возможность применения КПД Карзона-Новикова для предпроектного уровня расчётов. На следующем уровне расчётов контуров необходимо использовать предлагаемый КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$ , для которого обязателен расчёт многопараметрического показателя степени  $m$  с учётом температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов в каждом контуре.

4. Таким образом, в данной главе показана целесообразность использования уточнённой общей методики комплексного проектирования НЭУ ЛА, формулы КПД с уточнённым показателем степени  $m$  и общих подходов к решению подобных задач.

## 4 Экспериментальные исследования одноконтурной НЭУ

## 4.1 Описание устройства одноконтурной НЭУ

Для получения экспериментальных данных была разработана одноконтурная НЭУ на основе баллона с криогенной заправкой (БКЗ). Принципиальная схема этой НЭУ представлена на рисунке 4.1. В процессе эксперимента во внутренний сосуд (термос) баллона заправляется жидкий азот (далее – рабочее тело) при температуре 77 К и избыточном давлении ( $p \approx 0,025$  МПа).



- 1 – испарительная система заправки;  
 2 – баллон с криогенной заправкой;  
 3 – весы;  
 4 – турбина;  
 5 – электрогенератор («ОВЕН ПД 100»);  
 6 – нагрузка (светодиодная лампа 40 W).

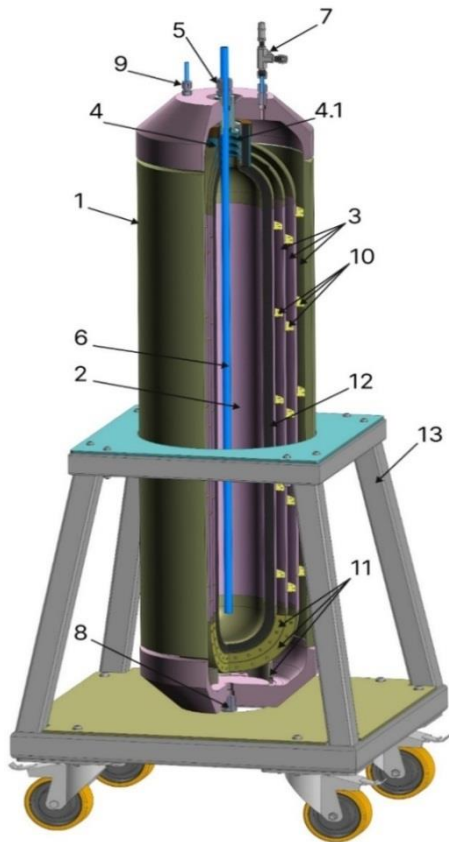
$t$  – контрольные точки измерения температуры с помощью тепловизора

Рисунок 4.1 – Принципиальная схема одноконтурной НЭУ, работающей по циклу Ренкина

Особенность БКЗ заключается в том, что он разрабатывался как универсальная криогенная система для использования его в составе НЭУ. БКЗ предназначен для заправки и хранения криогенной жидкости с последующей регазификацией рабочего тела за счёт

термокомпримирования.

Жидкий азот подаётся через заливной штуцер (5) и заправочную трубку (6) в термос (1). Испаряясь, азот проходит через отверстия в сильфонном узле (4), постепенно заполняя пространство между экранами (3) за счёт диаметрально противоположно расположенных отверстий и верхних частях экранов. Во фланцах (10) и кронштейнах (11) экранов выполнены отверстия (перфорация) для беспрепятственного прохождения испаряющегося азота. Температурное расширение, происходящее в процессе испарения азота, компенсируется растяжением сильфона (4.1) и смещением термоса в объём утеплителя (12).



- 1 – корпус;
- 2 – термос;
- 3 – экраны термоса;
- 4 – сильфонный узел;
- 4.1 – сильфон;
- 5 – заливной штуцер в крышке сосуда;
- 6 – заправочная трубка;
- 7 – аварийный предохранительный клапан;
- 8 – дренажный порт в дне сосуда;
- 9 – выходной штуцер в крышке сосуда;
- 10 – фланец экранов;
- 11 – кронштейны экранов;
- 12 – теплоизоляция термоса;
- 13 – перемещаемая стойка для установки сосуда.

Рисунок 4.2 – Баллон с криогенной заправкой



Рисунок 4.3 – Одноконтурная НЭУ на основе БКЗ

В состав разрабатываемой одноконтурной НЭУ (рисунок 4.3) входит:

- установочная, перемещаемая стойка;
- БКЗ;
- линия заправки и опорожнения баллона;
- система безопасности и система заправки;
- система замера, контроля и регистрации параметров;
- турбоэлектрогенератор и нагрузочный элемент (светодиодная лампа).

При проведении испытаний одноконтурной НЭУ на основе БКЗ были поставлены следующие задачи:

- получить характеристики цикла НЭУ при различных условиях и режимах работы;
- выполнить анализ характеристик цикла НЭУ;
- провести верификацию усовершенствованного метода определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта.

#### 4.2 Подготовка и проведение экспериментальных исследований

Перед началом испытаний экспериментальный образец БКЗ (рисунок 4.2) устанавливается на ступень. После чего производится подключение к его заправочной линии испарительной системы заправки. Заправка рабочим телом по массе контролируется весами, установленными под заправляемым БКЗ.

Далее производится отключение системы заправки и выжидается необходимое время для набора заданного уровня давления в процессе регазификации рабочего тела в одноконтурной НЭУ. После достижения необходимого уровня давления производится настройка редукционного клапана на выбранное рабочее давление и открытие подключённого к нему вентиля с одновременным включением таймера. В процессе эксперимента необходим различный уровень давлений для поиска и настройки оптимальной работы турбогенератора в зависимости от выбранной нагрузки на электрогенераторе. В последующем регистрируются характеристики турбогенератора (вырабатываемая электрическая мощность, частота вращения вала генератора, напряжение, сила тока на нагрузке и температура на входе и выходе) и параметры рабочего тела в экспериментальном образце (давление, масса газа и его расход) по времени.

Показания температур регистрируются тепловизором Testo-885 (класс 0,5), параллельно показания выводятся на компьютер с помощью преобразователя сигналов ОВЕН МВА – 8.

Установка позволяет исследовать характеристики цикла НЭУ (изменение температуры и давления в зависимости от времени, оценивать тепловые потоки из окружающей среды). Сигнал от датчика давления, находящегося в составе заправочной системы, обрабатывается компьютером и выводится на дисплей, что позволяет параллельно архивировать замеры давления и использовать их при сравнении с ручными замерами и расчётными данными.

Испытания проводятся в два этапа: I этап – этап регазификации рабочего тела; II этап – работа на расходном режиме. Испытания проводились дважды (этап регазификации – 2 раза, этап работы на расходном режиме – 4 раза). Основные измеряемые величины, полученные в ходе проведения I этапа, сведены в таблицу 4.1, а в ходе проведения II этапа – в таблицу 4.2.

Допускается, что объём БКЗ остаётся неизменным, начальная температура задаётся равной температуре окружающей среды, рабочим телом является криопродукт (жидкий азот), находящийся под давлением окружающей среды и имеющего температуру 77 К. Также принимаются следующие начальные условия:

- объём БКЗ  $V_B = 40,9 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ ;
- объём термоса для сжиженного рабочего тела  $V_T = 0,79 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ ;
- объём полости для ЭВТИ  $V_{II} = V_B - V_T = 40,1 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ ;
- масса БКЗ  $m_0 = 137,76 \text{ кг}$ ;
- давление окружающей среды  $p_{a1} = 100,1 \text{ кПа}$ ;  $p_{a2} = 100,3 \text{ кПа}$ ;
- температура окружающей среды  $T_{a1} = 295,15 \text{ К}$ ;  $T_{a2} = 301,15 \text{ К}$ ;

Для оценки энергетического потенциала регазифицированного рабочего тела были проведены испытания при различных давлениях на входе в турбогенератор.

Таблица 4.1 – Основные регистрируемые параметры, полученные в ходе проведения I этапа испытаний «Регазификация»

Время, т, мин	Избыточное давление, $\Delta p$ , атм	Масса рабочего тела, m, кг	Температура стенки баллона, $t_{ст}$ , °С
Эксперимент №1 (03.05.2023 г.)			
10	1	4,62	22,5
20	1	4,63	20,6
30	13	4,63	18,7
40	40	4,67	15,6
50	76	4,65	-3
60	88	4,58	-11,2
70	92	4,54	-10,6
80	92	4,4	-7,5
90	92	4,37	-3,2
100	92	4,35	-2,8
110	92	4,24	0,1
120	89	4,03	1,7
130	85	3,92	4
140	86	3,95	5,4
150	87	3,95	6,7
160	87,5	3,94	8,1
170	88	3,93	9,5
180	88	3,91	11,2
190	89	3,88	13,6
200	89	3,87	14,5
210	90	3,93	16,3
220	90,2	3,91	17,5
230	90,2	3,94	17,9
240	90,2	3,92	18,3
250	91	3,85	18,6
260	91,3	3,83	19,2
Эксперимент №2 (06.07.2023 г.)			
5	1,25	5,34	22,6
10	1,25	5,31	23,25
15	1,25	5,3	23
20	2,5	5,3	21,25
25	7,5	5,26	19,9
30	14	5,02	17,75
35	23	4,99	12,3
40	42	4,99	3,5
45	62	4,98	-4,15
50	74	4,95	-9,35
55	82	4,92	-11,75
60	86	4,91	-11,7

Продолжение таблицы 4.1

Время, т, мин	Избыточное давление, $\Delta p$ , атм	Масса рабочего тела, m, кг	Температура стенки баллона, $t_{ст}$ , °С
65	89	5,09	-10,05
70	92	5,29	-9,4
75	92,5	6	-7,45
80	94	6,22	-6,2
85	96	6,13	-4,1
90	92	5,44	-2,45
95	92	6,02	-0,15
100	92	5,95	1,85
105	94	5,96	2,9
110	96	5,97	3,95
115	96	5,91	5,15
120	96	5,86	6,25
125	97	5,86	8,35
130	98	5,86	9,15
135	98	5,86	10,25
140	98	5,9	11,9
145	98	5,91	12,75
150	99	5,89	13,45
155	100	5,88	14,65
160	92	4,9	15,05
165	92	5,07	15,7
170	93	5,36	16,7
175	93	5,61	15,95
180	94	5,61	17,4
185	94	5,57	18,25
190	94	5,56	18,75
195	94	5,56	19,35
200	94	5,56	19,6
205	94	5,14	20,4
210	94	5,07	20,85
215	94	4,96	21,35
220	94	5,08	21,85
225	94	5,26	22,2
230	96	5,56	22,7
235	96	5,22	23,65
240	96	5,41	24,45
245	96	5,56	24,7
250	97	4,85	25,05



Таблица 4.2 – Основные регистрируемые параметры, полученные в ходе проведения II этапа испытаний «Расходный режим»

Напря- жение, U, В	Сила тока, I, А	Время, т, мин	Избыточн ое давление, $\Delta p$ , атм	Масса рабочего тела, т, кг	Температу ра на входе в турбину, $t_{вх}$ , °С	Температу ра на выходе из турбины, $t_{вых}$ , °С	Число оборотов турбины, n, об/мин
Эксперимент №1.1 (03.05.2023 г.)							
0	0	0	92	3,79	20	18	0
18,6	2,4	1	80	3,61	15	4	47800
18,1	2,3	2	71	3,25	-2	-9,4	57000
18,1	2,3	3	70	3,14	-4,2	-14,3	57700
18,6	2,18	4	64	2,83	-5,6	-16,1	58200
18,6	2,18	5	60	2,6	-7	-17,4	58400
Эксперимент №1.2 (03.05.2023 г.)							
0	0	0	56	2,42	24,7	21,8	0
18,6	2,16	1	50	2,13	16	4,5	58500
18,8	2,18	2	38	1,66	1,2	-9	58700
19	2,18	3	32	1,2	-2,5	-13,7	59200
18,8	2,16	4	24	0,7	-4	-15,5	58800
17	1,91	5	16	0,27	-4,3	-15,3	56000
12	1,36	6	6	0	-3,4	-11	43800
Эксперимент №2.1 (06.07.2023 г.)							
0	0	0	97	4,86	22,2	28	0
10,8	4,52	1	85	4,46	13,5	0,7	41000
10,8	4,55	2	76	4,1	10,6	-4,61	40820
10,9	4,55	3	75	3,8	3,3	-7,25	41000
Эксперимент №2.2 (06.07.2023 г.)							
0	0	0	75	3,43	15,5	4,97	41500
11,1	4,88	1	72	3	8,1	-3	42000
11,3	4,9	2	65	2,57	-0,4	-9	42500
11,2	5	3	56	2,14	-2,4	-11,6	43100
11,2	4,96	4	44	1,7	-3,1	-12,2	43000
11,2	4,7	5	34	1,27	-1,5	-12,2	42600
10,8	4,3	6	24	0,85	-3,4	-11,3	39500

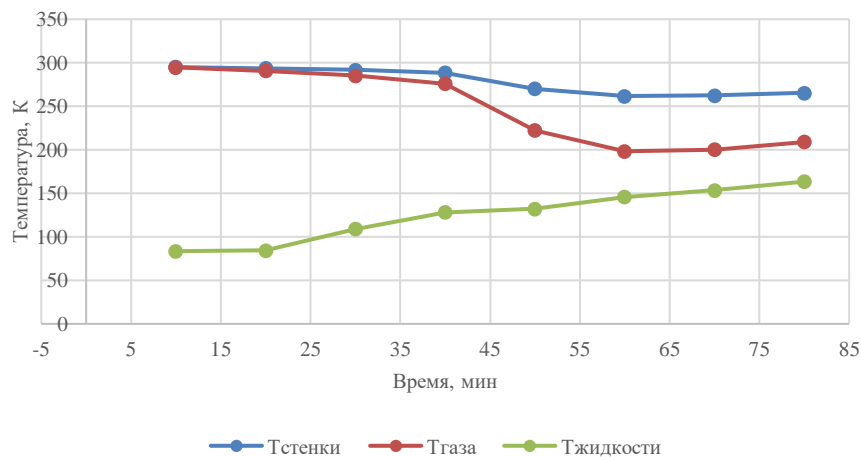


Рисунок 4.4 – Изменение температуры стенки баллона, температуры жидкости и температуры газа по времени на этапе регазификации (Эксперимент №1, 03.05.2023 г.)

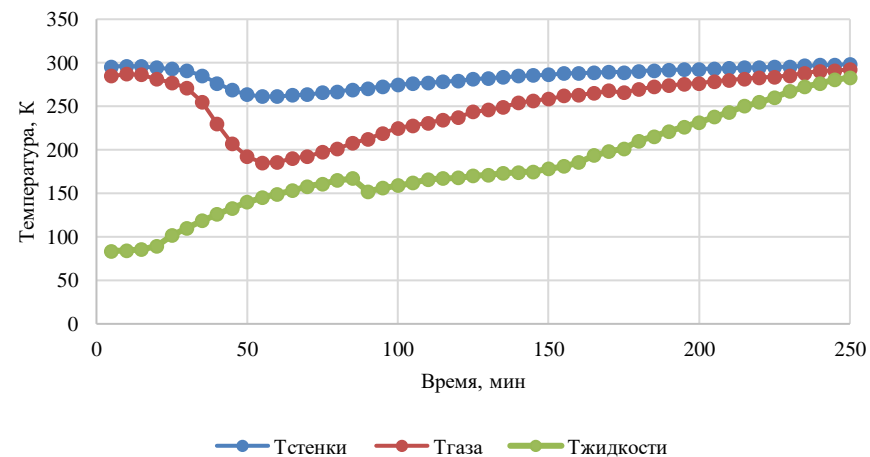


Рисунок 4.5 – Изменение температуры стенки баллона, температуры жидкости и температуры газа по времени на этапе регазификации (Эксперимент №2, 06.07.2023 г.)

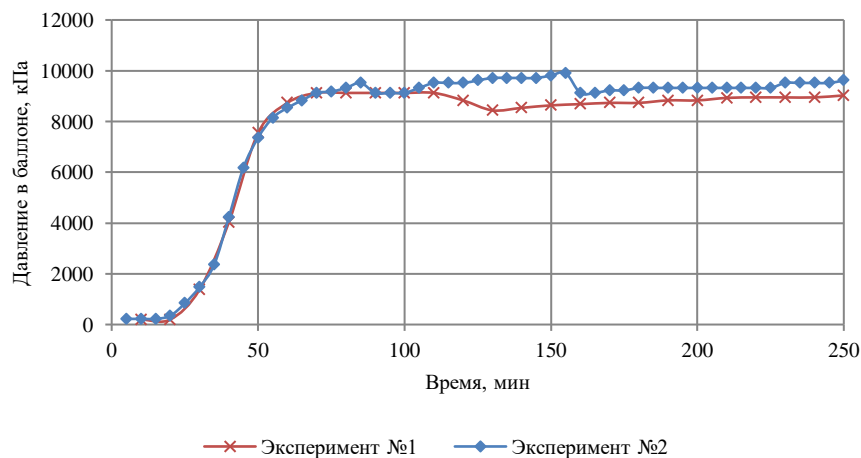


Рисунок 4.6 – Изменение давления в баллоне по времени на этапе регазификации

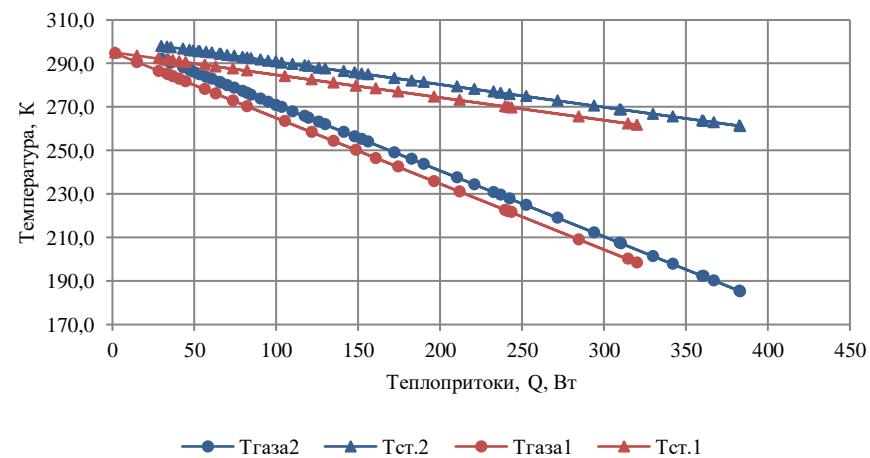


Рисунок 4.7 – Зависимость температуры газа и температуры стенки баллона от теплопритоков

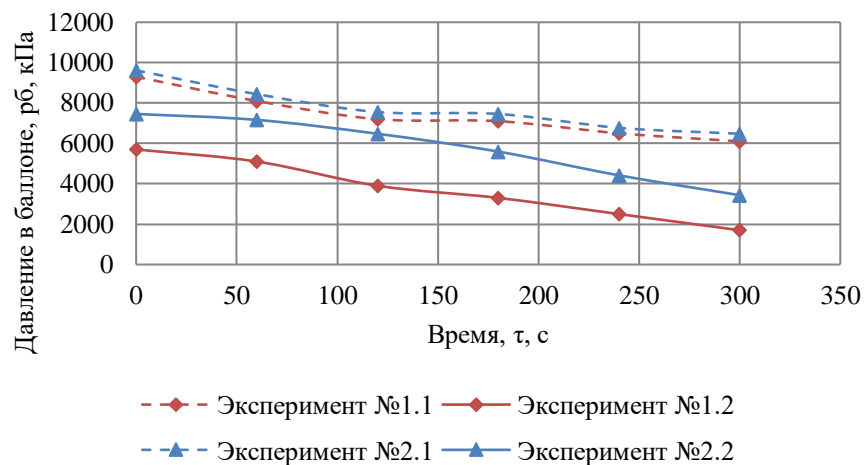


Рисунок 4.8 – Зависимость давления в баллоне от времени работы НЭУ на расходном режиме

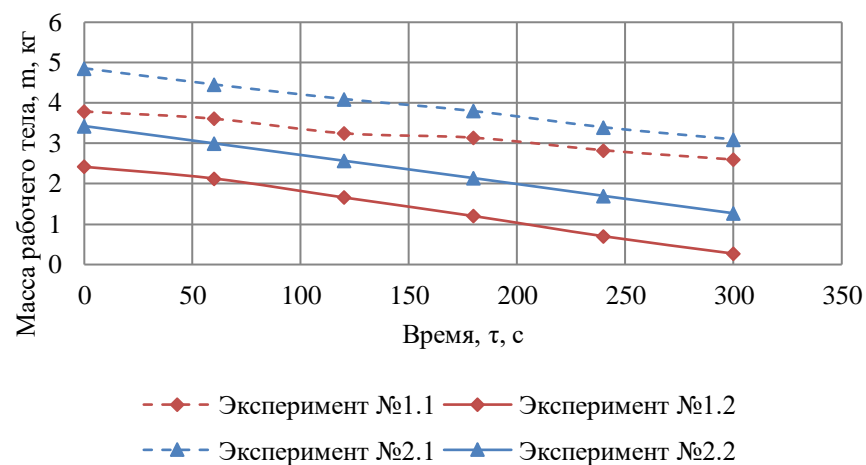


Рисунок 4.9 – Зависимость массы рабочего тела от времени работы НЭУ на расходном режиме

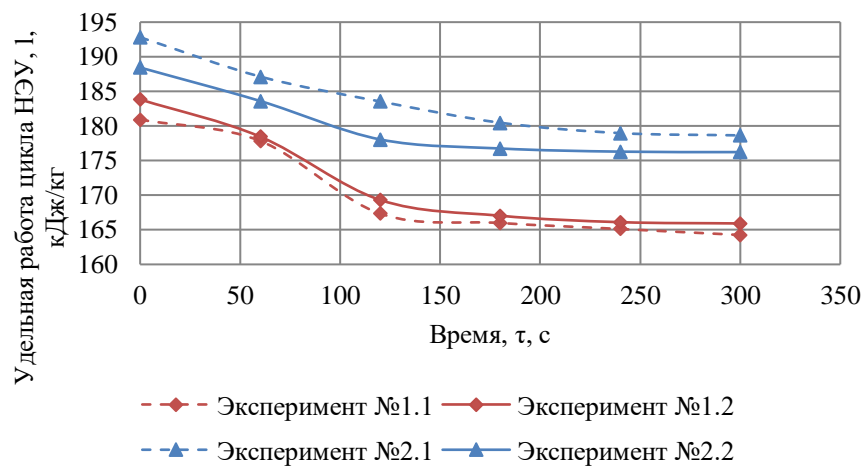


Рисунок 4.10 – Зависимость удельной работы цикла от времени работы НЭУ на расходном режиме

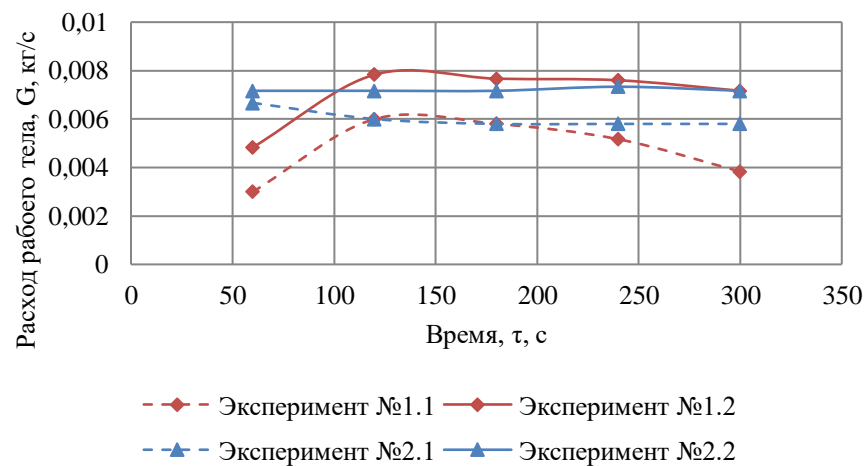


Рисунок 4.11 – Зависимость расхода рабочего тела от времени работы НЭУ на расходном режиме

## 4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований

Анализ результатов экспериментальных исследований и оценка точности определения эффективности одноконтурной НЭУ проводились с использованием усовершенствованного метода определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта. Для этого проведен теоретический расчёт одноконтурной НЭУ, рабочее тело – жидкий азот. Результаты теоретического расчёта представлены на рисунке 4.12.

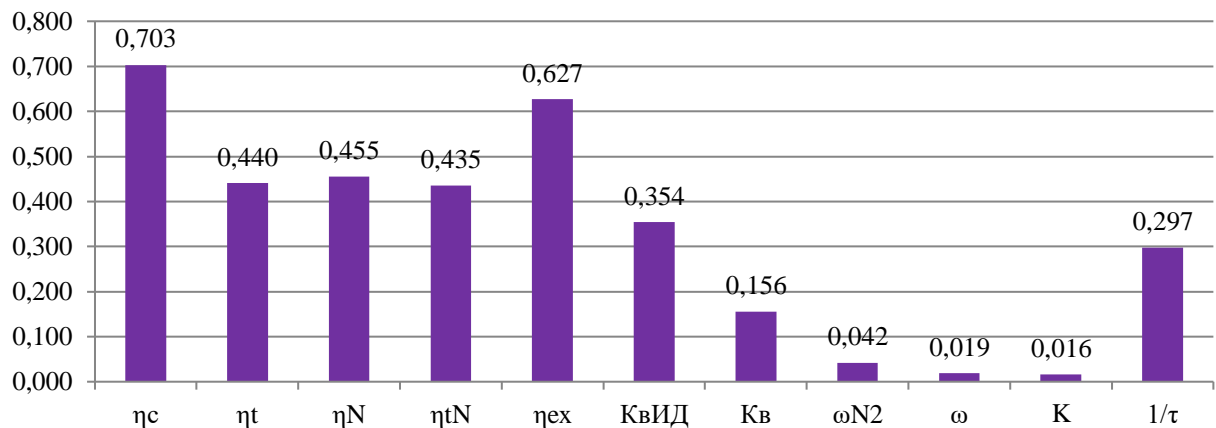


Рисунок 4.12 – Эффективные показатели, полученные в ходе теоретического расчёта одноконтурной НЭУ

Эффективные показатели, полученные в ходе обработки экспериментальных данных одноконтурной НЭУ представлены на рисунках 4.13 – 4.16.

Анализ эффективных показателей одноконтурной НЭУ (рисунок 4.13-4.20) при сравнении теоретических и экспериментальных данных показал, что отсутствие расхождения в значениях КПД Карно ( $\eta_c$ ) и КПД Карзона-Новикова ( $\eta_N$ ) объясняется одинаковыми максимальным и минимальным температурными уровнями, что наглядно демонстрирует показатель  $1/\tau$ . Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь ( $K_b$ ), максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта ( $K_{вИД}$ ), коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом располагаемой только от фазового перехода ( $\omega_{N2}$ ) выше в эксперименте №1.1, поскольку выше вырабатываемая мощность и ниже расход рабочего тела. Разница между КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  ( $\eta_{tN}$ ) и реальным КПД ( $\eta_{реал}$ ) НЭУ в среднем составила 1 %, в то время как разница между КПД «карнотизированного» цикла ( $\eta_{tN}$ ) и реальным КПД ( $\eta_{реал}$ ) НЭУ в среднем составила 2,5 %, а между КПД Карзона-Новикова ( $\eta_N$ ) и реальным КПД в среднем составила 3%. Полученные результаты доказывают, что использование усовершенствованного метода определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, позволяет повысить точность проекторочных расчётов НЭУ на 2 % и более.

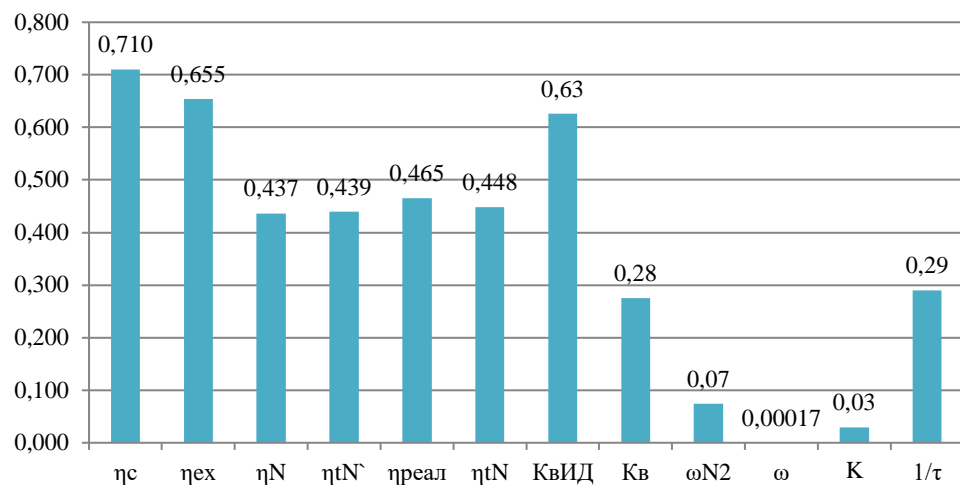


Рисунок 4.13 – Эффективные показатели одноконтурной НЭУ при отношении температур  $\tau=3,45$  (Эксперимент №1.1)

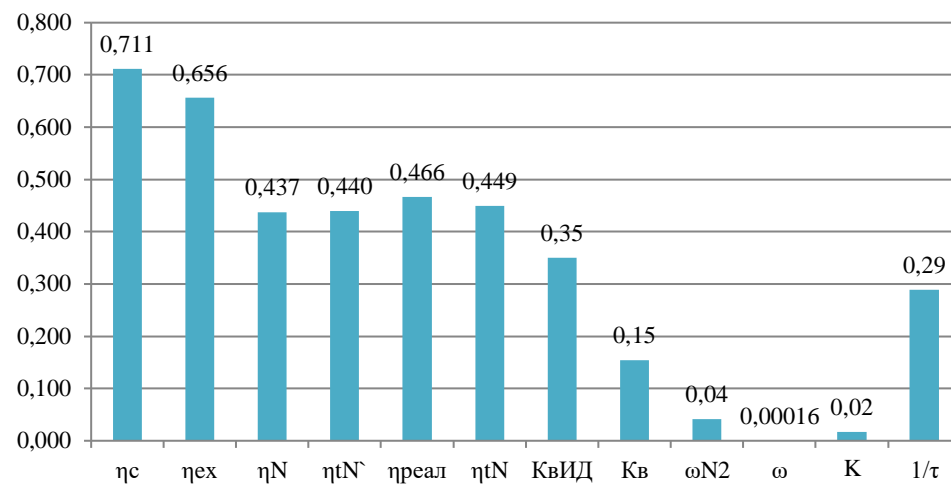


Рисунок 4.14 – Эффективные показатели одноконтурной НЭУ при отношении температур  $\tau=3,45$  (Эксперимент №1.2)

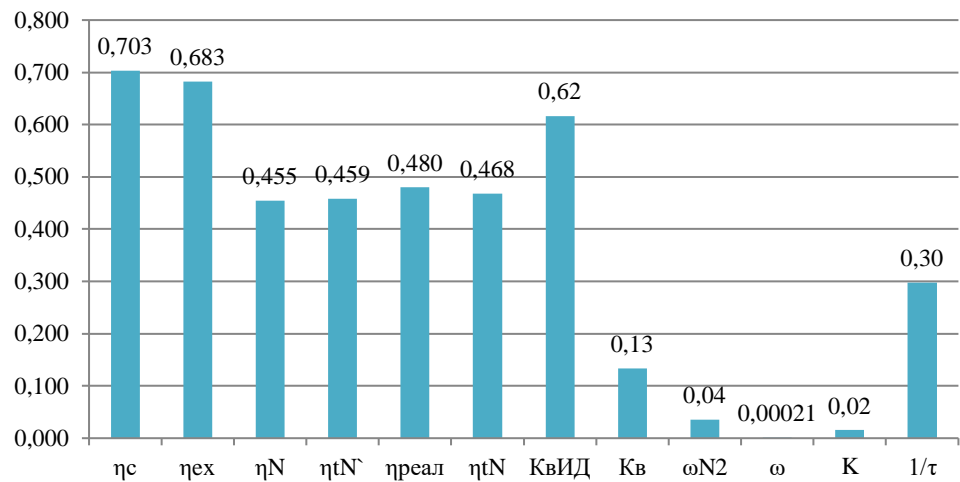


Рисунок 4.15 – Эффективные показатели одноконтурной НЭУ при отношении температур  $\tau=3,4$  (Эксперимент №2.1)

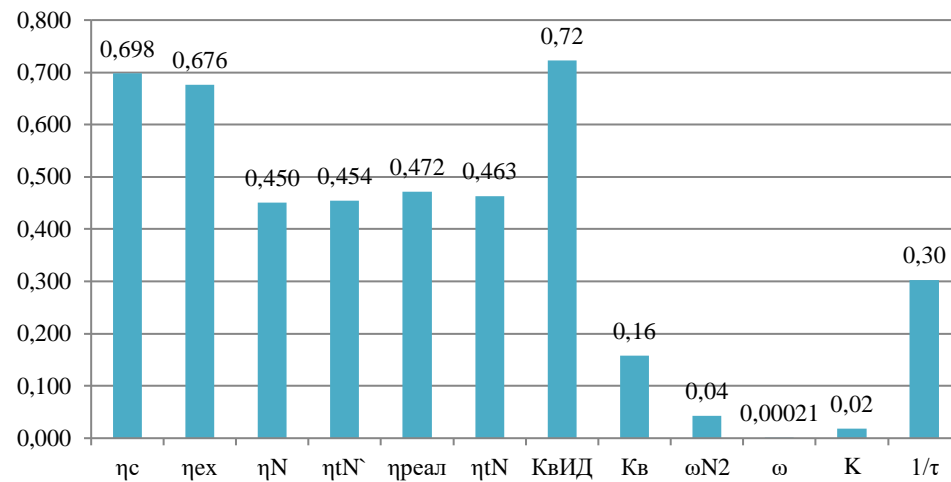


Рисунок 4.16 – Эффективные показатели одноконтурной НЭУ при отношении температур  $\tau=3,3$  (Эксперимент №2.2)

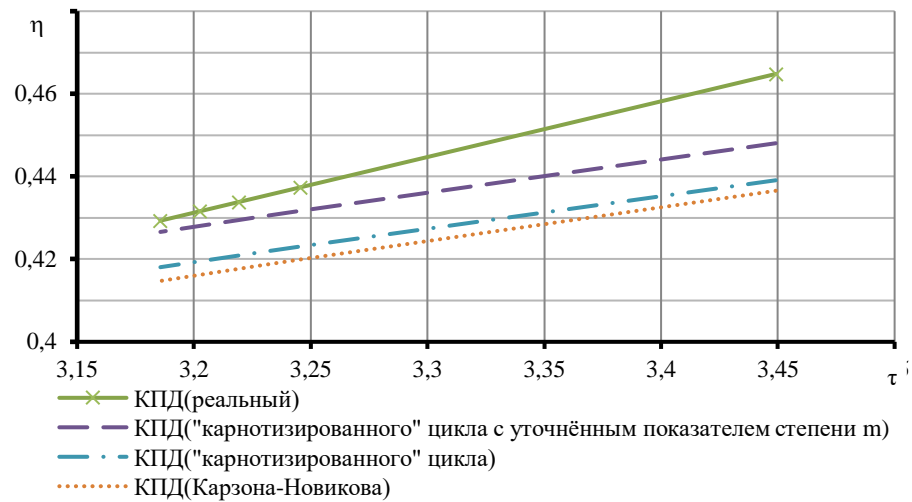


Рисунок 4.17 – Зависимость эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур (Эксперимент №1.1)

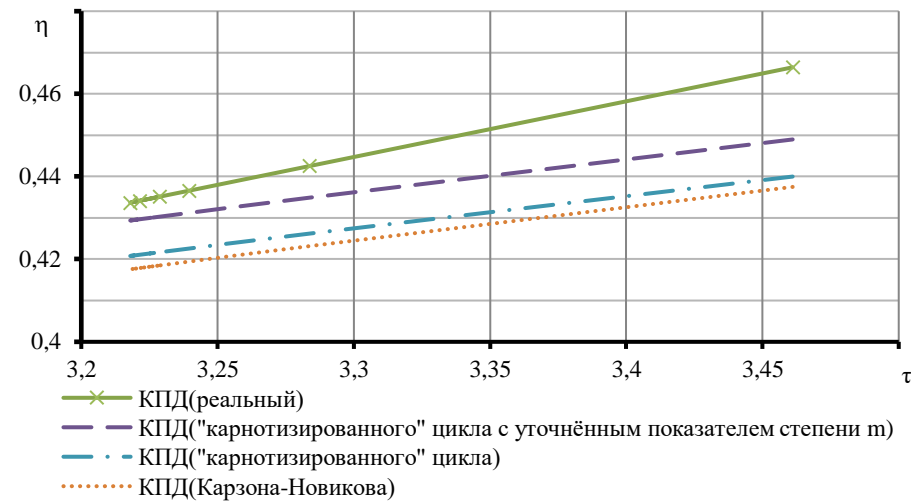


Рисунок 4.18 – Зависимость эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур (Эксперимент №1.2)

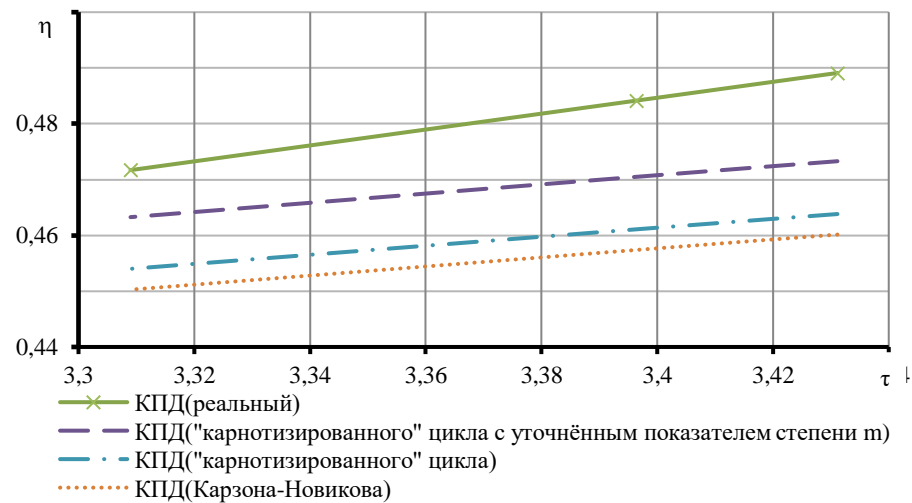


Рисунок 4.19 – Зависимость эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур (Эксперимент №2.1)

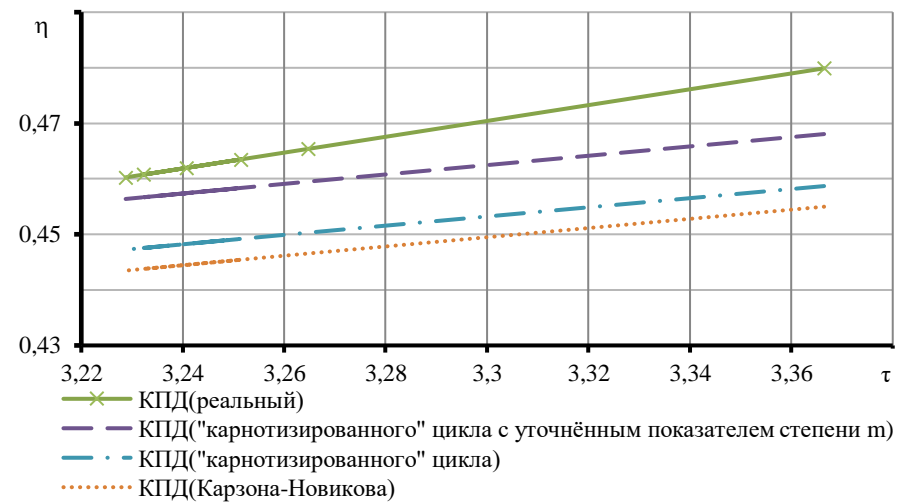


Рисунок 4.20 – Зависимость эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур (Эксперимент №2.2)

#### 4.4 Результаты расчётных исследований по оценке точности определения эффективности эксплуатируемых НЭУ

В качестве экспериментальных образцов были выбраны эксплуатируемые НЭУ:

- ЭУ-174 (II – 1R (221,3 – 363K) – R32/НЭ – 2R (111 – 283K) – СПГ/R32+Мор.вода) [4];
- ЭУ-138 (II – 1R (183,21 – 573K) – R600a/Выхлоп.газы – 2R (133 – 342K) – СПГ/R600a) [4];
- ЭУ-133 (II – 1R (227,08 – 393K) – Углекислый газ/Вода – 2R (111,53 – 288K) – СПГ/Вода+CO<sub>2</sub>) [4];
- ЭУ-199 (III – 1R (113 – 359K) – СПГ/Азот – 2В (144 – 688K) – Азот/Воздух – 3В (288 – 1563K) – Воздух/Метан + Окр.среда) [4];
- ЭУ-216 (III – 1R (186 – 285K) – Метан/Мор. вода – 2R (145 – 285K) – Аргон/Мор. вода – 3R (111 – 283K) – СПГ/Аргон + Метан + Мор.вода) [4];
- ЭУ-218 (III – 1R (111,15 – 255K) – СПГ/R14+R290 – 2В (113,15 – 225K) – R14/Углекислый газ – 3R (173,15 – 350K) – R290/Углекислый газ) [4].

Эффективные показатели эксплуатируемых НЭУ представлены на рисунке 4.20.

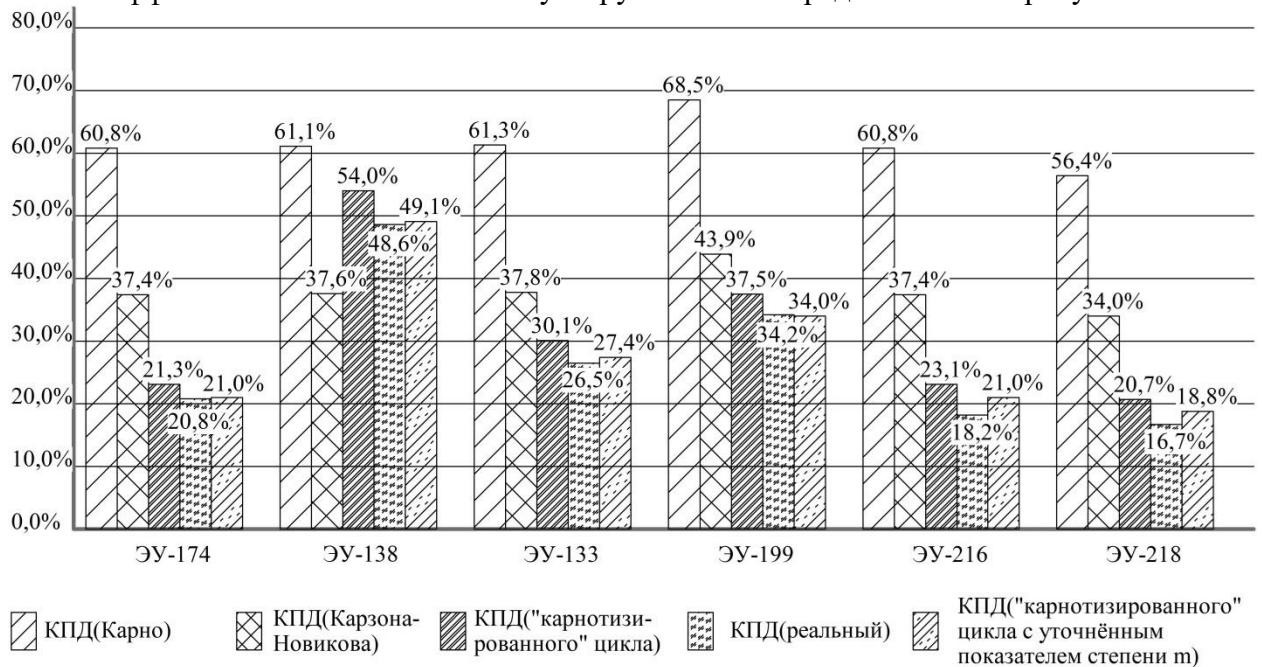


Рисунок 4.20 – Эффективные показатели эксплуатируемых НЭУ

Анализ расчётных исследований эффективных показателей эксплуатируемых НЭУ показал, что использование предложенного КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  увеличивает точность определения эффективности НЭУ на 2 – 20 %.

## 4.5 Основные результаты и выводы по главе 4

1. Разработана и создана экспериментальная установка для экспериментального исследования одноконтурной НЭУ.

2. Проведены испытания одноконтурной НЭУ, получены характеристики цикла на этапе регазификации рабочего тела (жидкого азота) и на расходном режиме.

3. В результате проведённых экспериментальных исследований получены характеристики цикла НЭУ в зависимости от давления и расхода рабочего тела. Полученная мощность криогенного преобразователя энергии (частота вращения 57000 об/мин) составляет 42 Вт при расходе рабочего тела 6 г/с. Показатель политропы процесса расширения в турбине составляет 1,003.

4. Проведён анализ характеристик цикла НЭУ, а также верификация усовершенствованного метода определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта. Полученные результаты доказывают, что использование усовершенствованного метода определения характеристик цикла НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, позволяет повысить точность проектировочных расчётов НЭУ на 2 % и более.

5. Проведён анализ расчётных исследований эффективных показателей эксплуатируемых НЭУ, который показал, что использование предложенного КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  увеличивает точность определения эффективности НЭУ на 2 – 20 %.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного диссертационного исследования достигнуто повышение точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА на величину от 2 до 20% за счёт совершенствования метода определения характеристик НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, основанного на обобщении, систематизации, структурном анализе и верификации данных.

1. Усовершенствованы математические модели НЭУ ЛА с учётом их состава, структуры и параметрических характеристик путём уточнения показателя степени  $m$ , являющегося многопараметрической функцией, в формуле оценки эффективности вида  $\eta = 1 - (T_{\min} / T_{\max})^m$ . Выполнен анализ ЭУ космических ЛА. Использование НЭУ на борту космических ЛА позволит решить ряд проблем, связанных с особенностями космической энергетики, которые, в свою очередь, связаны с требованиями к массогабаритным характеристикам.

2. Уточнена и расширена методика определения характеристик цикла НЭУ ЛА при расходе рабочего тела в диапазоне от 0 до 5 кг/с, и повышена точность проектировочных расчётов НЭУ ЛА путём введения в рассмотрение совокупности параметров, а также разработки алгоритма расчёта с учётом структуры и особенностей НЭУ ЛА. Применение предлагаемой методики позволяет повысить точность определения КПД на величину от 2 до 20 %.

3. Уточнена методика комплексного проектирования НЭУ ЛА путём проведения структурного анализа их схем и состава, выбора рабочих тел с учётом температурных уровней в контурах, определения критериев выбора НЭУ ЛА и проведения анализа их параметрических характеристик. Наряду с общепринятыми характеристиками, методика содержит также энергоэкономические показатели.

4. Выполнено численное моделирование процессов НЭУ ЛА по 89 схемам с использованием усовершенствованного метода определения их характеристик, что позволило впервые установить закономерности влияния совокупности параметров (температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА, а также разработать их классификацию по рабочими процессам, структуре и составу.

5. Проведена верификация результатов по параметрам и характеристикам НЭУ на примере прототипов. Подтверждена корреляция теплового КПД и коэффициента возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь, т.е. оба этих показателя

могут быть применимы для проектных оценок. КПД Карзона-Новикова и КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  выведены для условия получения максимальной работы, поэтому, так как НЭ криопродукта считается «бесплатной», то основным критерием выбора многоконтурных систем когенерации будет получение до 7 % дополнительной энергии, и возврата от 8 до 15% энергии, ранее затраченной на ожижение криопродукта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худяков, С. А. Космические энергоустановки. – М.: Знание, 1984. – 64 с, ил. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 7).
2. Куландин, А.А. Энергетические системы космических аппаратов / А.А. Куландин, С. В. Тимашев, В. П. Иванов. - Москва: Машиностроение, 1972. - 427 с. : ил.; 22 см.
3. Угланов, Д.А. Энергоэффективные системы преобразования низкопотенциальной энергии криопродуктов: дисс. докт. техн. наук: 05.04.03 / Угланов Дмитрий Александрович. – Санкт-Петербург, 2022. – 688 с.
4. Низкотемпературные энергетические установки, использующие низкопотенциальную энергию СПГ (Обзор публикаций по низкотемпературным энергетическим установкам с целью выявления схемных решений, состава и определения характеристик) / Благин Е.В., Манакова О.А., Тремкина О.В., Угланов Д.А.; Самар. ун-т. – Самара, 2023. – 485 с. - Библ.: с.485. – Деп. в ВИНИТИ 10.04.2023, № 10-В2023
5. Dispenza, C. Exergy recovery during LNG regasification: electric energy production – Part one / C. Dispenza, G. Dispenza, V. La Rocca, G. Panno//Applied Thermal Engineering. – 2009. – V. 29, I. 2-3. – P. 380-387.
6. Dispenza, C. Exergy recovery during LNG regasification: electric energy production – Part two / C. Dispenza, G. Dispenza, V. La Rocca, G. Panno//Applied Thermal Engineering. – 2009. – V. 29, I. 2-3. – P. 388-399.
7. Qiang, W. Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source / W. Qiang, L. Yanzhong, W. Jiang// Applied Thermal Engineering. – 2004. – V. 24, I. 4. – P. 539-548.
8. Franco, A. Thermodynamic analysis of direct expansion configurations for electricity production by LNG cold energy recovery / A. Franco, C. Casarosa//Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 78. – P. 649-657.
9. Xue, F. A review of cryogenic power generation cycles with liquefied natural gas cold energy utilization / F. Xue, Y. Chen, Y. Ju//Frontiers in Energy. – 2016. – V. 10, I. 3. – P. 363-374.
10. Hisazumi, Y. Proposal for a high efficiency LNG power-generation system utilizing waste heat from the combined cycle1 / Y. Hisazumi, Y. Yamasaki, S. Sugiyama // Applied Energy. – 1998. – V. 60, I. 3. – P. 169-182.
11. Sun, Z. Multi-parameter optimization and fluid selection guidance of a two-stage organic Rankine cycle utilizing LNG cold energy and low grade heat / Z. Sun, S. Wang, F. Xu, W. He // Energy Procedia. – 2017. – V. 142. – P. 1222-1229.

12. Sun, Z. Thermodynamic optimization and comparative study of different ORC configurations utilizing the exergies of LNG and low grade heat of different temperatures / Z. Sun, J. Lai, S. Wang, T. Wang//Energy. – 2018. – V. 147. – P. 688-700.
13. Bao, J. The effect of the arrangements for compression process and expansion process on the performance of the two-stage condensation Rankine cycle / J. Bao, R. Zhang, Y. Lin, N. Zhang, X. Zhang, G. He//Energy Conversion and Management. – 2018. – V. 159. – P. 299-311.
14. Choi, I-H. Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for liquefied natural gas cold energy recovery / I-H. Choi, S. Lee, Y. Seo, D. Chang//Energy. – 2013. – V. 61. – P. 179-195.
15. Liu, Y. A novel cryogenic power cycle for LNG cold energy recovery / Y. Liu, K. Guo//Energy. – 2011. – V. 36, I. 5. – P. 2828-2833.
16. Tomkow, L. Improvement of the LNG (liquid natural gas) regasification efficiency by utilizing the cold exergy with a coupled absorption ORC (organic Rankine cycle) / L. Tomkow, M. Cholewinski // Energy. – 2015. – V. 87. – P. 645-653.
17. Tsougranis, E-L. Dual reutilization of LNG cryogenic energy and thermal waste energy with organic Rankine cycle in marine applications / E-L. Tsougranis, D. Wu // Energy Procedia. – 2017. – V. 142. – P. 1401-1406.
18. Sung, T. Thermodynamic analysis of a novel dual-loop organic Rankine cycle for engine waste heat and LNG cold / T. Sung, K. C. Kim // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 100. – P. 1031-1041.
19. Arcuri, N. LNG as cold heat source in OTEC systems / N. Arcuri, R. Bruno, P. Bevilacqua//Ocean Engineering. – 2015. – V. 104. – P. 349-358.
20. Szargut, J. Utilization of the cryogenic exergy of liquid natural gas (LNG) for the production of electricity / J. Szargut, I. Szczygiel // Energy. – 2009. – V. 34. – P. 827-837.
21. Mehrpooya, M. Cost and economic potential analysis of a cascading power cycle with liquefied natural gas regasification / M. Mehrpooya, M. M. M. Sharifzadeh, M. J. Zonouz, M. A. Rosen // Energy Conversion Management 2018;156:68e83.
22. Querol, E. Available power generation cycles to be coupled with the liquid natural gas (LNG) vaporization process in a Spanish LNG terminal / E. Querol, B. Gonzalez-Regueral, J. García-Torrent, A. Ramos // Applied Energy. – 2011. – V. 88, I. 7. – P. 2382-2390.
23. Zhang, N. A novel near-zero CO<sub>2</sub> emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization / N. Zhang, N. Lior // Energy. – 2006. – V. 31, I. 10-11. – P. 1666-1679.

24. Feifei, B. Integration of low-level waste heat recovery and liquefied nature gas cold energy utilization / B. Feifei, Z. Zhang // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2008. – V. 16, I. 1. – P. 95-99.
25. Gomez, M.R. Thermodynamic analysis of a Brayton cycle and Rankine cycle arranged in series exploiting the cold exergy of LNG (liquefied natural gas) / M. R. Gomez, R. F. Garcia, J. R. Gomez, J. C. Carril // Energy. – 2014. – V. 66. – P. 927-937.
26. Lu, T. Analysis and optimization of a cascading power cycle with liquefied natural gas (LNG) cold energy recovery / T. Lu, K. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2009. – V. 29, I. 8-9. – P. 1478-1484.
27. Angelino, G. The role of real gas Brayton cycles for the use of liquid natural gas physical exergy / G. Angelino, C. M. Invernizzi // Applied Thermal Engineering. – 2011. – V. 31, I. 5. – P. 827-833.
28. Gomez, M. R. Thermodynamic analysis of a novel power plant with LNG (liquefied natural gas) cold exergy exploitation and CO<sub>2</sub> capture / M. R. Gomez, J. R. Gomez, L. M. Lopez-Gonzalez, L. M. Lopez-Ochoa // Energy. – 2016. – V. 105. – P. 32-44.
29. BP energy outlook 2035 // British Petroleum [сайт Центра исследований цепочки создания стоимости]. – 2017. – URL: <https://www.vcmstudy.ir/wp-content/uploads/2017/04/bp-energy-outlook-2017-presentation-slides.pdf> (дата обращения 08.06.2023)
30. Smil V. Natural gas: fuel for the 21st century / V. Smil // John Wiley & Sons, 2015. – P. 264.
31. Kumar, S. LNG: an ecofriendly cryogenic fuel for sustainable development / S. Kumar, H. – T. Kwon, K. – H. Choi, W. Lim, J. H. Cho, K. Tak, I. Moon // Applied Energy. – 2011. – V. 88, I. 12. – P. 4264-4273.
32. He, T. Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications / T. He, I. A. Karimi, Y. Ju // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – V. 132. – P. 89-114.
33. Khan, M. S. Retrospective and future perspective of natural gas liquefaction and optimization technologies contributing to efficient LNG supply: A review / M. S. Khan, I. A. Karimi, D. A. Wood // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – V. 45. – P. 165-188.
34. Mokhatab, S. Handbook of liquefied natural gas / S. Mokhatab, JY. Mak, JV. Valappil, DA. Wood // Gulf Professional Publishing, 2013. – P. 624.
35. Lin, W. LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China's future energy infrastructure / W. Lin, N. Zhang, A. Gu // Energy. – 2010. – V. 35, I. 11. – P. 4383-4391.

36. Lim, W. Current status and perspectives of liquefied natural gas (LNG) plant design / W. Lim, K. Choi, I. Moon // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2013. – V. 52, I. 9. – P. 3065-3088.
37. Mokhatab, S. Natural gas and LNG trade - a global perspective / S. Mokhatab, M. J. Economides, D. A. Wood // *Hydrocarbon Processing*. – 2006. – V. 85, I. 7.
38. Jin, T. Simulation and performance analysis of a heat transfer tube in SuperORV / T. Jin, M. Wang, K. Tang // *Cryogenics*. – 2014. – V. 61. – P. 127-132.
39. Qi, C. Performance analysis of submerged combustion vaporizer / C. Qi, W. Wang, B. Wang, Y. Kuang, J. Xu // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 31. – P. 313-319.
40. Xu, S. LNG vaporizers using various refrigerants as intermediate fluid: comparison of the required heat transfer area / S. Xu, Q. Cheng, L. Zhuang, B. Tang, Q. Ren, X. Zhang // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – V. 25. – P. 1-9.
41. Pu, L. Thermal performance analysis of intermediate fluid vaporizer for liquefied natural gas / L. Pu, Z. Qu, Y. Bai, D. Qi, K. Song, P. Yi // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – V. 65, I. 1-2. – P. 564-574.
42. Hirakawa, S. Utilization of LNG cold / S. Hirakawa, K. Kosugi // *International Journal Refrigeration*. – 1981. – V. 4, I. 1. – P. 17-21.
43. IGU I. G. U. World LNG report // International Gas Union (IGU), Barcelona, Spain. – 2017.
44. Angelino, G. The use of liquid natural gas as heat sink for power cycles / G. Angelino // *Journal of Engineering for Power*. – 1978. – V. 100, I. 1. – P. 169-177.
45. Najjar, Y. S. H. Cryogenic power conversion with regasification of LNG in a gas turbine plant / Y. S. H. Najjar, M. S. Zaaout // *Energy Conversion and Management*. – 1993. – V. 34, I. 4. – P. 273-280.
46. Kim, C. Analysis of the power cycle utilizing the cold energy of LNG / C. Kim, S. Chang, S. Ro // *International Journal of Energy Research*. – 1995. – V. 19, I. 9. – P. 741-749.
47. Najjar, Y. A Cryogenic gas turbine engine using hydrogen for waste heat recovery and regasification of LNG / Y. Najjar // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1991. – V. 16, I. 2. – P. 129-134.
48. Kim, T. Power augmentation of combined cycle power plants using cold energy of liquefied natural gas / T. Kim, S. Ro // *Energy*. – 2000. – V. 25, I. 9. – P. 841-856.
49. Bisio, G. On the recovery of LNG physical exergy by means of a simple cycle or a complex system / G. Bisio, L. Tagliafico // *Exergy An International Journal*. – 2002. – V. 2, I. 1. – P. 34-50.

50. Mehrpooya, M. Optimum design and exergy analysis of a novel cryogenic air separation process with LNG (liquefied natural gas) cold energy utilization / M. Mehrpooya, M. M. Sharifzadeh, M. A. Rosen // *Energy*. – 2015. – V. 90. – P. 2047-2069.
51. Mehrpooya, M. Investigation of novel integrated air separation processes, cold energy recovery of liquefied natural gas and carbon dioxide power cycle / M. Mehrpooya, M. Kalhorzadeh, M. Chahartaghi // *Journal of Clean Production*. – 2016. – V. 113. – P. 411-425.
52. Cravalho, E. Thermodynamic analysis of the regasification of LNG for the desalination of sea water / E. Cravalho, J. McGrath, W. Toscano // *Cryogenics*. – 1977. – V. 17, I. 3. – P. 135-139.
53. Messineo, A. Potential applications using LNG cold energy in Sicily / A. Messineo, D. Panno // *International Journal of Energy Research*. – 2008. V. 32, I. 11. – P. 1058-1064.
54. Карнаух, В.В. Техническая термодинамика: учебник / В. В. Карнаух, А. Б. Бирюков, К. А. Ржесик, А. Н. Лебедев. — Донецк: ДонНУЭТ имени Туган-Барановского, 2021. — 480 с.
55. Алексеев, Г. Н. Основы теории энергетических установок подводных подвижных аппаратов / Г. Н. Алексеев. – М.: Наука, 1974. – 287 с.
56. Новиков И.И. Эффективный коэффициент полезного действия атомной энергетической установки // *Атомная энергия*. – 1957. – №11(3). – С. 409-413
57. Curzon F.L., Ahlborn B. // *Amer. J. Phys.* 1975. Vol.43. P-22-24.
58. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. - Москва «Энергоатомиздат» 1983 - 416 с.
59. Довгялло, А.И. Эффективность цикла Ренкина при условии получения максимальной мощности применительно к низкотемпературной энергетической установке, использующей криопродукт как рабочее тело / А.И. Довгялло, Д.А. Угланов, К.Е. Воротынцева, И.А. Архаров // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. — 2020. — № 6. — С. 3-7
60. Тремкина, О.В. Оценка влияния различных факторов на эффективность работы низкотемпературных энергетических установок / О.В. Тремкина, О.А. Манакова, Д.А. Угланов, Е.В. Благин, Р.А. Панышин // *Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», посвященная 110-летию со дня рождения генерального конструктора Н.Д. Кузнецова*. — 2021. — Т. 2. — С. 212-213.

61. Тремкина, О.В. Разработка и создание беспилотных летательных аппаратов с криогенной силовой установкой / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Х. Аденаан // Тепловые процессы в технике. — 2022. — Т. 14. № 6. — С. 255-260.

62. Программа для определения эффективности цикла Ренкина при условии получения минимальной мощности применительно к низкотемпературным энергетическим установкам, использующим криопродукт в качестве рабочего тела / Угланов Д.А., Тремкина О.В., Шихалев В.И., Угланов С.Д., Шиманов А.А. // Программа для ЭВМ №2023617605, опублик. 11.04.2023 г.

63. Зысин Л. В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие. – СПб. : Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.

64. Тремкина, О.В. Оценка показателей эффективности схемных решений установок когенерации на базе ГТУ при использовании СПГ в качестве топлива / И.А. Архаров, А.И. Довгялло, Д.А. Угланов, О.В. Тремкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение — 2023. — № 1. — С. 25-30.

65. CFM International LEAP // Aeronautica.online: [сайт участников авиационного рынка русскоязычный новостной и справочный ресурс о коммерческой (гражданской) авиации]. – URL: <https://aeronautica.online/engines/cfm-international-leap/> (дата обращения 08.06.2023).

66. Формирование математической модели выполненного ГТД различных типов и схем в САЕ-системе АСТРА [Электронный ресурс]: [метод. указания] / М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т); [сост. В. С. Кузьмичев, В. В. Кулагин, И. Н. Крупенич, А. Ю. Ткаченко, В. Н. Рыбаков.]. - Самара: Изд-во СГАУ, 2012. - on-line

67. Терещенко, О.В.\* Выбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов // Насосы. Турбины. Системы. — 2019. — № 2 (31). — С. 30-36.

68. Терещенко, О.В. Выбор оптимального цикла для вспомогательной энергетической установки, работающей в составе криогенной силовой установки / О.В. Тремкина, В.В. Бирюк, С.В. Заика, Е.С. Шатохин // Вестник транспорта Поволжья. — 2020. — № 3 (81). — С. 89-96.

69. Тремкина, О.В. Расчётное исследование энергетических характеристик низкотемпературной энергетической установки, работающей на различных криогенных топливах / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Р.Р. Бадыков, Р.А. Панышин // Насосы. Турбины. Системы. — 2020. — № 3 (36). — С. 40-49

\* Фамилия Терещенко О.В. изменена на Тремкину О.В. в соответствии со свидетельством о заключении брака П-ЕР № 770085, выданным Дворцом бракосочетания городского округа Самара управления ЗАГС Самарской области 21 сентября 2019 года.



70. Тремкина, О.В. Расчёт и подбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде / О.В. Тремкина, В.В. Карнаух, А.Д. Крылова, А.Л. Лопатин, А.С. Мироненкова, Д.А. Угланов // Вестник Международной академии холода. — 2020. — № 2 (75). — С. 9-18.

71. Тремкина, О.В. Выбор оптимальной схемы и расчётное исследование параметров криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, В.В. Урлапкин, С.С. Корнеев, Ю.В. Комисар // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2021. — Т. 20. № 4. — С. 59-68.

72. Тремкина, О.В. Энергетический комплекс на СПГ, интегрированный с воздухоразделительной установкой и низкотемпературными энергоустановками / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, О.А. Манакова, А.Б. Шиманова // Вестник Международной академии холода. — 2022. — № 3. — С. 3-12.

73. Тремкина, О.В. Комплексная методика оценки эффективности термомеханического компрессора / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Е.В. Благин // Насосы. Турбины. Системы. — 2022. — № 1 (42). — С. 56-71.

74. Тремкина, О.В. Оценка показателей эффективности схемных решений установок когенерации на базе ГТУ при использовании СПГ в качестве топлива / И.А. Архаров, А.И. Довгялло, Д.А. Угланов, О.В. Тремкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение — 2023. — № 1. — С. 25-30.

75. Tereshchenko, O.V. Calculation of the energy complex based on a steam gas installation assessment of the parameters of the contour of the auxiliary steam power plant installation [Text] / O.V. Tremkina, E.S. Gaev, R.A. Panshin, A.A. Shimanov, E.S. Shatohin, D.A. Uglanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — V. 692. Issue 1.

76. Tereshchenko, O.V. Calculation of parameters of the cryogenic rotor-blade engine for the drive of the refrigeration unit for truck / O.V. Tremkina, D.A. Uglanov, S.V. Zaika, I.A. Neverov, R.A. Panshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — V. 692. Issue 1.

77. Tereshchenko, O.V. Calculation and determination of energy parameters of the mini-chp on the basis of the heat pump / O.V. Tremkina, Yu.I. Grinyuk, R.A. Panshin, A.A. Shimanov, D.A. Uglanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 692. Issue 1.

78. Tereshchenko, O.V. Comparative Analysis of Power Plants Using Low Potential Heat of Liquefied Natural Gas (LNG) [Text] / O.V. Tremkina, D.A. Uglanov, E.V. Blagin, R.A.

Panshin, V.V. Biryuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 692. Issue 1.

79. Tremkina, O.V. Calculation of energy parameters of LNG power plant with utilization its cold energy / O.V. Tremkina, D.A. Uglanov, D.V. Sarmin, O.A. Manakova, A.L. Lopatin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 926. Issue 1.

80. Tremkina, O.V. LNG power complex integrated with air separation unit and low-temperature power plant / O.V. Tremkina, D.A. Uglanov, D.V. Sarmin, O.A. Manakova // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, CEECT 2021. – 2021. – P. 187-190.

81. Tremkina, O.V. Comprehensive Solution to Improve the Efficiency of the LNG Energy Complex Through the Use Cold Energy of Cryoproducts [Text] / O.V. Tremkina, O.A. Manakova, R.A. Panshin // Proceedings - 2021 7th International Conference on Mechanical Engineering and Automation, ICMEAS 2021. – 2021. – P. 155-159.

82. Терещенко, О.В. Определение эффективности паротурбинных установок, утилизирующих низкопотенциальное тепло криопродукта / О.В. Трёмкина, А.В. Заика, Д.А. Угланов, Е.В. Благин // Международная молодёжная научная конференция "XIV Королевские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 381-382.

83. Терещенко, О.В. Определение эффективности газотурбинных установок, утилизирующих низкопотенциальное тепло криопродукта / О.В. Трёмкина, Е.В. Благин // XIV Королёвские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 426-428.

84. Терещенко, О.В. Оптимизация термодинамического цикла установок, использующих низкопотенциальное тепло сжиженного природного газа / О.В. Трёмкина, Д.А. Угланов, Е.В. Благин // Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития двигателестроения". – 2018. – С. 119-121.

85. Трёмкина, О.В. Энергетический комплекс на жидком метане, объединенный с воздухоразделительной установкой и низкотемпературными силовыми установками / О.В. Трёмкина, О.А. Манакова // Молодёжная научная конференция «XLVIII Гагаринские чтения». – 2022. – С. 139-140.

86. Программа для расчёта каскада турбин энергетического комплекса на основе ёмкости с криогенной заправкой / Угланов Д.А., Благин Е.В., Шиманова А.Б., Шиманов А.А., Марахова Е.А., Трёмкина О.В., Сивуха Д.В. // Программа для ЭВМ № 2023617910, опубл. 17.04.2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

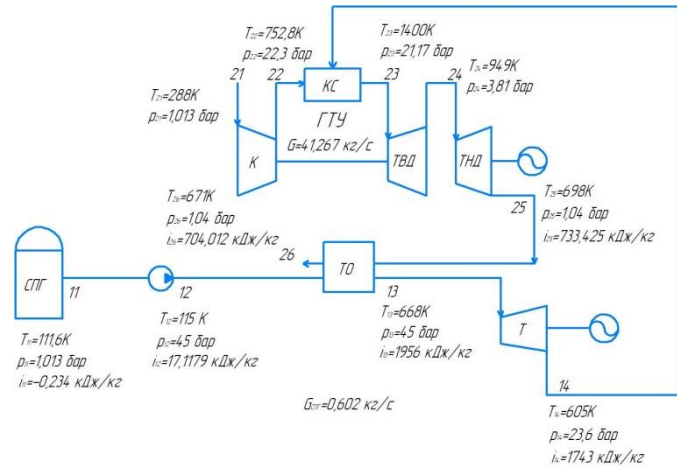
Схемы и параметры циклов НЭУ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

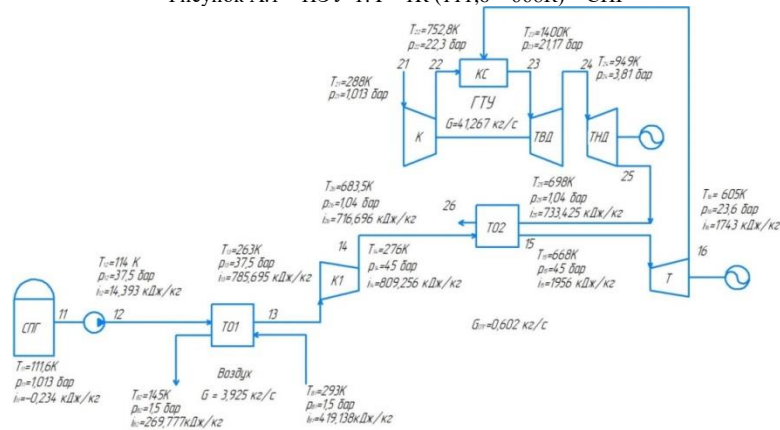
Схемы и параметры циклов НЭУ

А.1 Схемы и параметры циклов одноконтурных НЭУ

Схемы одноконтурных НЭУ (НЭУ-1 и НЭУ-2) по типу распределения подводимой тепловой энергии между контурами являются последовательными, верхний источник теплоты – выхлопные газы. Суммарная энергия вырабатывается ГТУ и турбиной вспомогательного контура. Подача СПГ осуществляется в камеру сгорания ГТУ, одновременно с этим СПГ используется как источник НЭ.



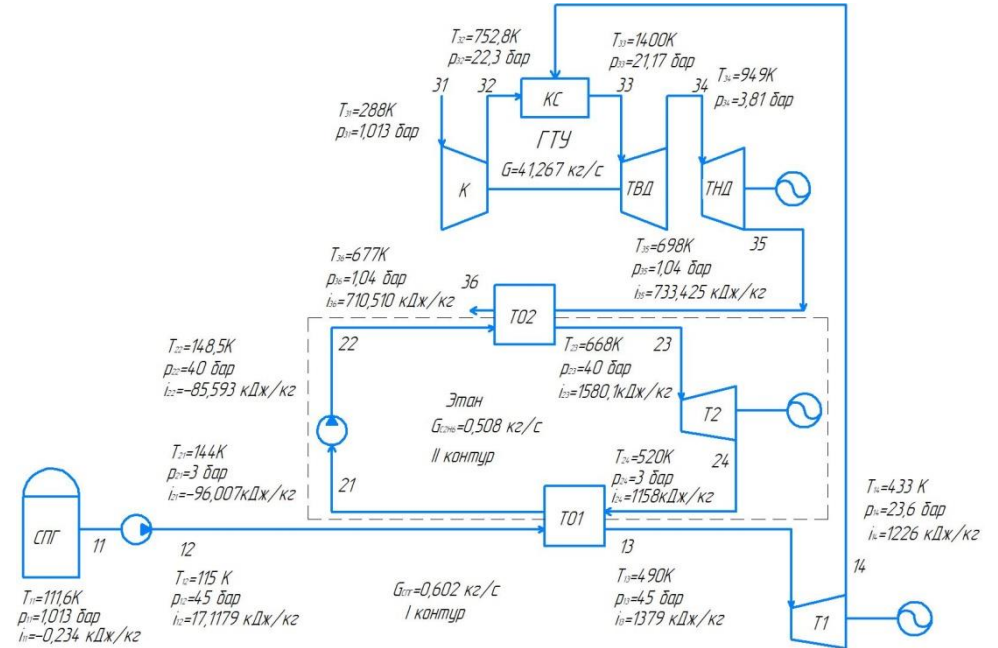
Т – турбина, ТО – теплообменный аппарат, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания, К – компрессор  
 Рисунок А.1 – НЭУ-1: I – 1R (111,6 – 668K) – СПГ



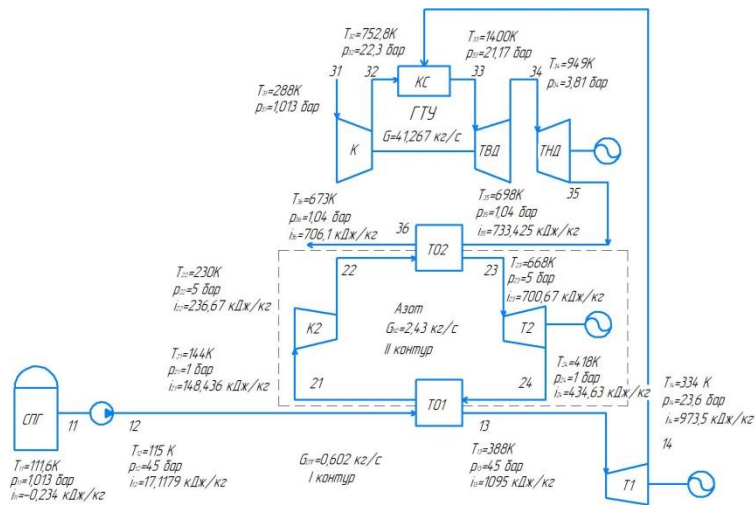
Т – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.2 – НЭУ-2: I – 1B (111,6 – 668K) – СПГ

А.2 Схемы и параметры циклов двухконтурных НЭУ

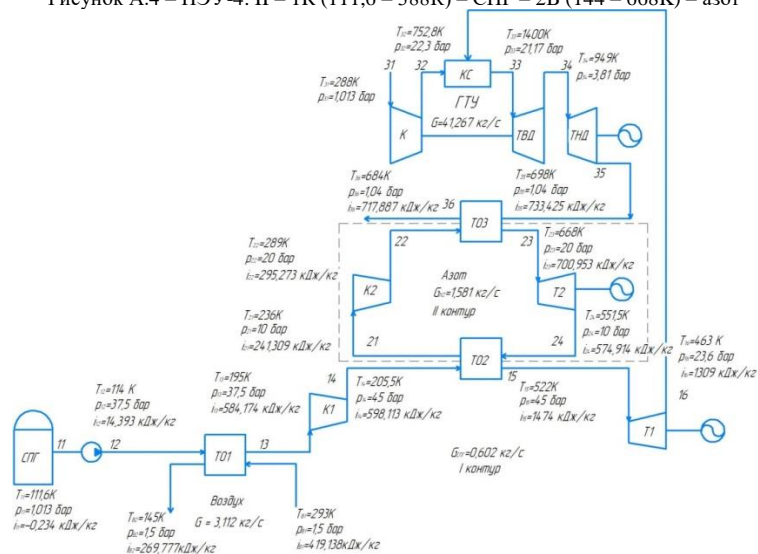
По типу распределения подводимой тепловой энергии между контурами схемы НЭУ-3, НЭУ-4 и НЭУ-5 являются последовательными, а схемы НЭУ-6, НЭУ-7, НЭУ-8 и НЭУ-9 – параллельными, верхний источник теплоты – выхлопные газы. Суммарная энергия вырабатывается газовой турбиной ГТУ и двумя турбинами, входящими в контуры, которые работают по циклу Ренкина или по циклу Брайтона. Подача СПГ осуществляется в камеру сгорания ГТУ, одновременно с этим СПГ используется как низший источник тепла.



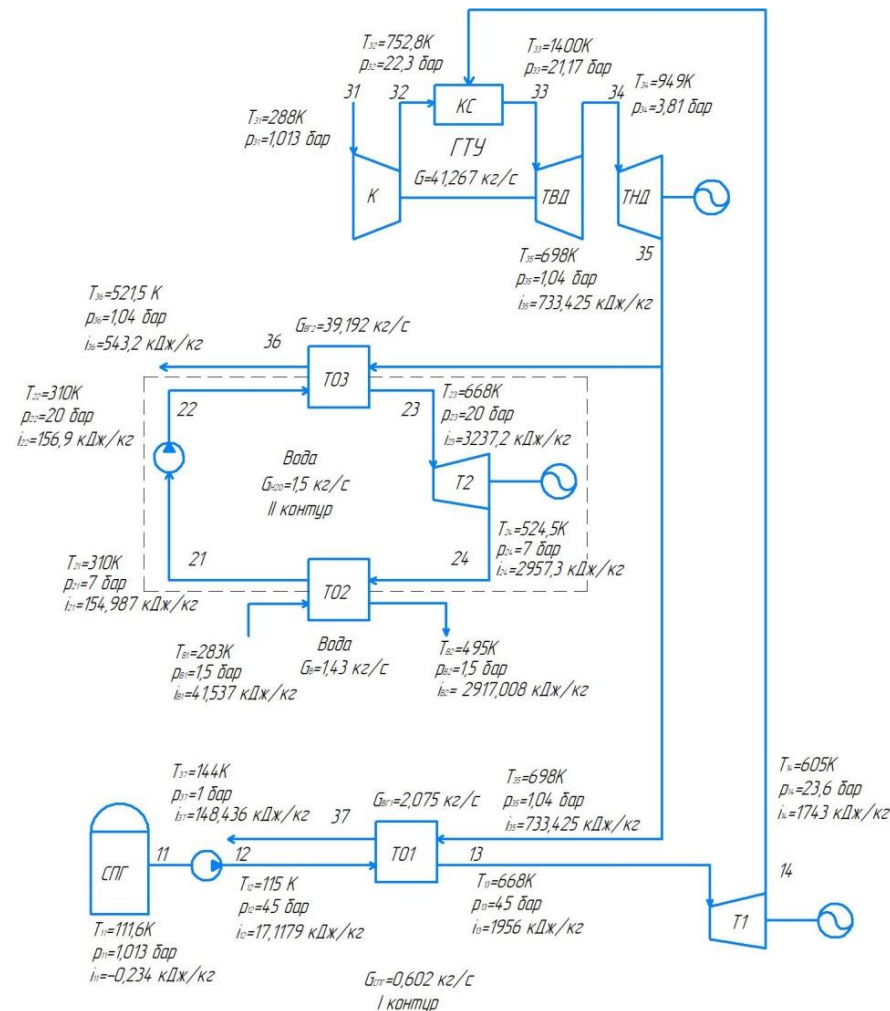
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.3 – НЭУ-3: II – 1R (111,6 – 490K) – СПГ – 2R (144 – 668K) – этан



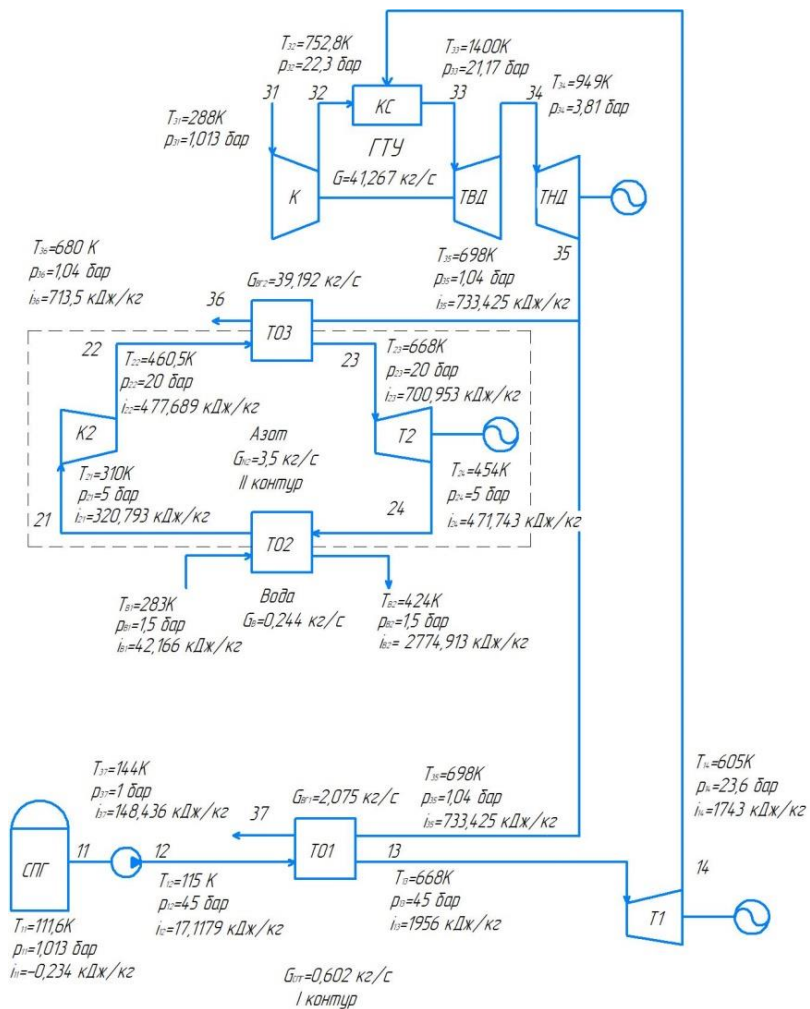
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.4 – НЭУ-4: П – 1R (111,6 – 388К) – СПГ – 2В (144 – 668К) – азот



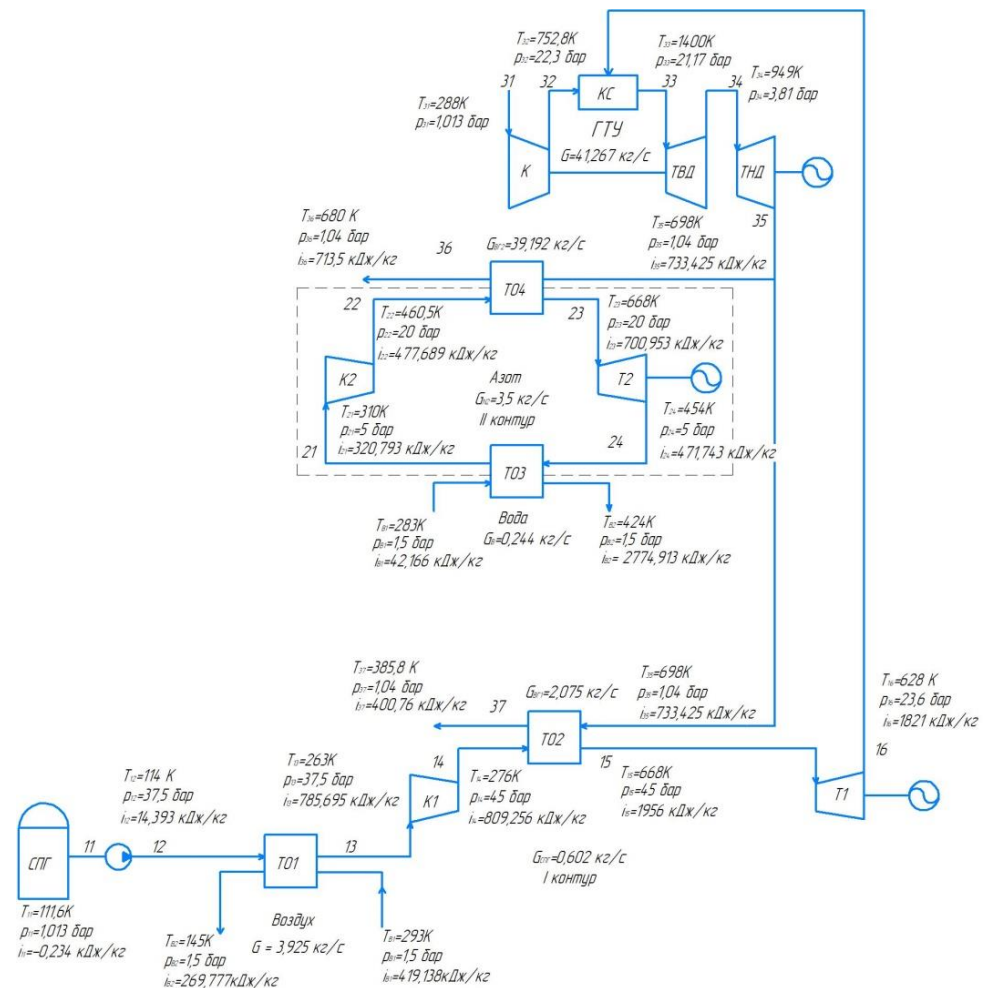
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.5 – НЭУ-5: П – 1В (111,6 – 522К) – СПГ – 2В (236 – 668К) – азот



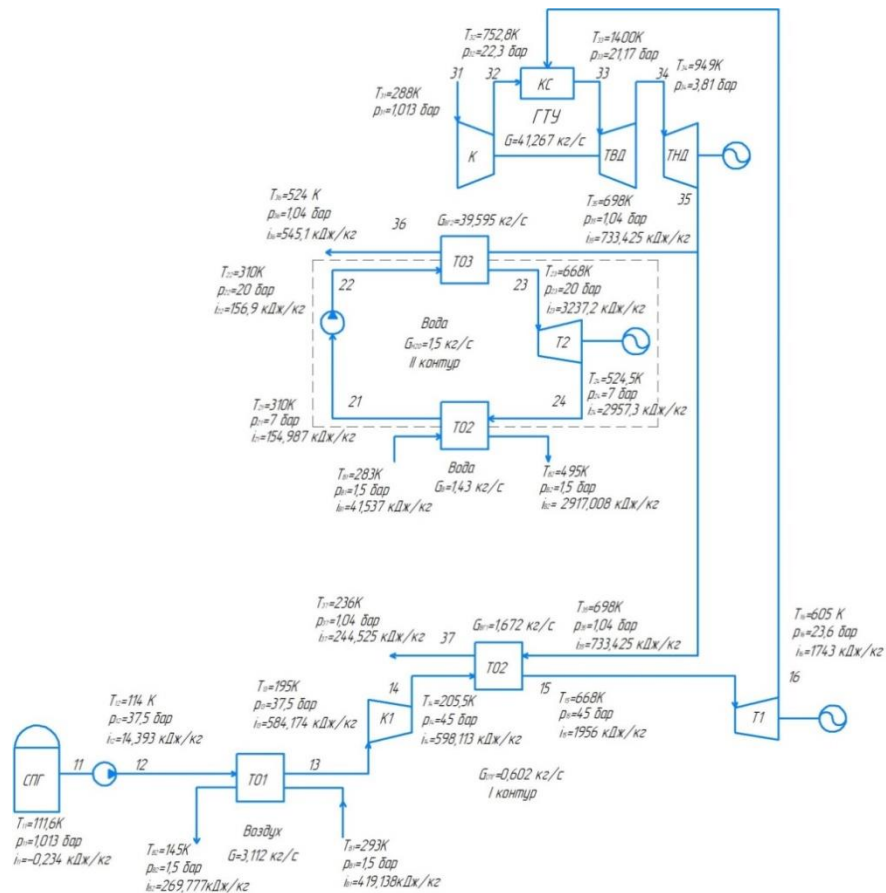
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.6 – НЭУ-6: П – 1R (111,6 – 668К) – СПГ – 2R (310 – 668К) – вода



Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.7 – НЭУ-7: П – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2В (310 – 668K) – азот



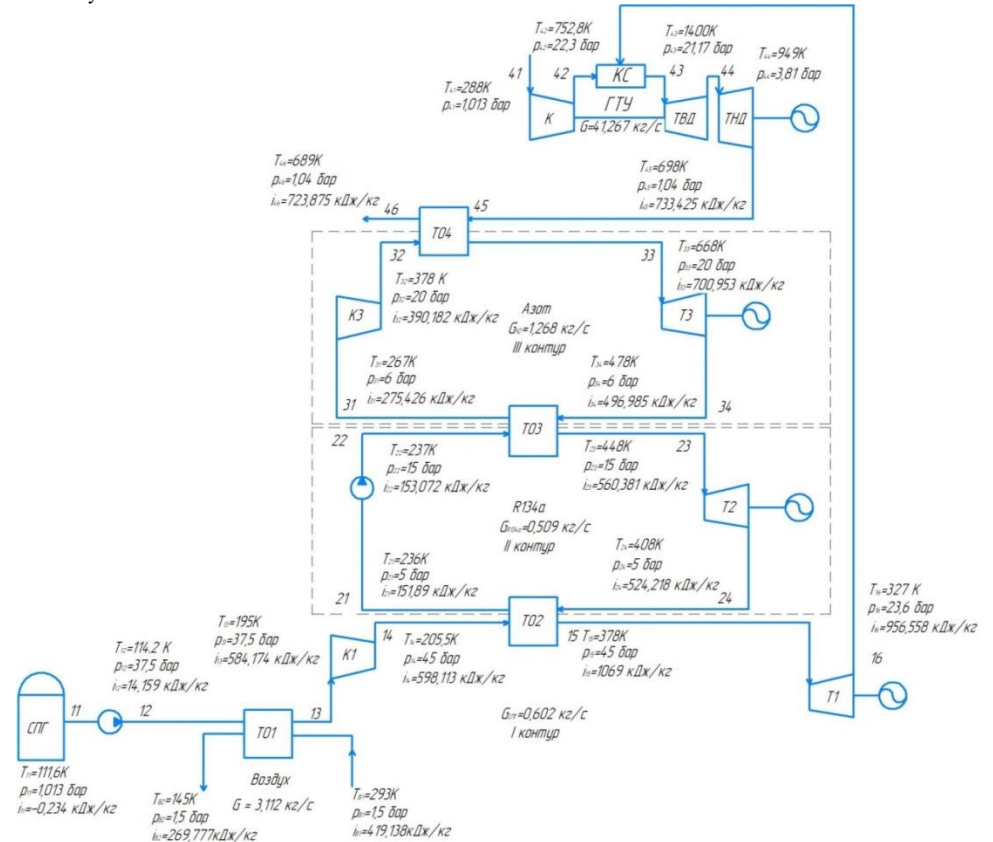
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.8 – НЭУ-8: П – 1В (111,6 – 668K) – СПГ – 2В (310 – 668K) – азот



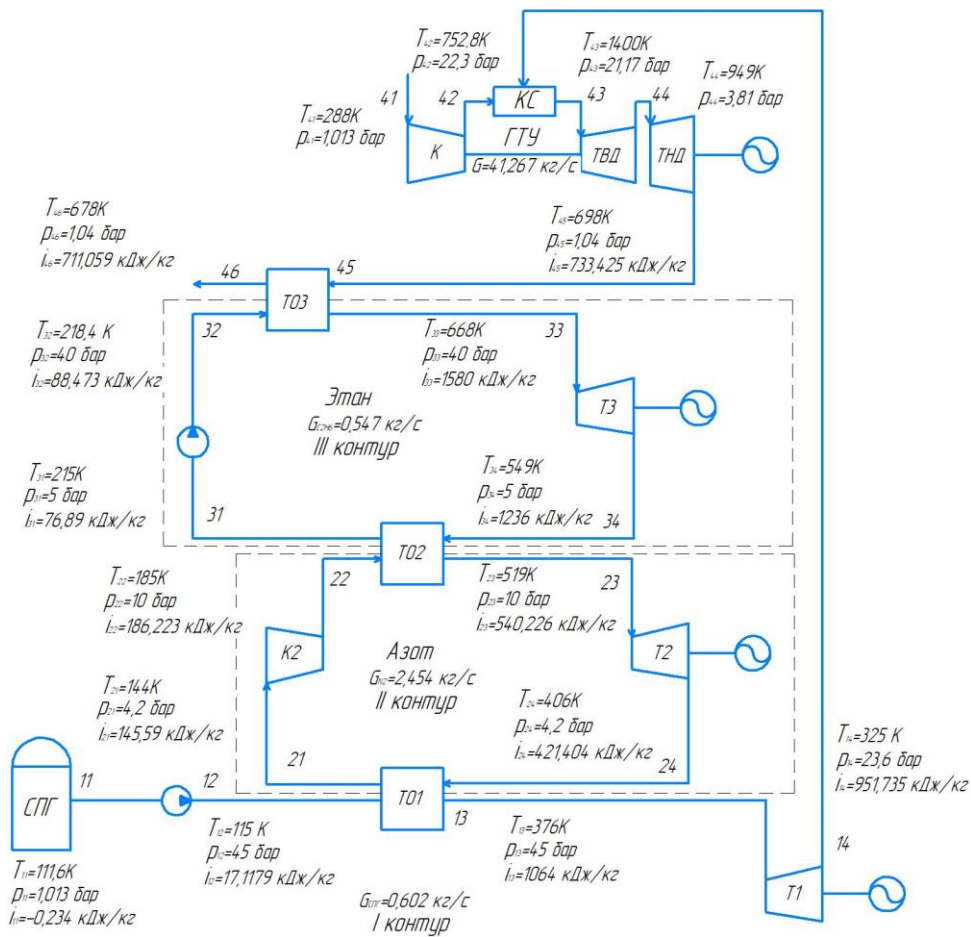
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.9 – НЭУ-9: П – 1В (111,6 – 668К) – СПГ – 2R (310 – 668К) – вода

### А.3 Схемы и параметры циклов трёхконтурных НЭУ

По типу распределения подводимой тепловой энергии между контурами схемы НЭУ-10 – НЭУ-17 являются последовательными, схемы НЭУ-18 – НЭУ-25 являются последовательно-параллельными, а схемы НЭУ-26 – НЭУ-33 являются параллельными. Верхний источник теплоты – выхлопные газы. В трёхконтурных НЭУ суммарная энергия вырабатывается газовой турбиной ГТУ и тремя турбинами, входящими во вспомогательные контуры, которые работают по циклу Брайтона или по циклу Ренкина. Подача СПГ осуществляется в камеру сгорания ГТУ, одновременно с этим СПГ используется как низший источник тепла.



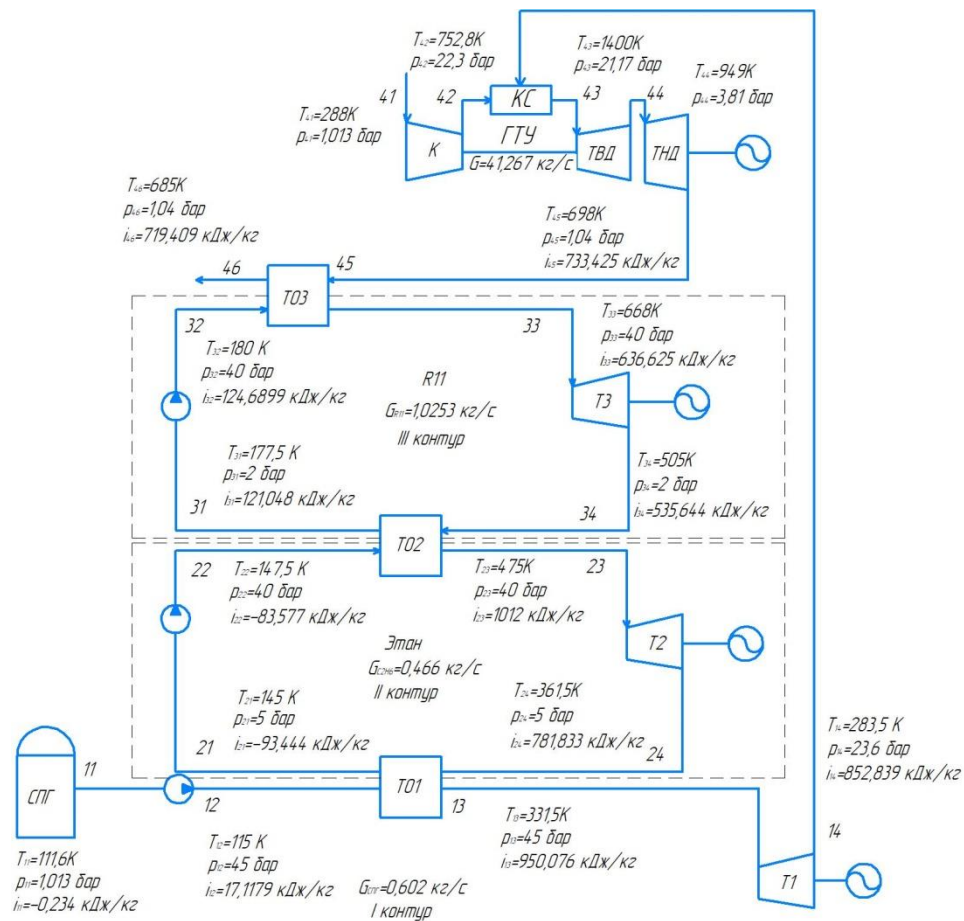
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.10 – НЭУ-10:  
 П – 1В (111,6 – 378К) – СПГ – 2R (236 – 448К) – R134a – 3В (267 – 668К) – азот



$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.11 – НЭУ-11:

III – 1R (111,6 – 376K) – СПГ – 2B (144 – 519K) – азот – 3R (215 – 668K) – этан

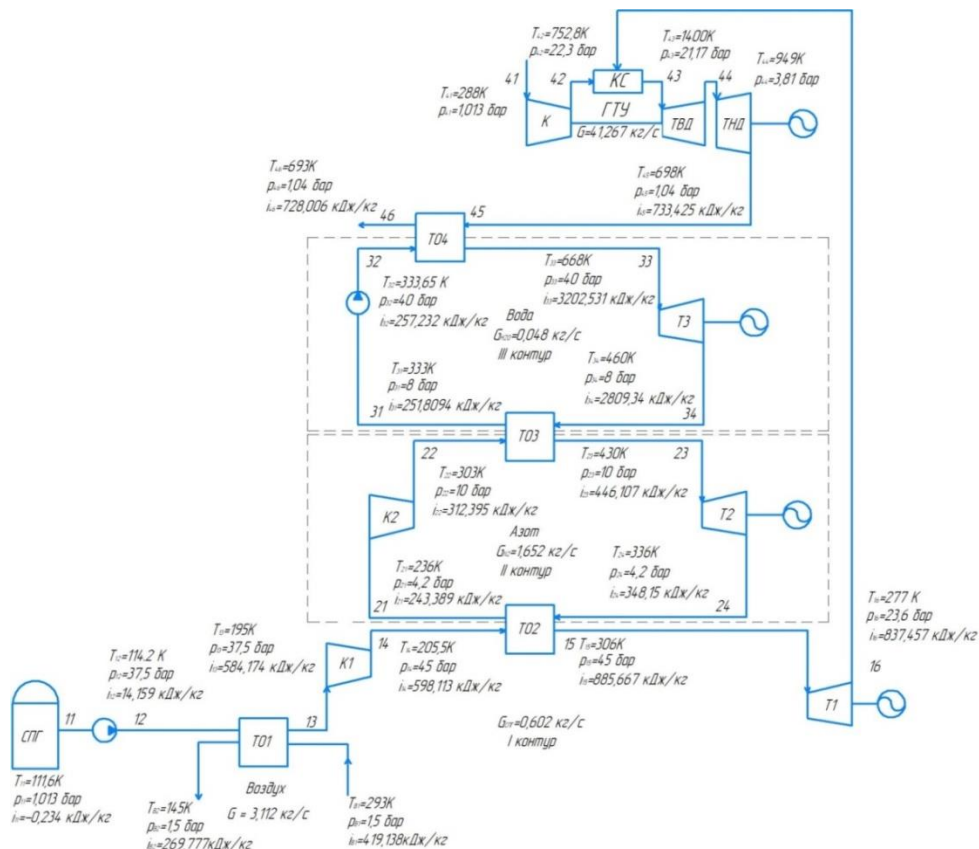


$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.12 – НЭУ-12:

III – 1R (111,6 – 331,5K) – СПГ – 2R (145 – 475K) – этан – 3R (177,5 – 668K) – R11

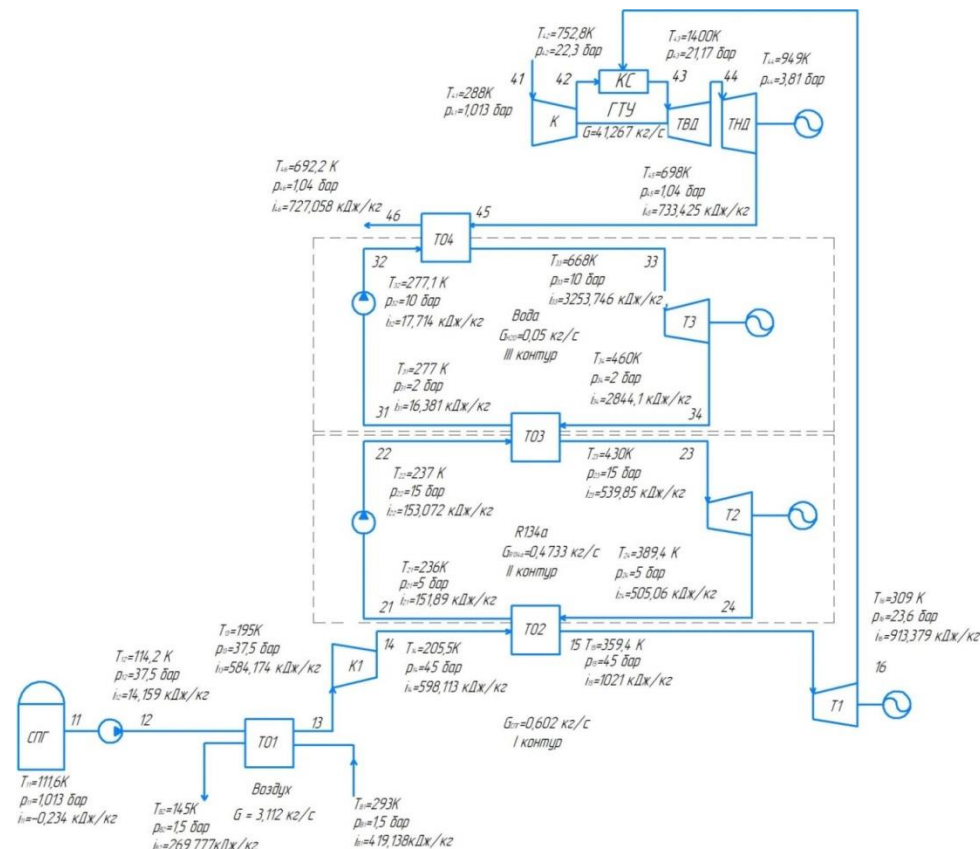




$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.13 – НЭУ-13:

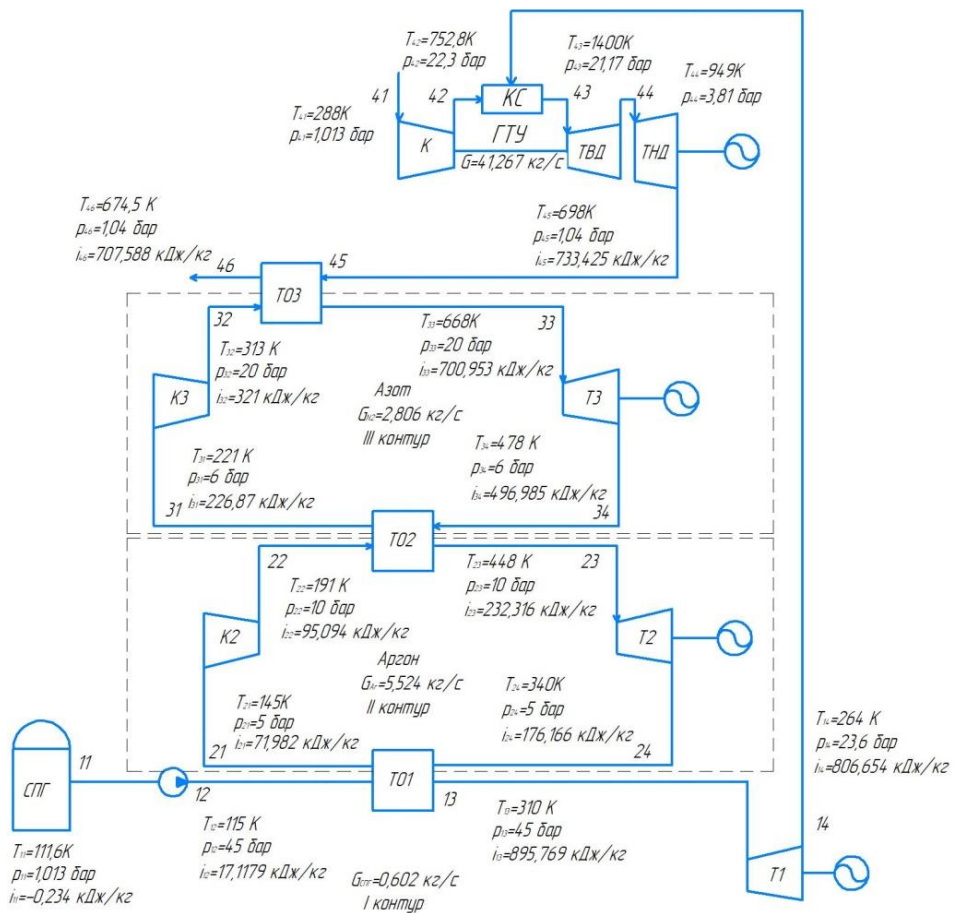
III – 1В (111,6 – 306К) – СПГ – 2В (236 – 430К) – азот – 3R (333 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.14 – НЭУ-14:

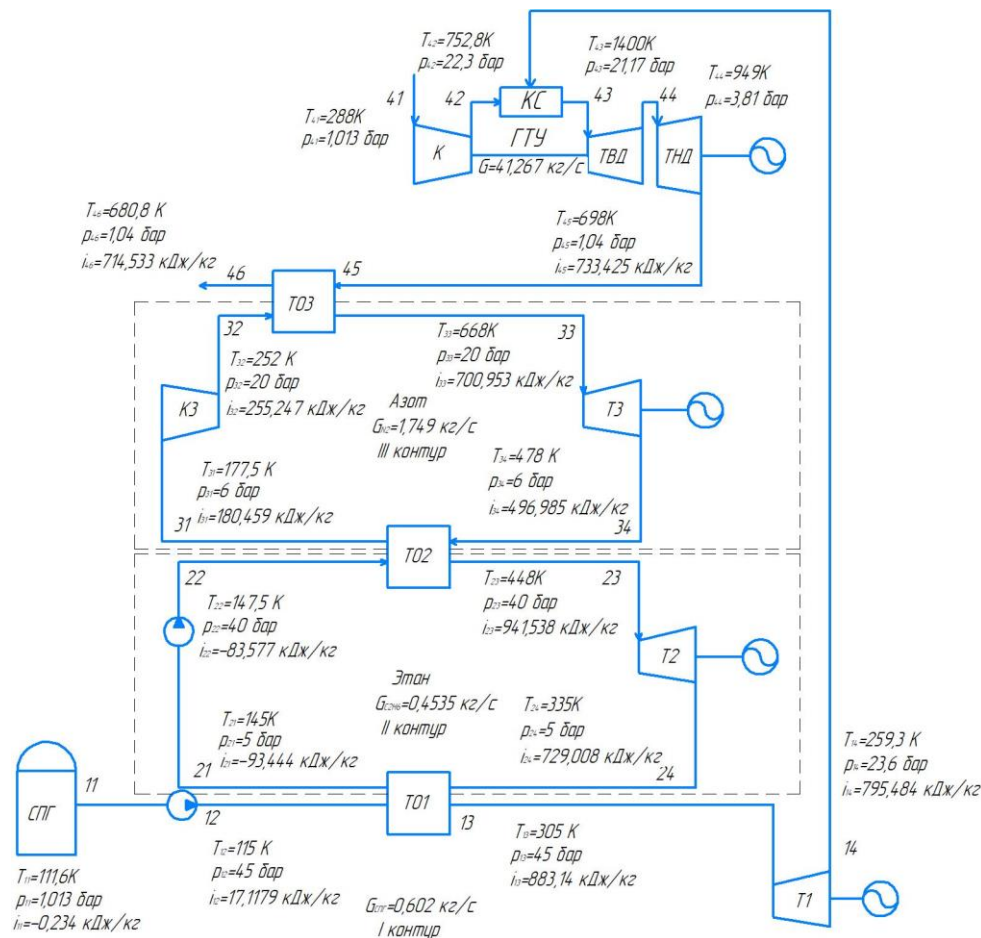
III – 1В (111,6 – 359,4К) – СПГ – 2R (236 – 430К) – R134a – 3R (277 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  
 $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

Рисунок А.15 – НЭУ-15:

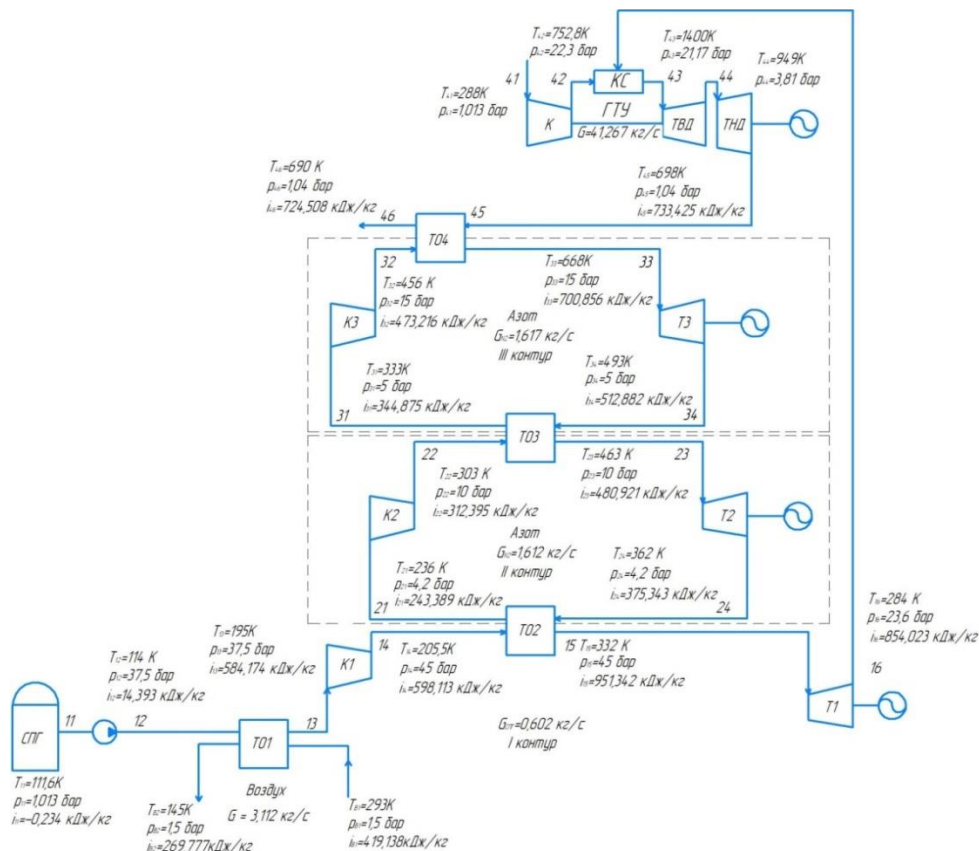
III – 1R (111,6 – 310K) – СПГ – 2B (145 – 448K) – аргон – 3R (221 – 668K) – азот



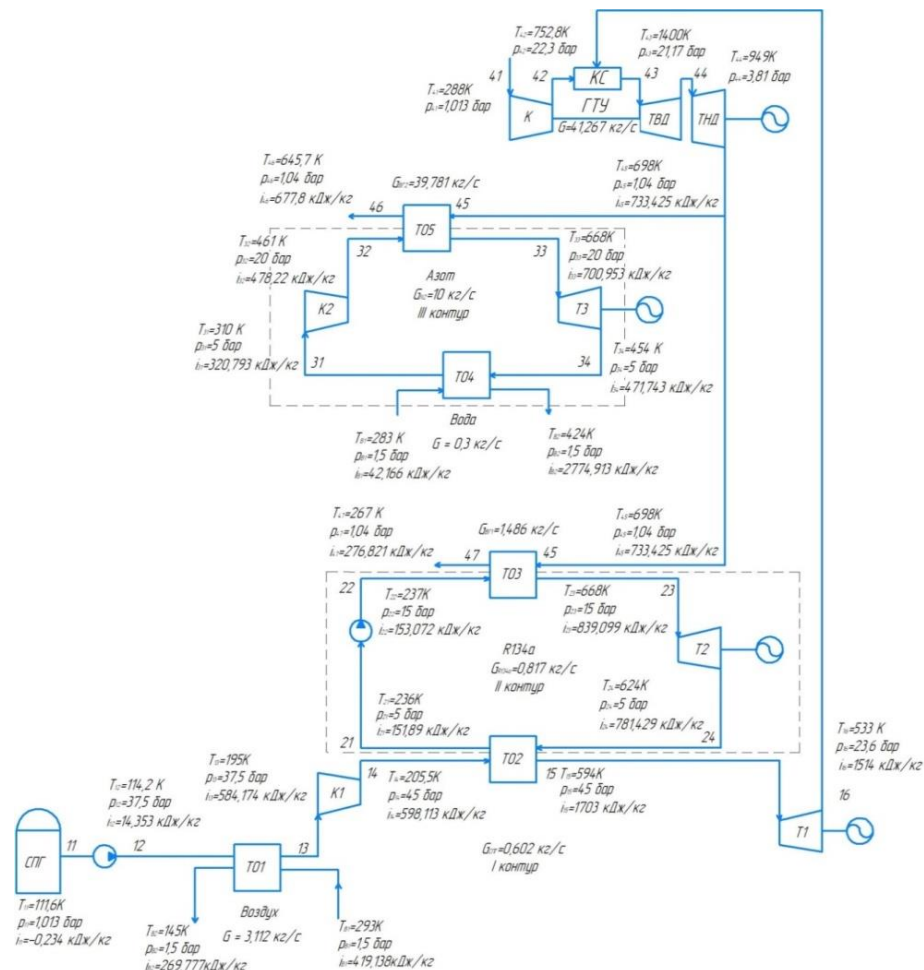
$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  
 $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

Рисунок А.16 – НЭУ-16:

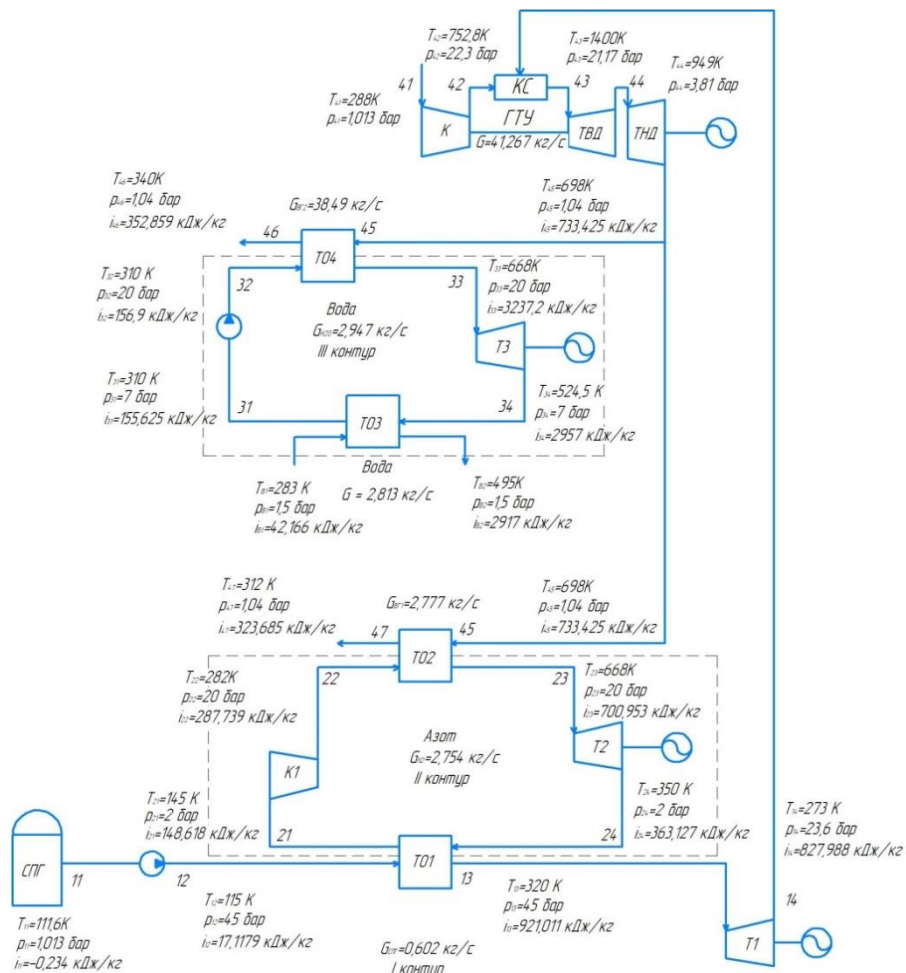
III – 1R (111,6 – 305K) – СПГ – 2R (145 – 448K) – этан – 3B (177,5 – 668K) – азот



$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.17 – НЭУ-17:  
 III – 1В (111,6 – 332К) – СПГ – 2В (236 – 463К) – азот – 3В (333 – 668К) – азот



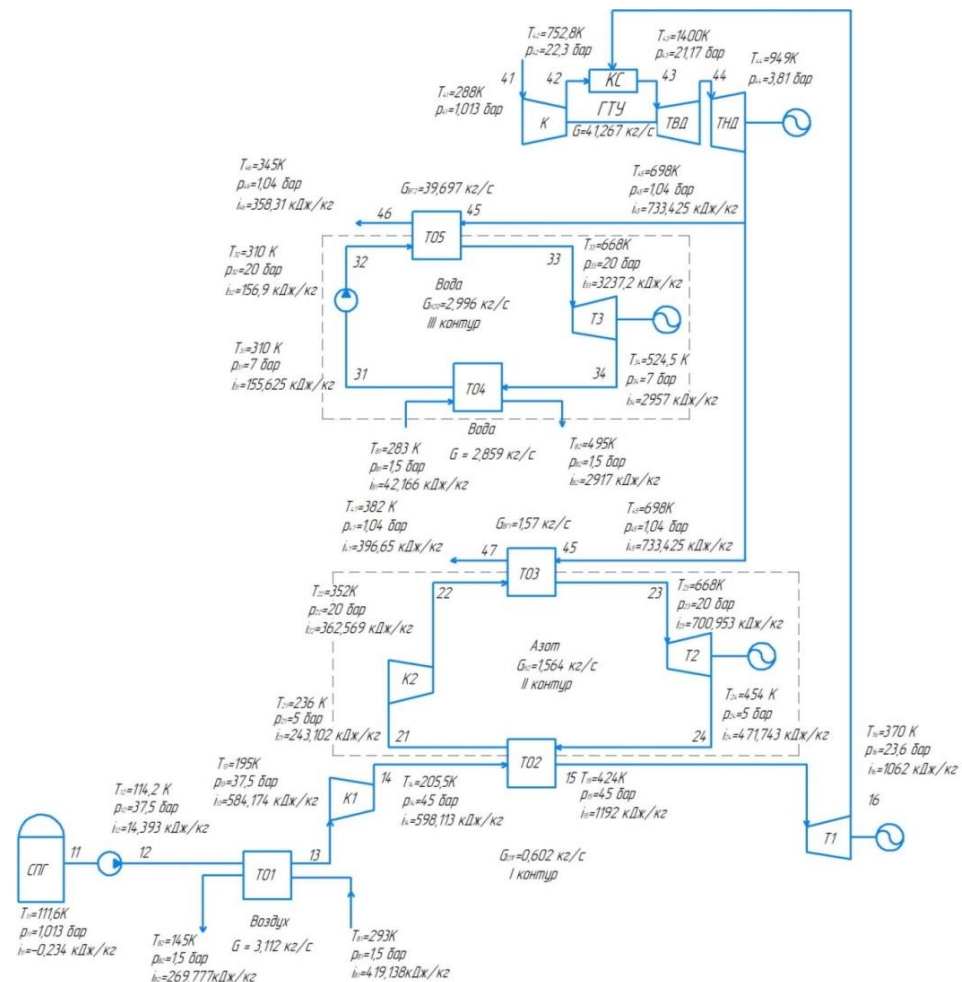
$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.18 – НЭУ-18:  
 III – 1В (111,6 – 594К) – СПГ – 2R (236 – 668К) – R134a – 3В (310 – 668К) – азот



Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.19 – НЭУ-19:

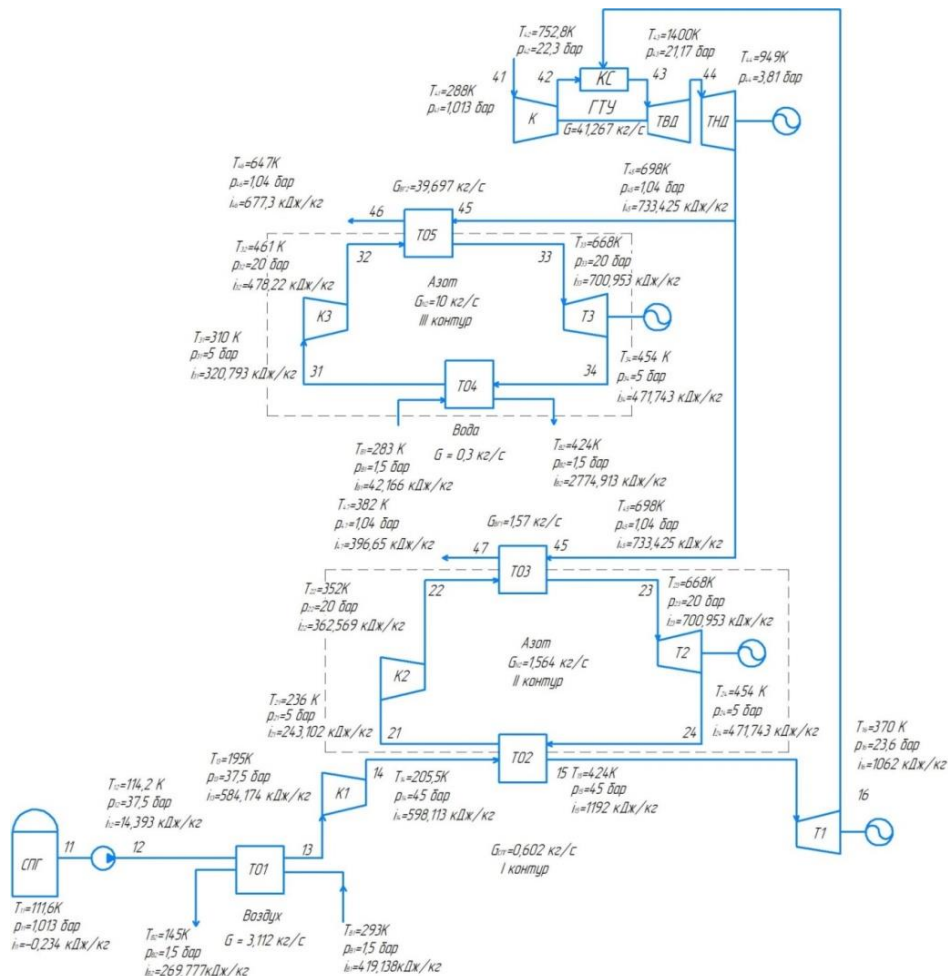
III – 1R (111,6 – 320K) – СПГ – 2В (145 – 668K) – азот – 3R (310 – 668K) – вода



Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.20 – НЭУ-20:

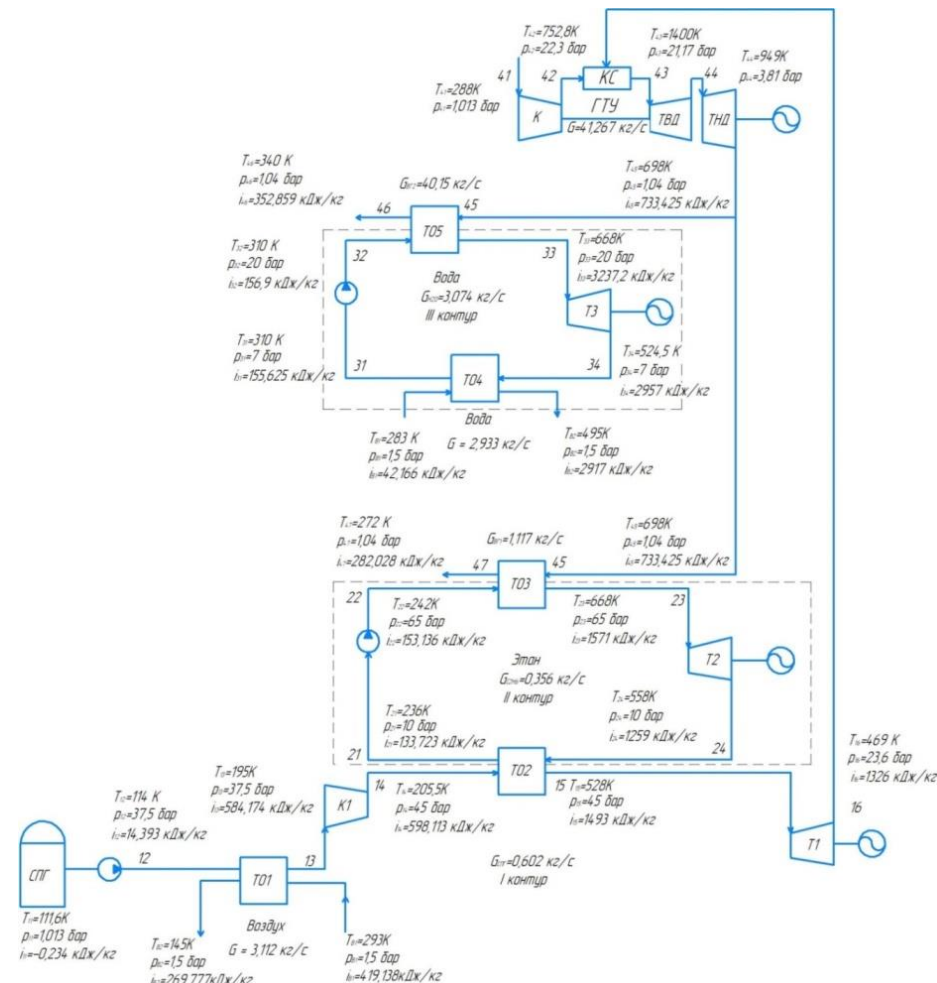
III – 1В (111,6 – 424K) – СПГ – 2В (236 – 668K) – азот – 3R (310 – 668K) – вода



$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.21 – НЭУ-21:

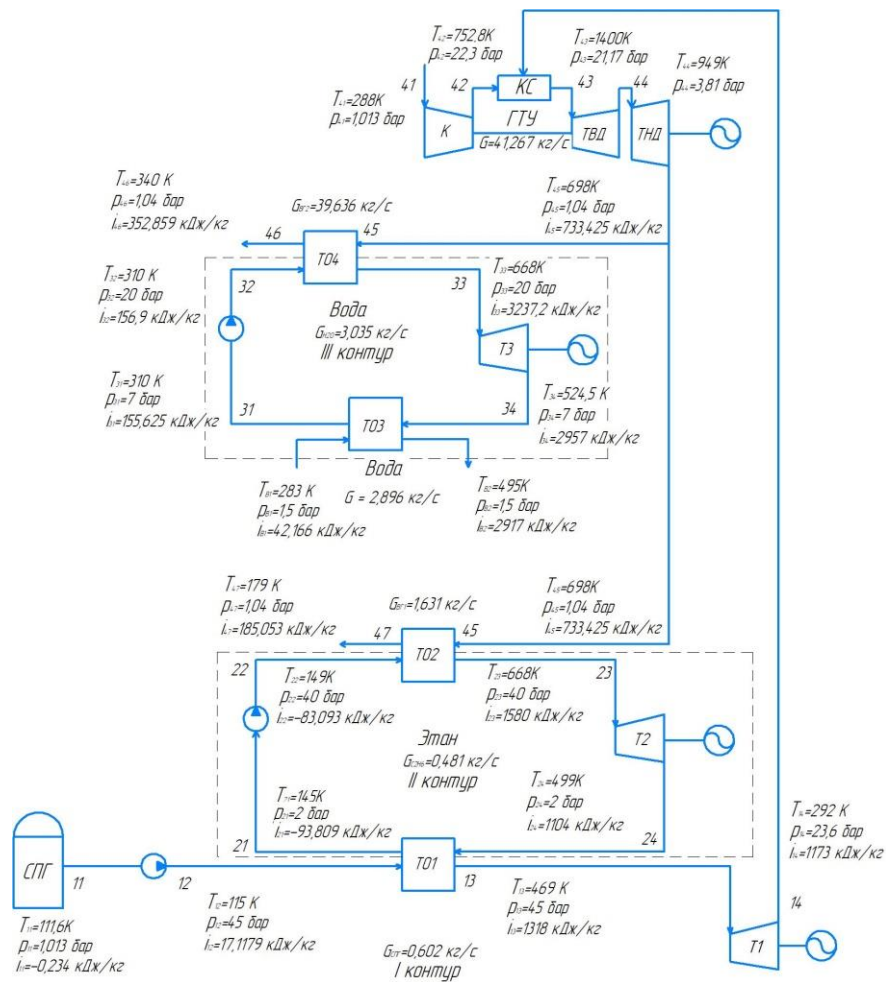
III – 1В (111,6 – 424К) – СПГ – 2В (236 – 668К) – азот – 3В (310 – 668К) – азот



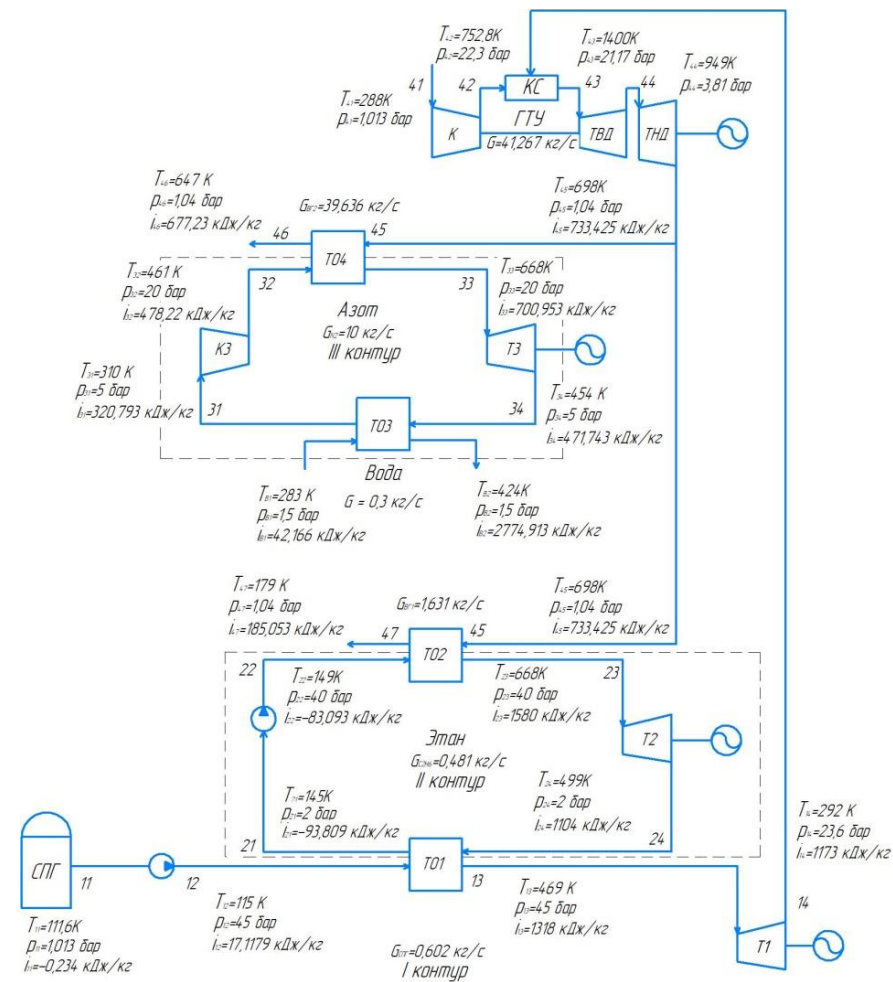
$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.22 – НЭУ-22:

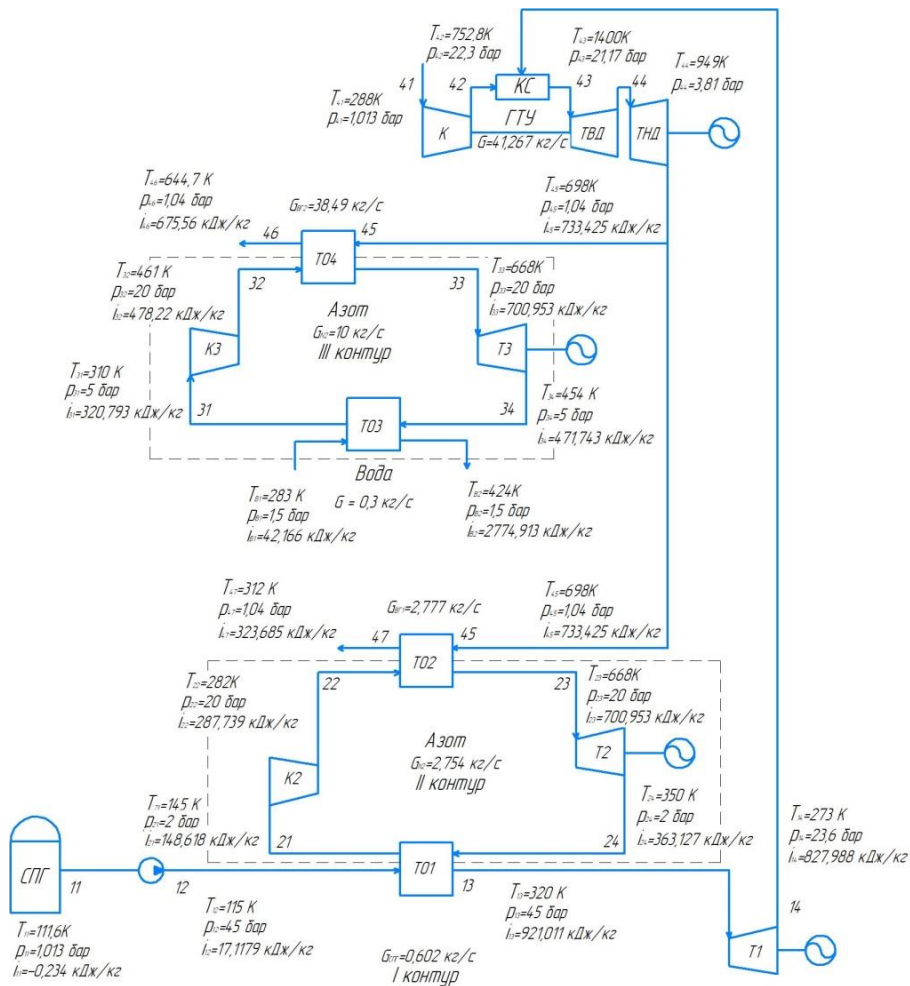
III – 1В (111,6 – 528К) – СПГ – 2R (236 – 668К) – этан – 3R (310 – 668К) – вода



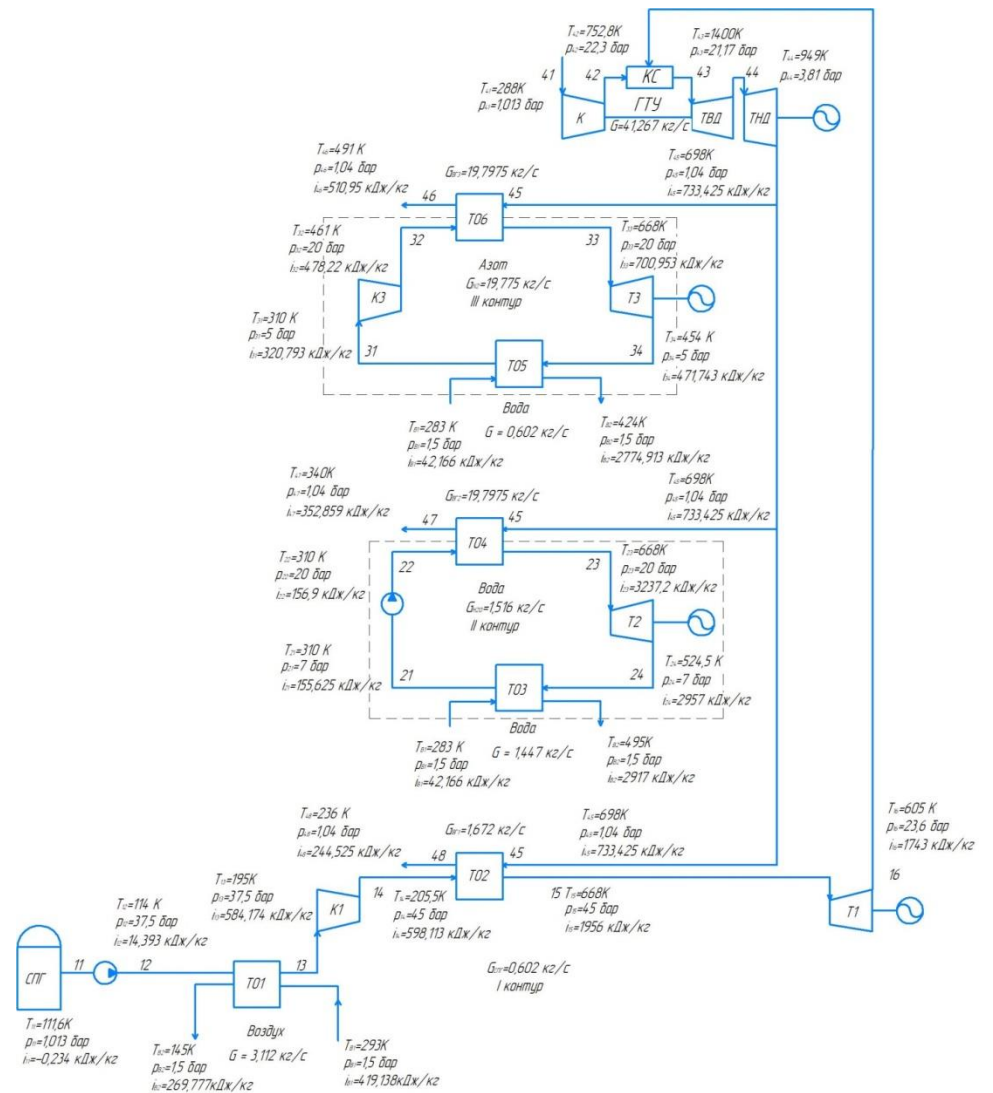
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.23 – НЭУ-23:  
 III – 1R (111,6 – 469K) – СПГ – 2R (145 – 668K) – этан – 3R (310 – 668K) – вода



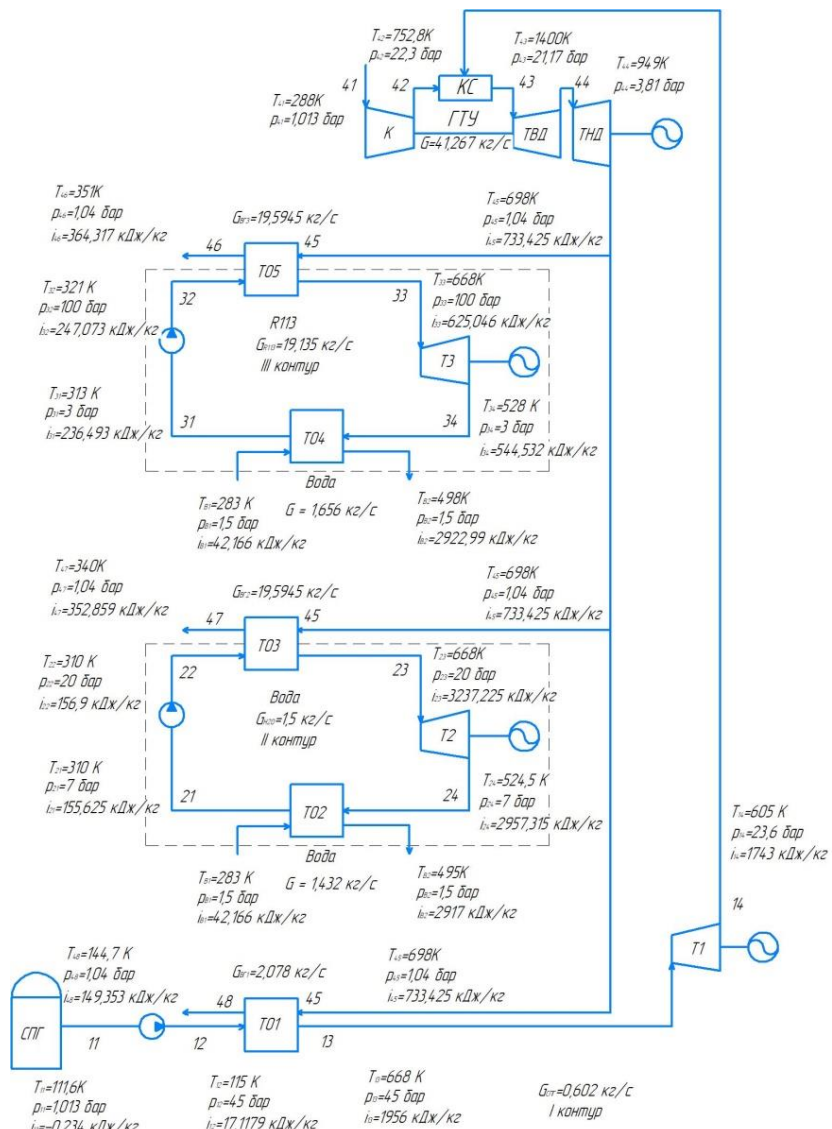
Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.24 – НЭУ-24:  
 III – 1R (111,6 – 469K) – СПГ – 2R (145 – 668K) – этан – 3B (310 – 668K) – азот



$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.25 – НЭУ-25:  
 Ш – 1R (111,6 – 320K) – СПГ – 2B (145 – 668K) – азот – 3B (310 – 668K) – азот



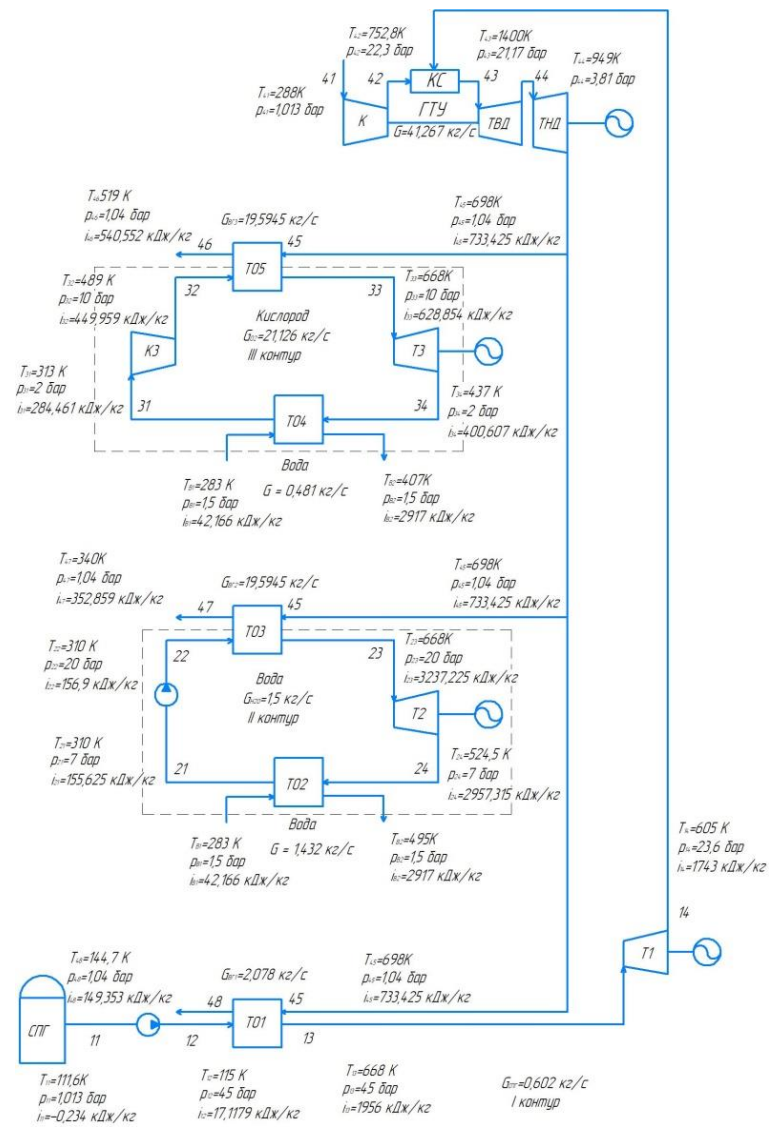
$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.26 – НЭУ-26:  
 Ш – 1B (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (310 – 668K) – вода – 3B (310 – 668K) – азот



Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.27 – НЭУ-27:

III – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (310 – 668K) – вода – 3R (313 – 668K) – R113

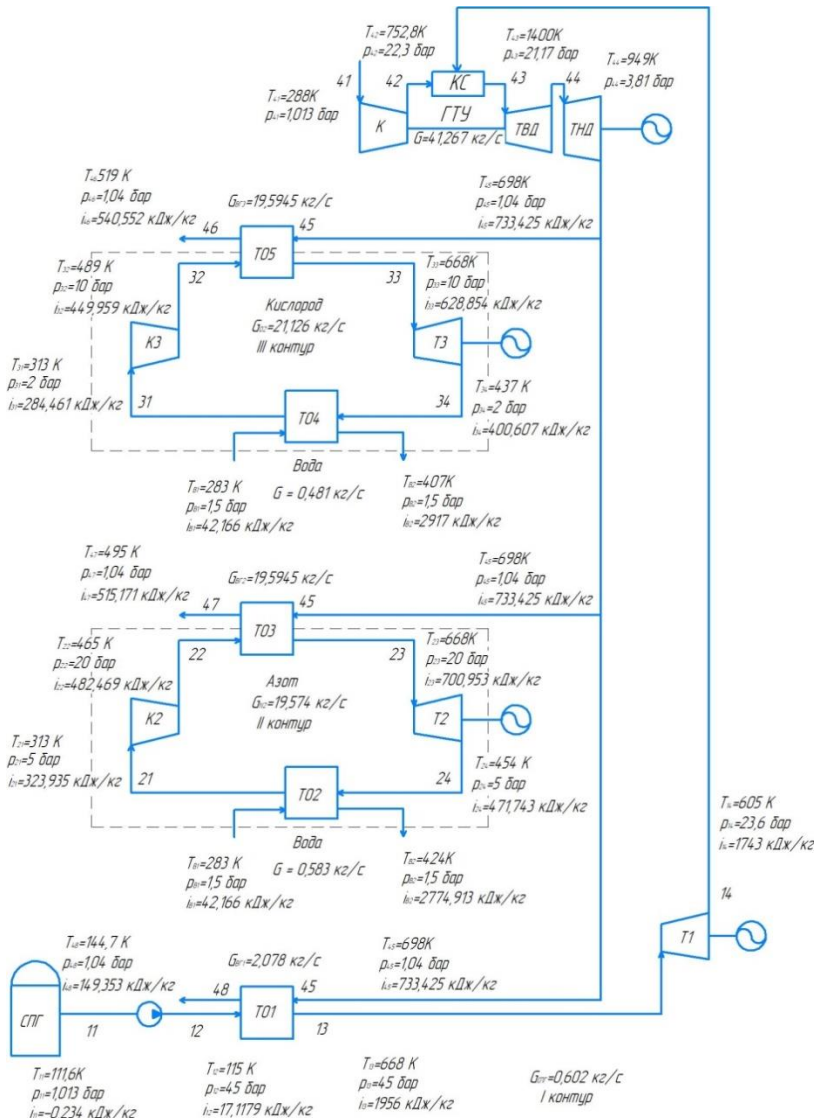


Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.28 – НЭУ-28:

III – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (310 – 668K) – вода – 3В (313 – 668K) – кислород

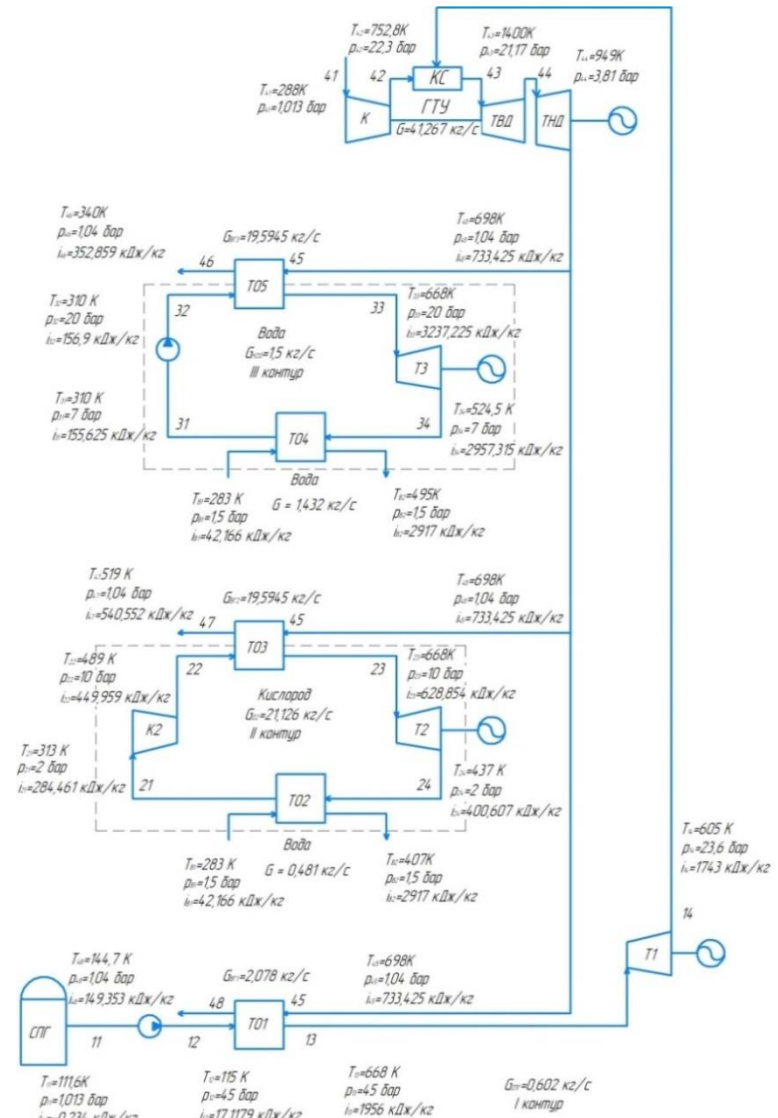




$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $TНД$  – турбина низкого давления,  
 $TВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

Рисунок А.29 – НЭУ-29:

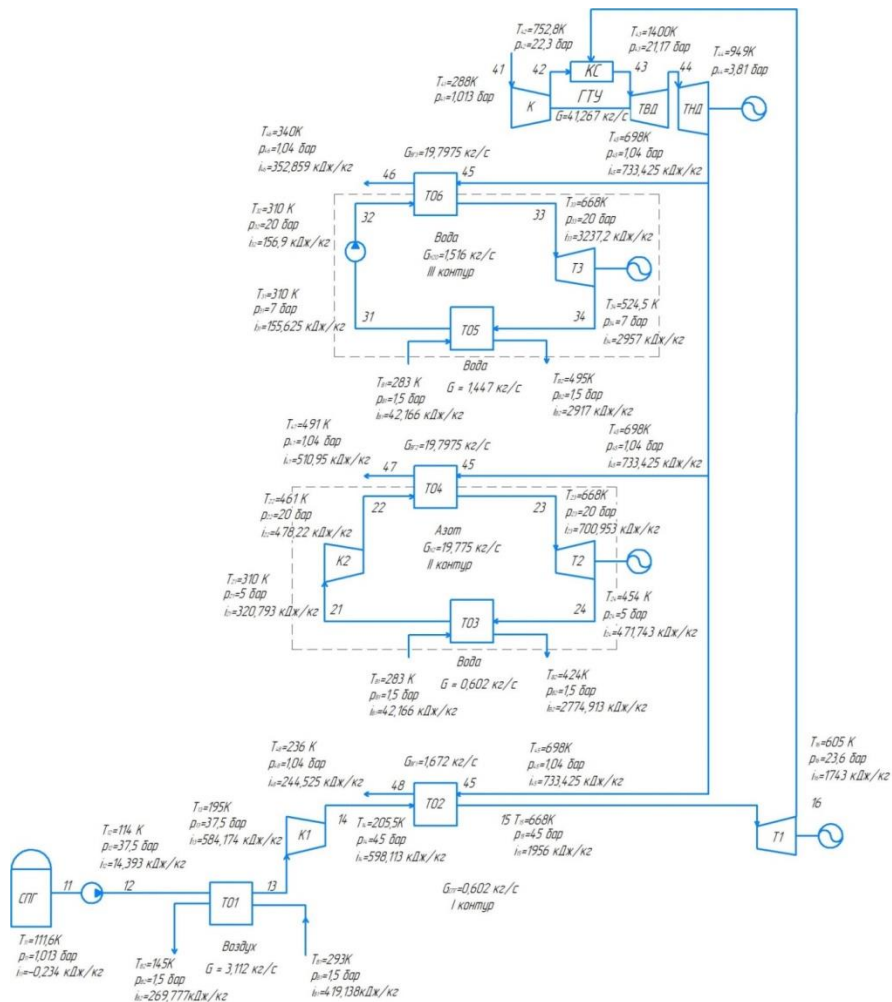
III – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2B (313 – 668K) – азот – 3B (313 – 668K) – кислород



$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $TНД$  – турбина низкого давления,  
 $TВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

Рисунок А.30 – НЭУ-30:

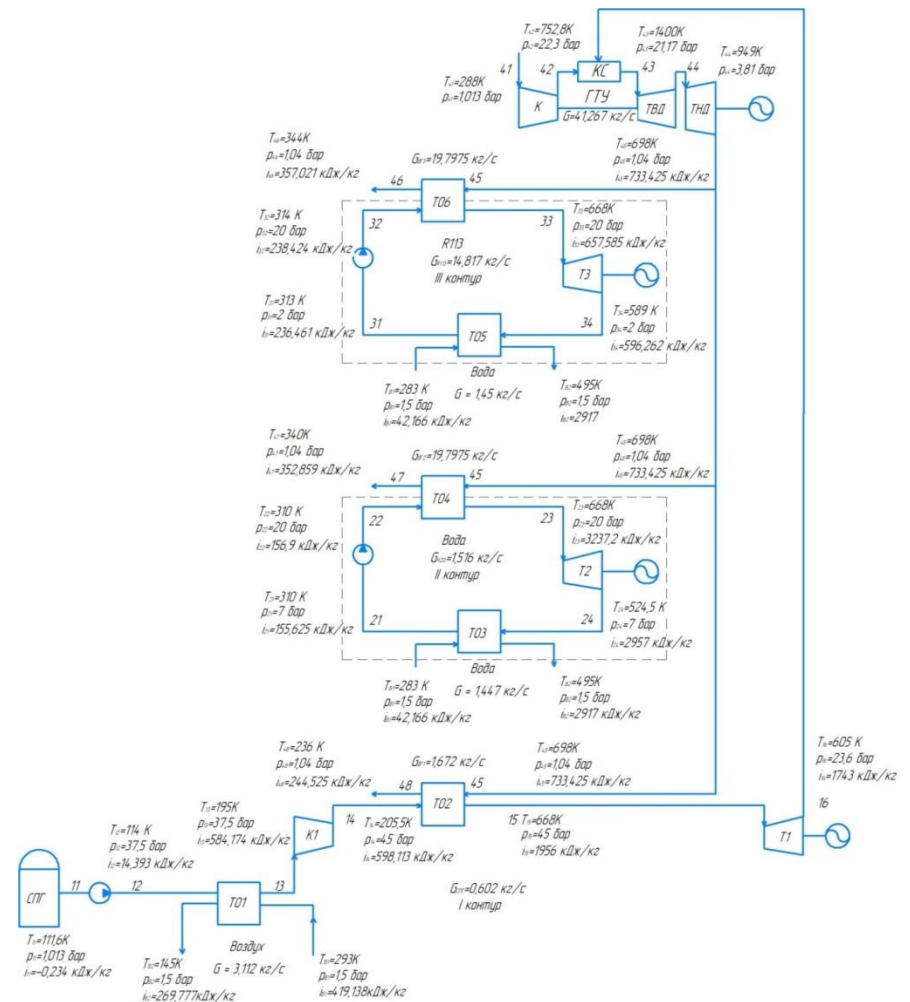
III – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2B (313 – 668K) – кислород – 3R (310 – 668K) – вода



$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.31 – НЭУ-31:

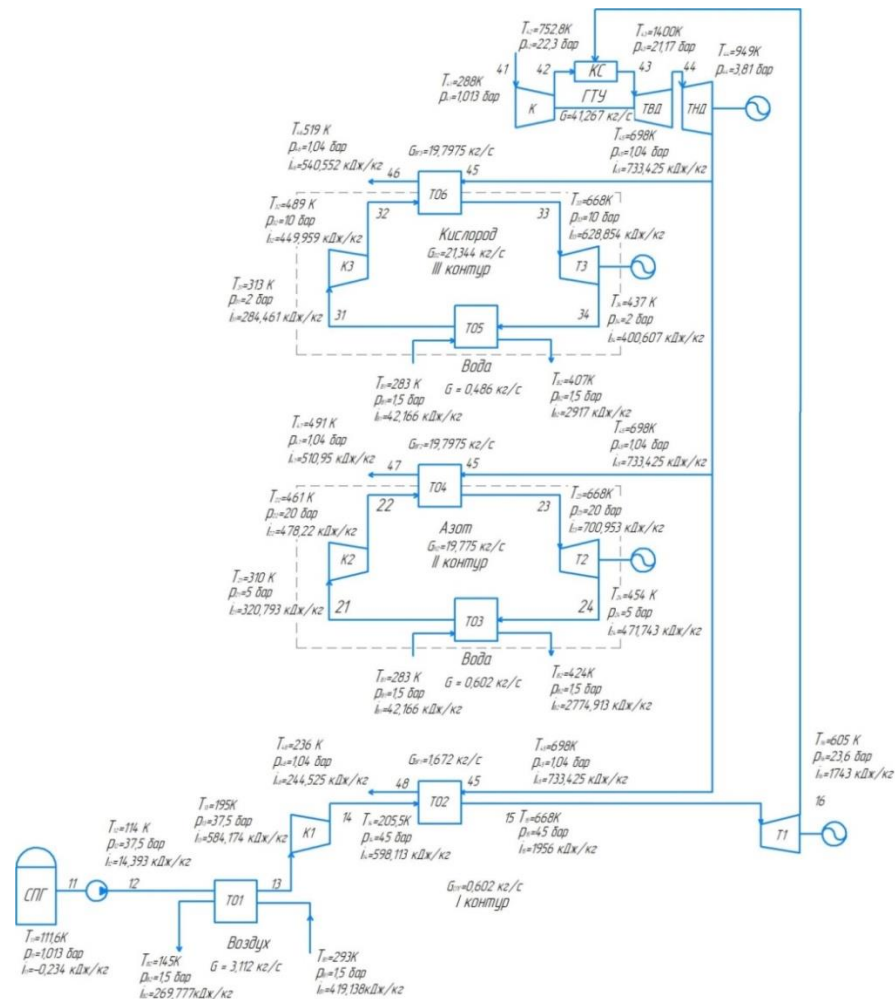
III – 1В (111,6 – 668K) – СПГ – 2В (310 – 668K) – азот – 3R (310 – 668K) – вода



$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.32 – НЭУ-32:

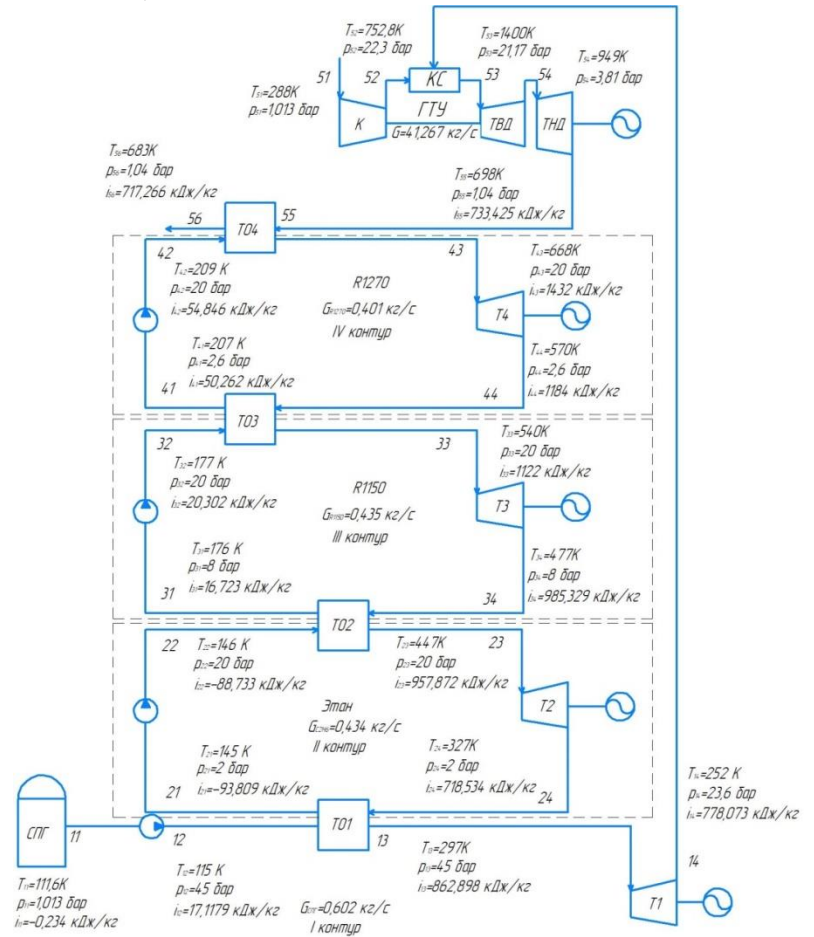
III – 1В (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (310 – 668K) – вода – 3R (313 – 668K) – R113



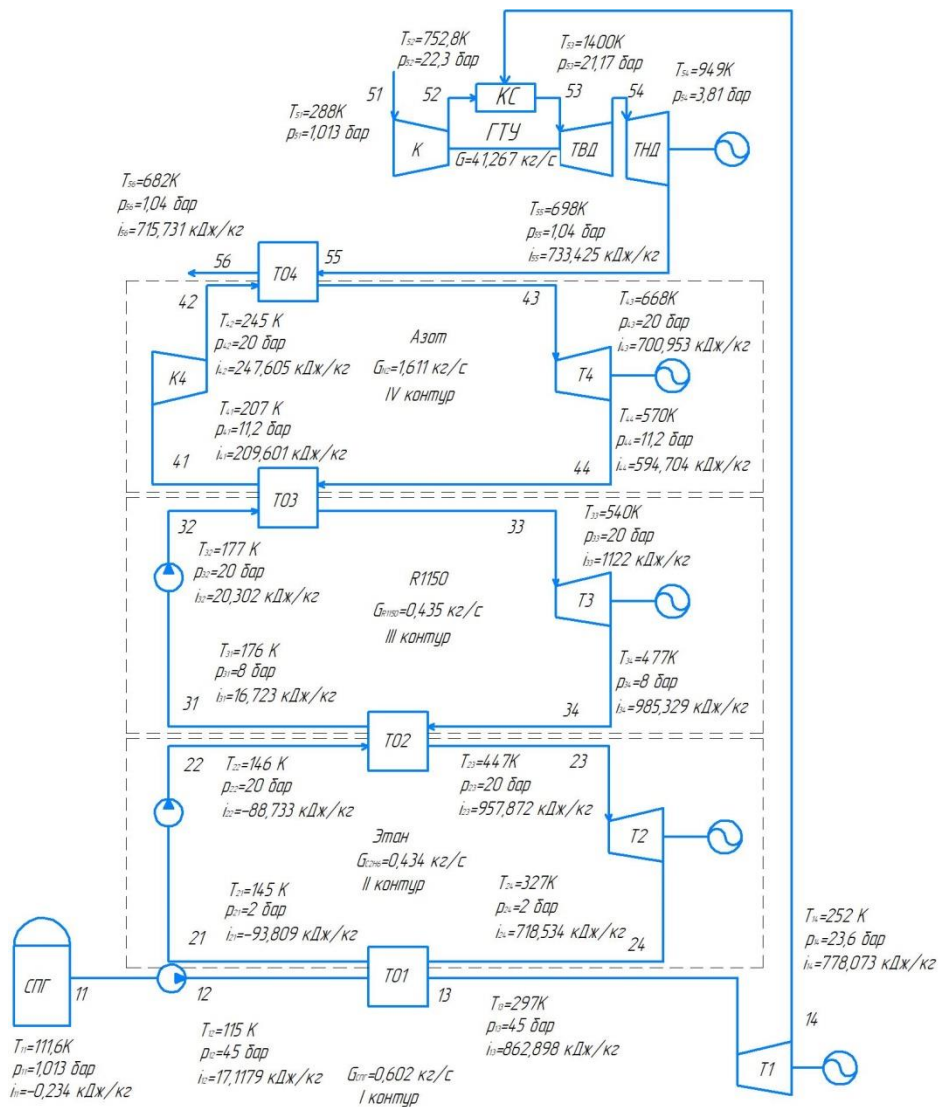
$T_i$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.33 – НЭУ-33:  
 Ш – 1В (111,6 – 668К) – СПГ – 2В (310 – 668К) – азот – 3В (313 – 668К) – кислород

#### А.4 Схемы и параметры циклов четырёхконтурных НЭУ

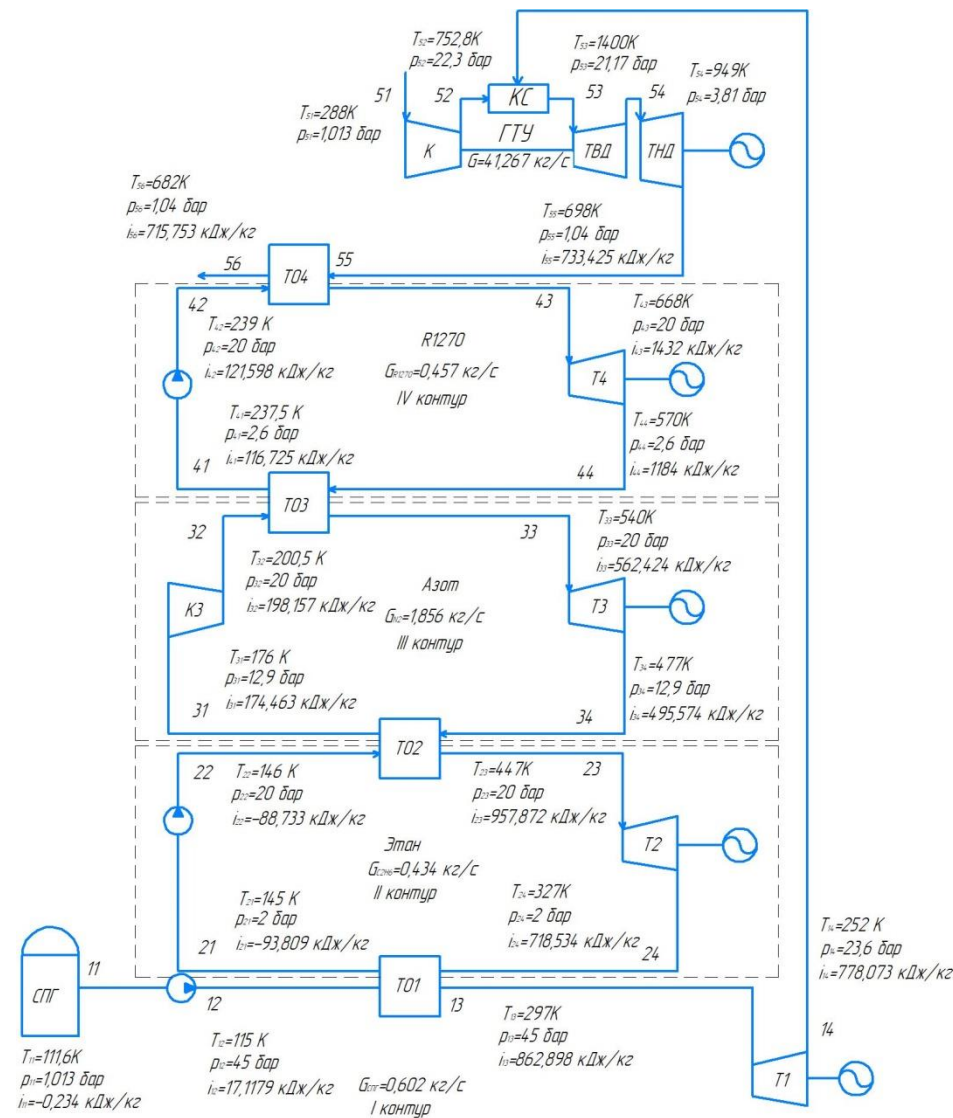
По типу распределения подводимой тепловой энергии между контурами схемы НЭУ-34 – НЭУ-47 являются последовательными, схемы НЭУ-48 – НЭУ-75 являются последовательно-параллельными, а схемы НЭУ-76 – НЭУ-89 являются параллельными. Верхний источник топлива – выхлопные газы. Суммарная энергия вырабатывается газовой турбиной ГТУ и четырьмя турбинами, входящими во вспомогательные контуры, которые работают по циклу Ренкина или по циклу Брайтона. Подача СПГ осуществляется в камеру сгорания ГТУ, одновременно с этим СПГ используется как низший источник тепла.



$T_i$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.34 – НЭУ-34: IV – 1R (111,6 – 297К) – СПГ – 2R (145 – 447К) – этан – 3R (176 – 540К) – R1150 – 4R (207 – 668К) – R1270



$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.35 – НЭУ-35: IV – 1R (111,6 – 297K) – СПГ – 2R (145 – 447K) – этан – 3R (176 – 540K) – R1150 – 4B (207 – 668K) – азот



$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.36 – НЭУ-36: IV – 1R (111,6 – 297K) – СПГ – 2R (145 – 447K) – этан – 3B (176 – 540K) – азот – 4R (237,5 – 668K) – R1270

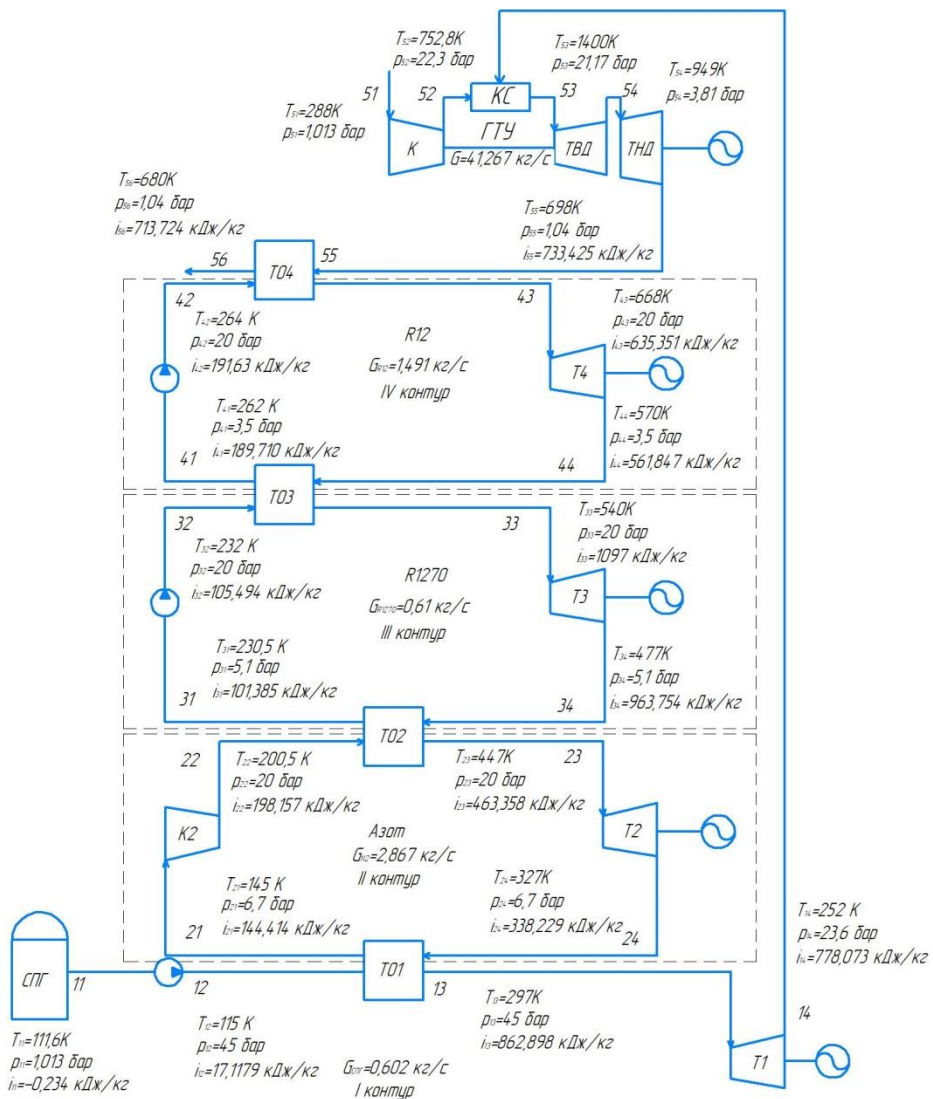


Рисунок А.37 – НЭУ-37: IV – 1R (111,6 – 297K) – СПГ – 2В (145 – 447K) – азот – 3R (230,5 – 540K) – R1270 – 4R (262 – 668K) – R12

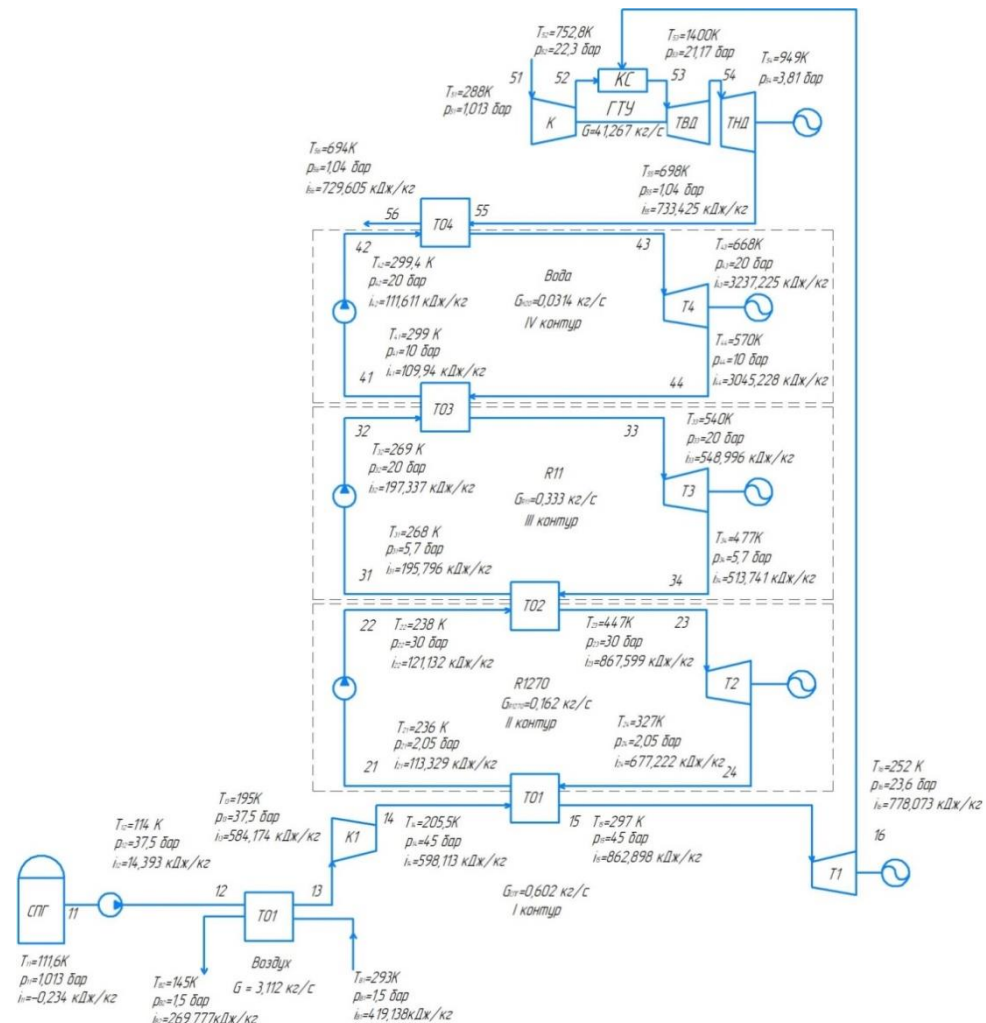
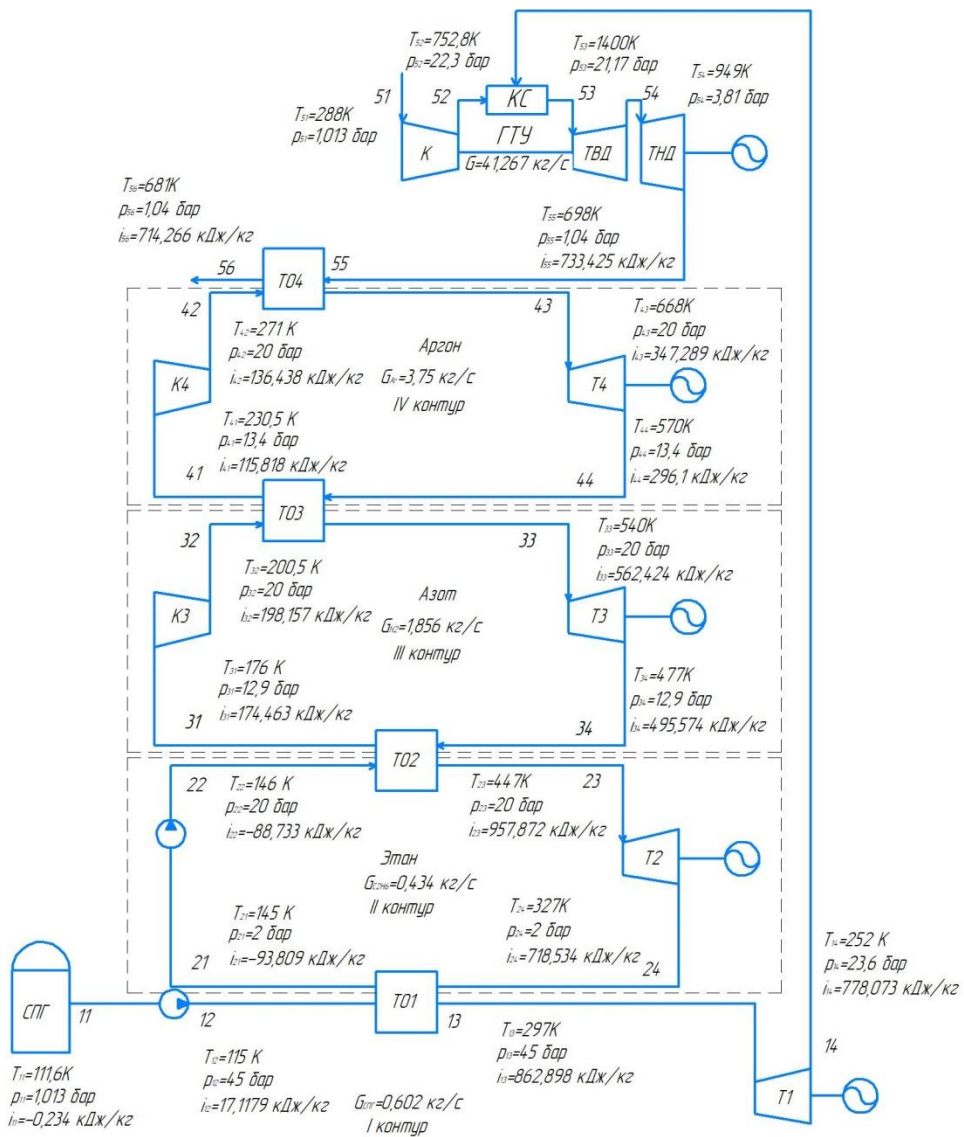
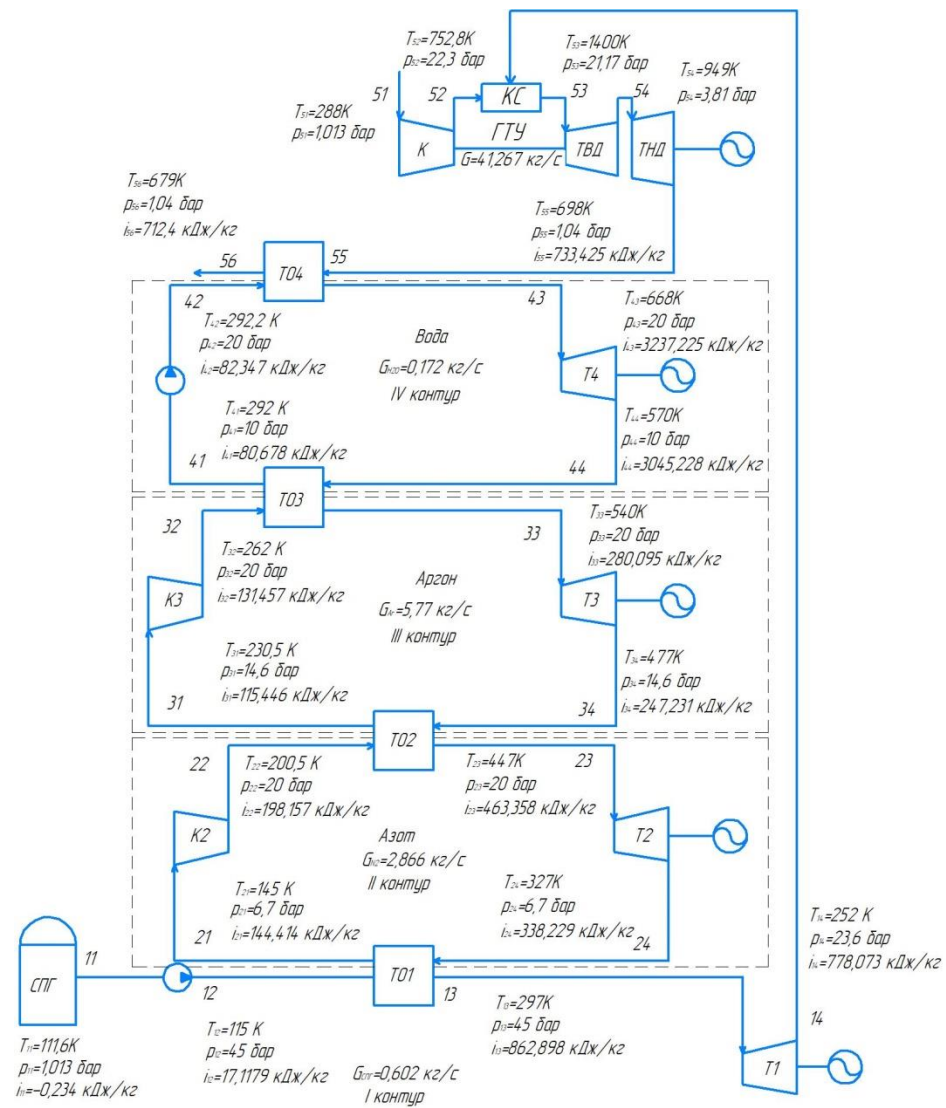


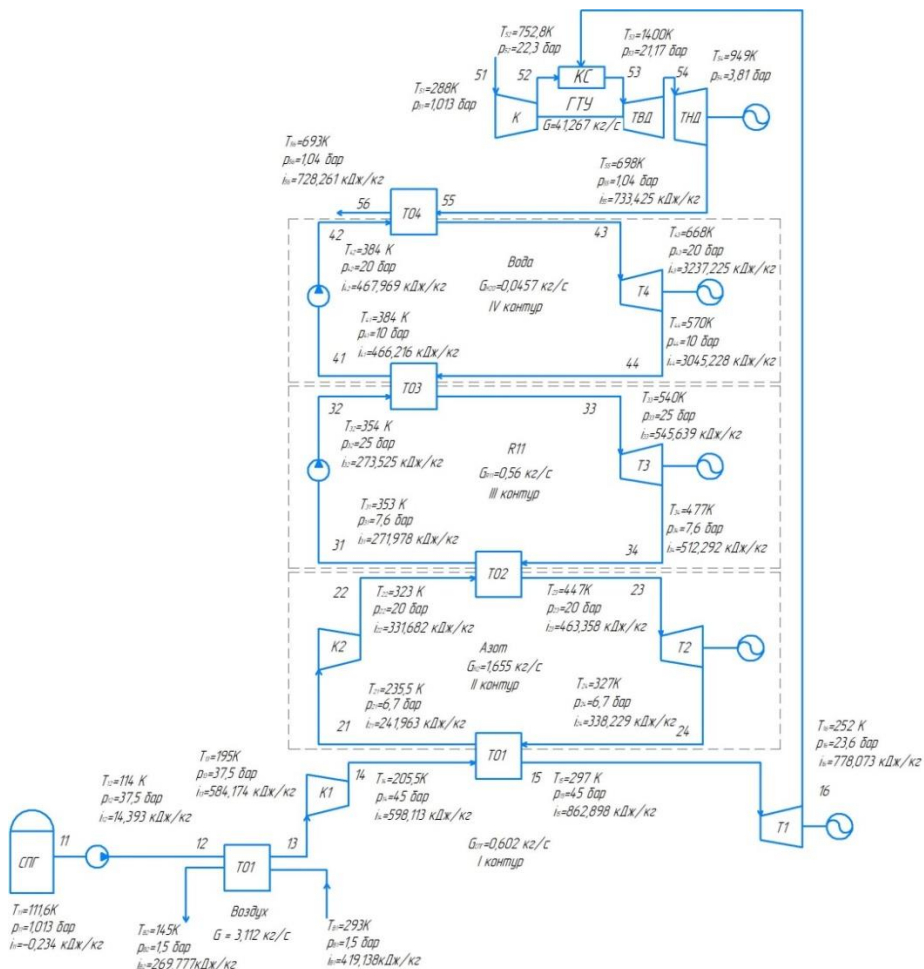
Рисунок А.38 – НЭУ-38: IV – 1В (111,6 – 297K) – СПГ – 2R (236 – 447K) – R1270 – 3R (268 – 540K) – R11 – 4R (299 – 668K) – вода



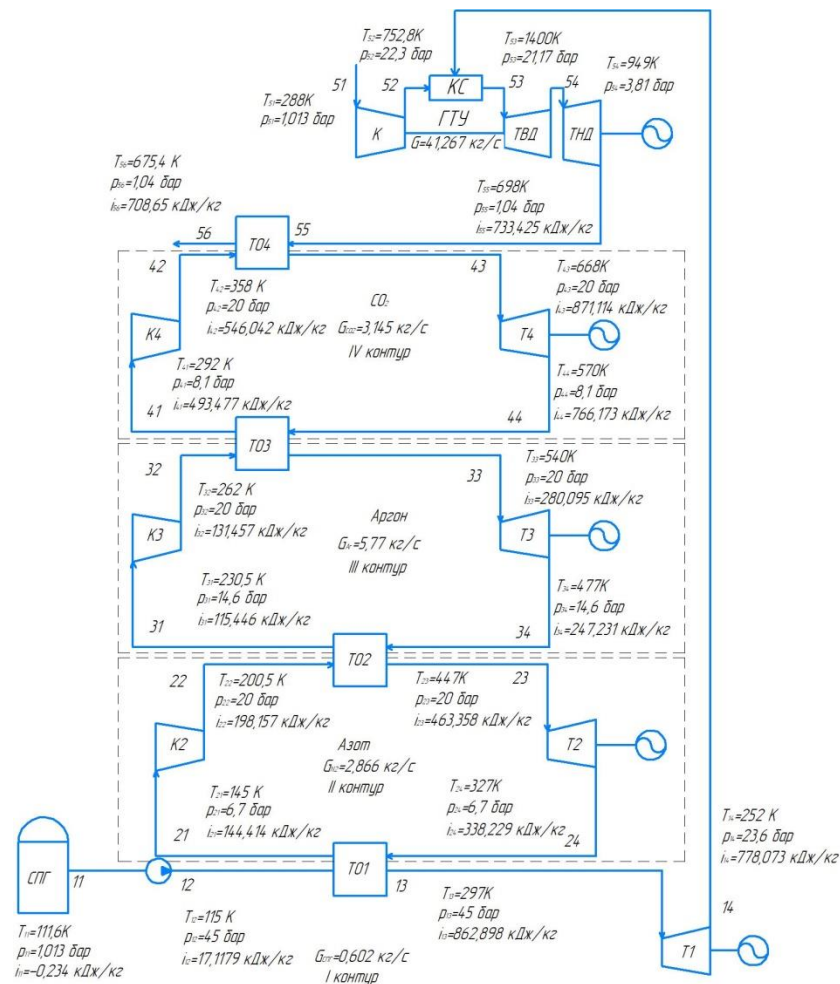
$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $ТВД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.39 – НЭУ-39: IV – 1R (111,6 – 297K) – СПГ – 2R (145 – 447K) – этан – 3B (176 – 540K) – азот – 4B (230,5 – 668K) – аргон



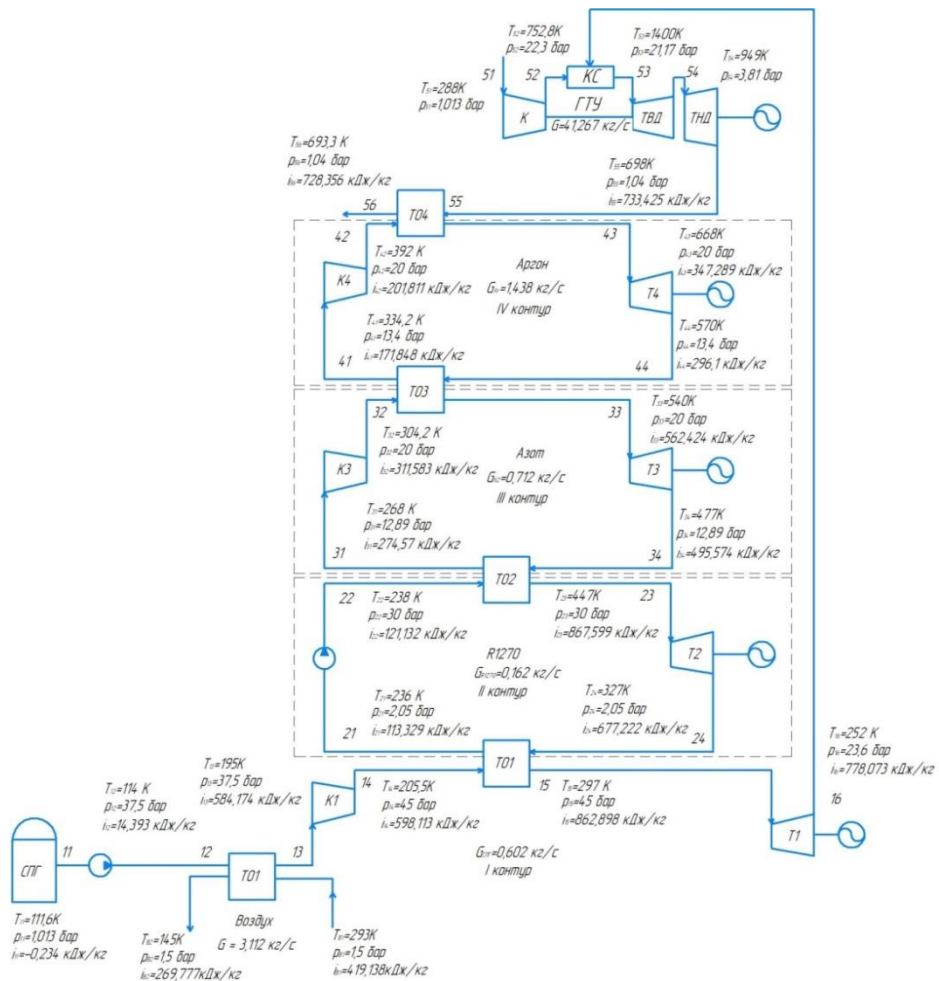
$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $ТВД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.40 – НЭУ-40: IV – 1R (111,6 – 297K) – СПГ – 2B (145 – 447K) – азот – 3B (230,5 – 540K) – аргон – 4R (292 – 668K) – вода



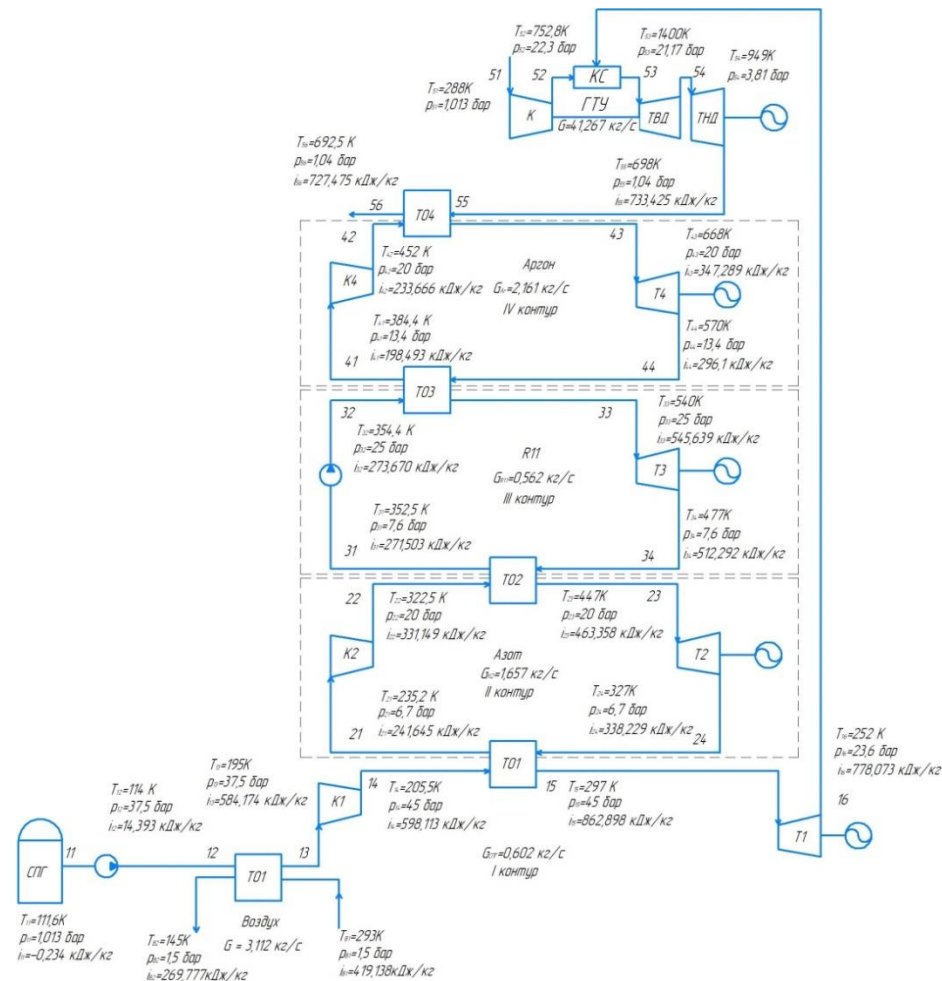
$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.41 – НЭУ-41: IV – 1В (111,6 – 297К) – СПГ – 2В (235,5 – 447К) – азот – 3R (353 – 540К) – R11  
 – 4R (384 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.42 – НЭУ-42: IV – 1R (111,6 – 297К) – СПГ – 2В (145 – 447К) – азот – 3В (230,5 – 540К) –  
 аргон – 4В (292 – 668К) – углекислый газ

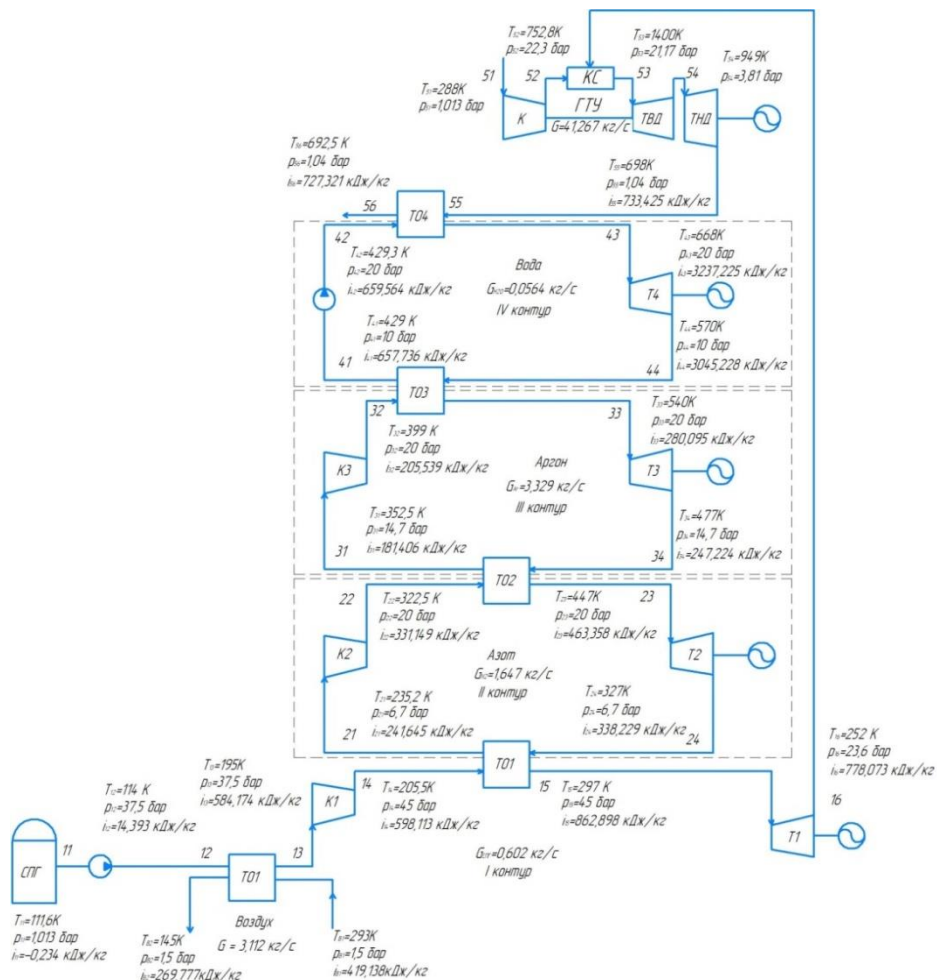


$T_i$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.43 – НЭУ-43: IV – 1В (111,6 – 297К) – СПГ – 2R (236 – 447К) – R1270 – 3В (268 – 540К) – азот – 4В (334,2 – 668К) – аргон

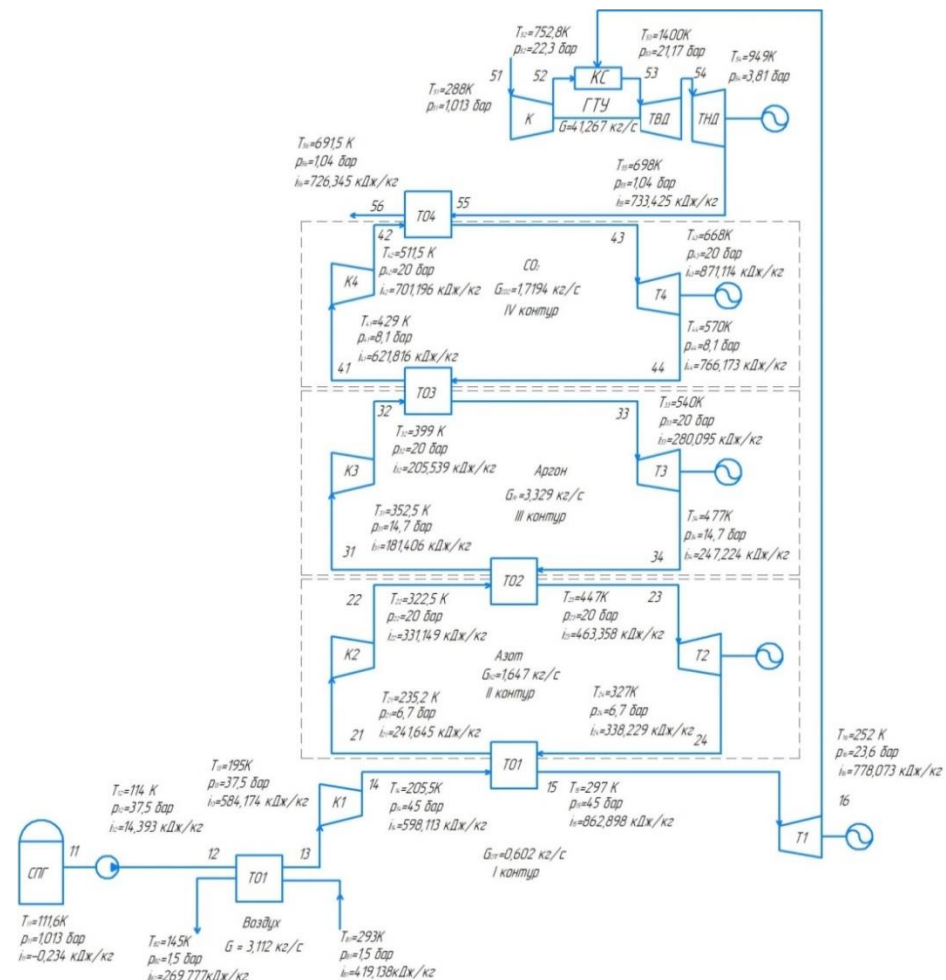


$T_i$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.44 – НЭУ-44: IV – 1В (111,6 – 297К) – СПГ – 2В (235,2 – 447К) – азот – 3R (352,5 – 540К) – R11 – 4В (384,4 – 668К) – аргон

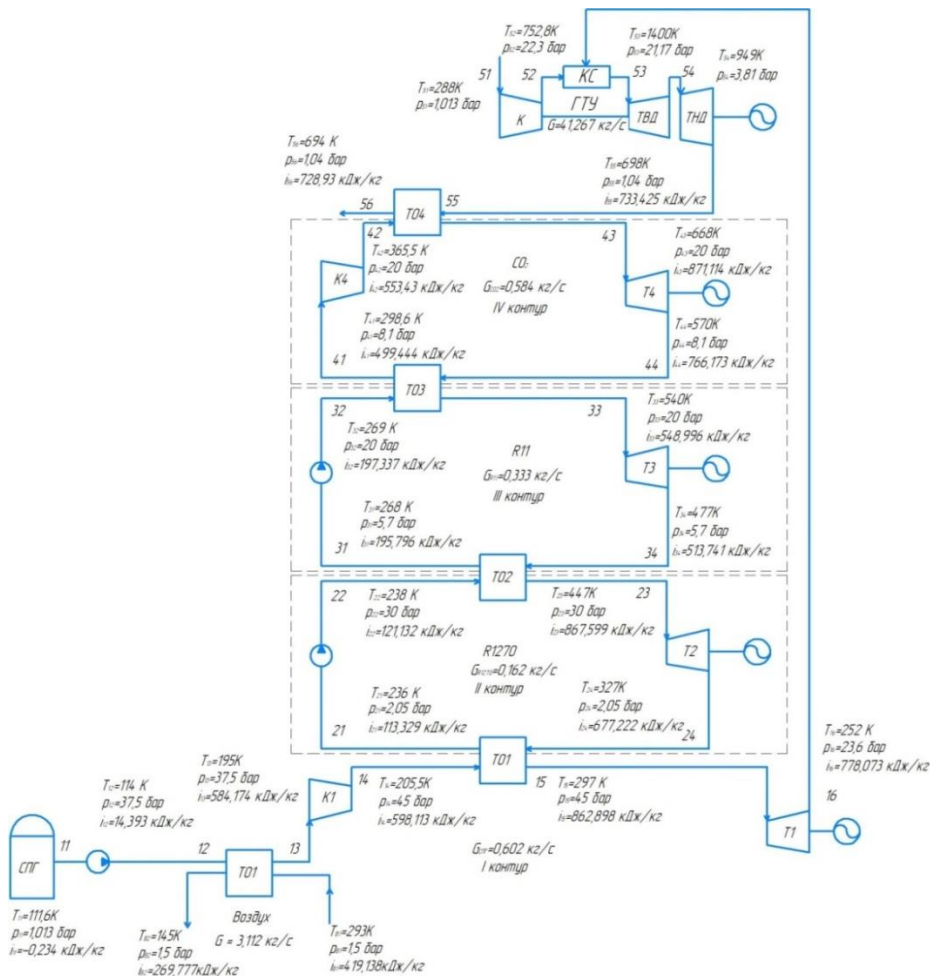




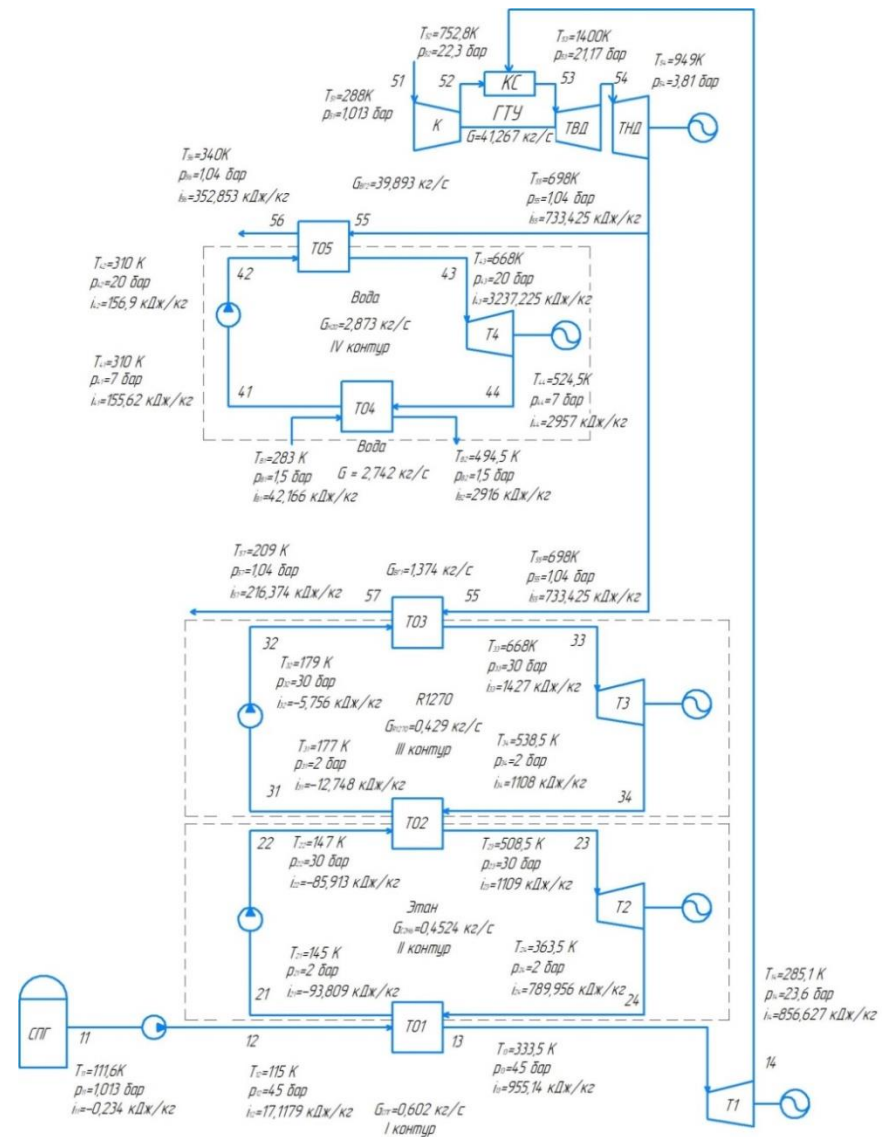
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.45 – НЭУ-45: IV – 1В (111,6 – 297К) – СПГ – 2В (235,2 – 447К) – азот – 3В (352,5 – 540К) – аргон – 4R (429 – 668К) – вода



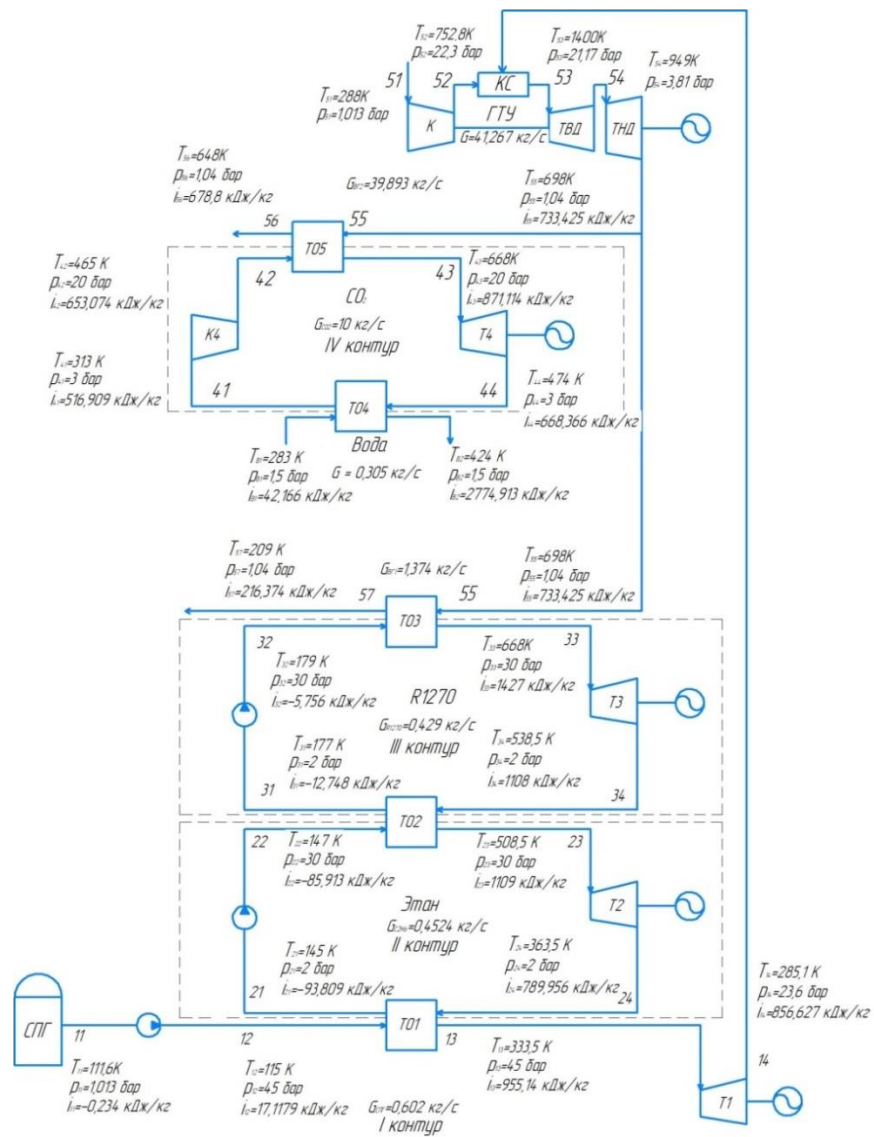
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.46 – НЭУ-46: IV – 1В (111,6 – 297К) – СПГ – 2В (235,2 – 447К) – азот – 3В (352,5 – 540К) – аргон – 4В (429 – 668К) – углекислый газ



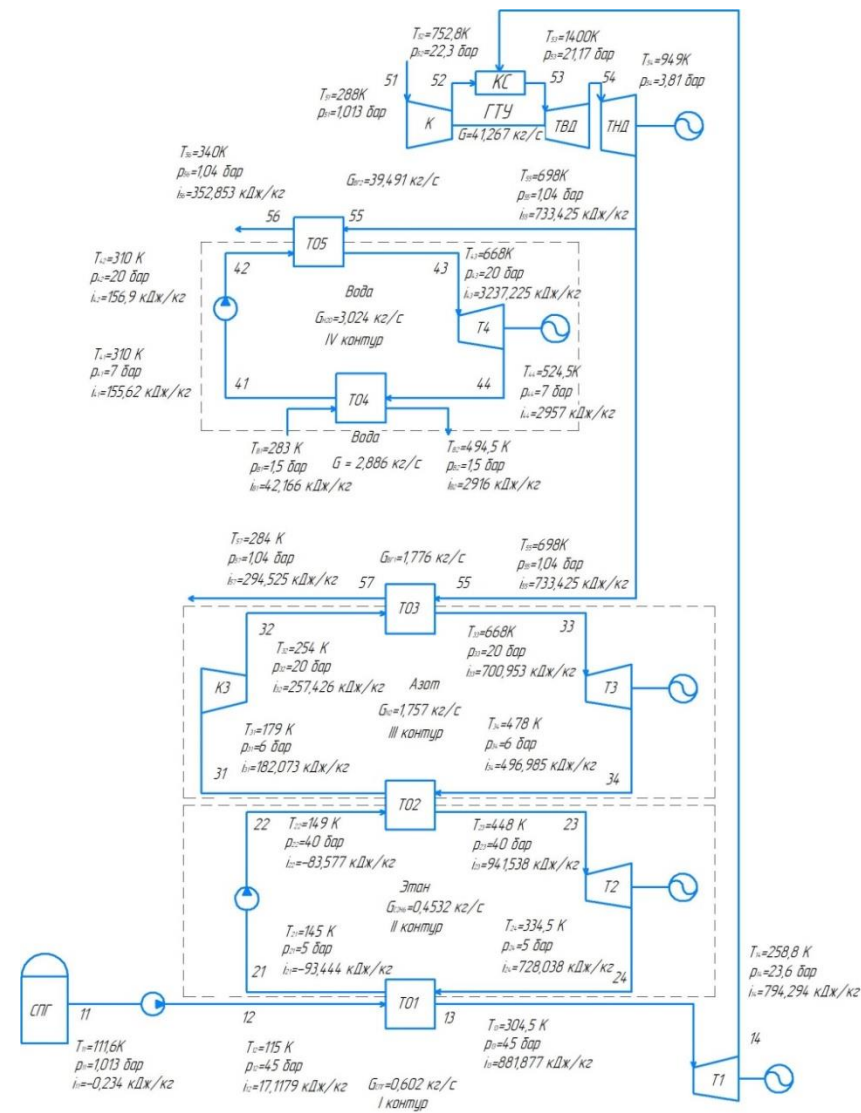
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.47 – НЭУ-47: IV – 1В (111,6 – 297К) – СПГ – 2R (236 – 447К) – R1270 – 3R (268 – 540К) – R11 – 4В (298,6 – 668К) – углекислый газ



$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.48 – НЭУ-48: IV – 1R (111,6 – 333,5К) – СПГ – 2R (145 – 508,5К) – этан – 3R (177 – 668К) – R1270 – 4R (310 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $TНД$  – турбина низкого давления,  $TВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.49 – НЭУ-49: IV – 1R (111,6 – 333,5K) – СПГ – 2R (145 – 508,5K) – этан – 3R (177 – 668K) – R1270 – 4B (313 – 668K) – углекислый газ



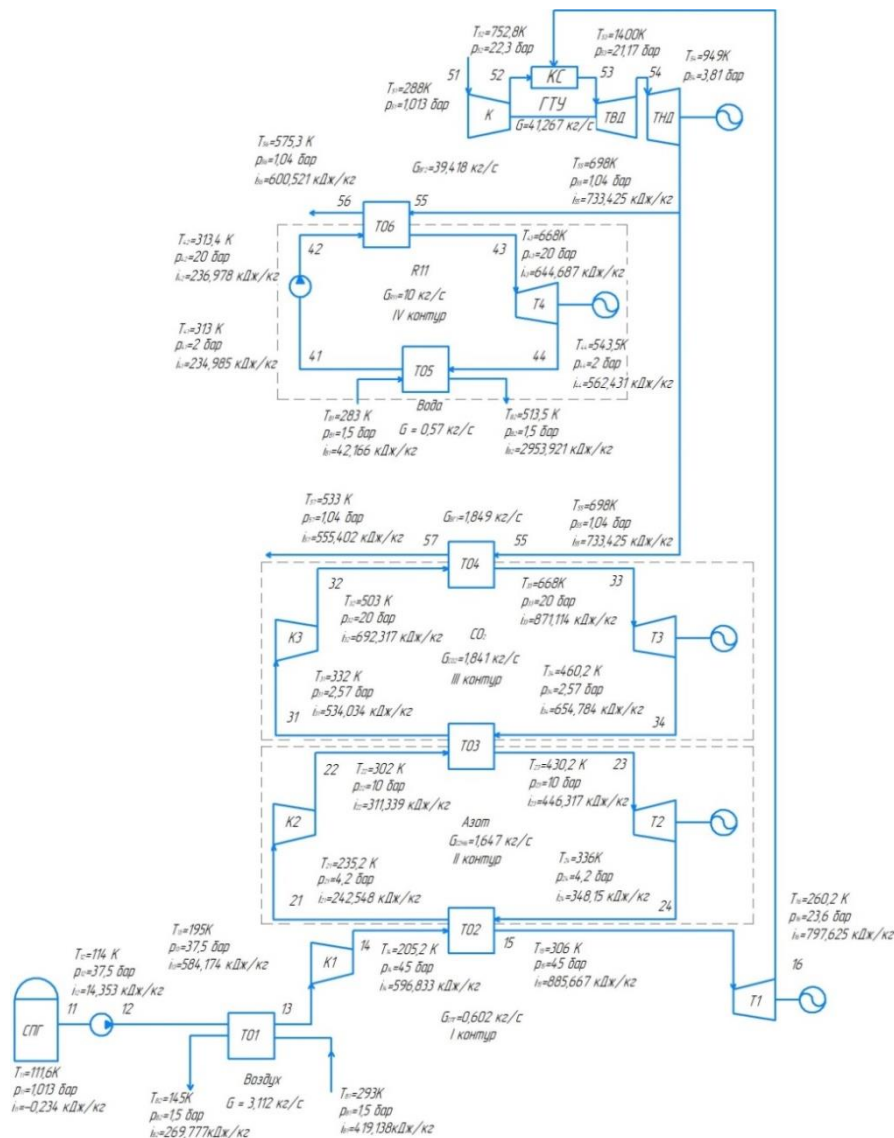
$T_1$  – турбина,  $TO_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $TНД$  – турбина низкого давления,  $TВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.50 – НЭУ-50: IV – 1R (111,6 – 304,5K) – СПГ – 2R (145 – 448K) – этан – 3B (179 – 668K) – азот – 4R (310 – 668K) – вода



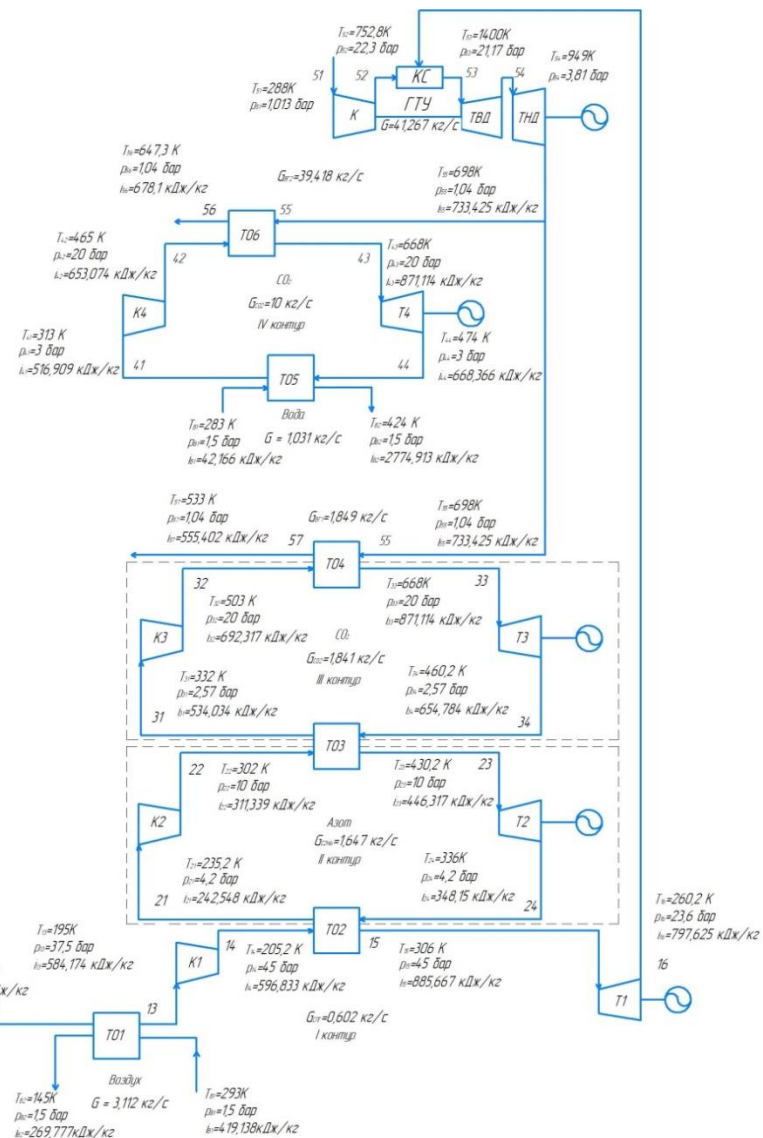






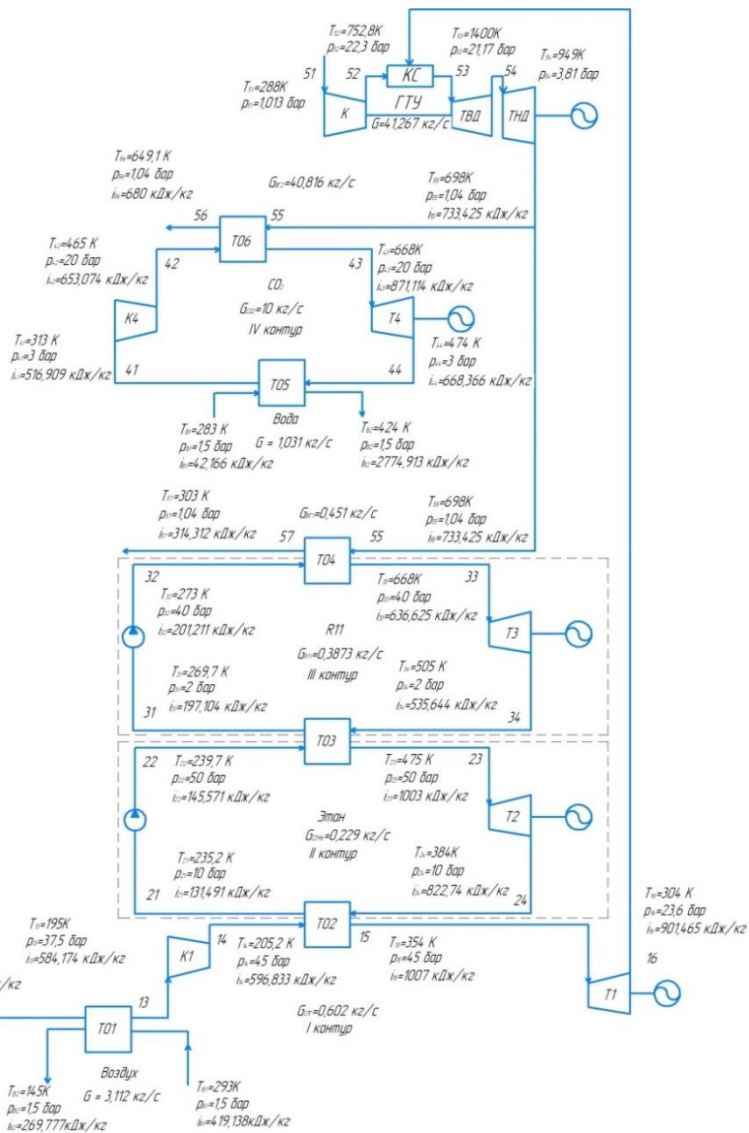


$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.59 – НЭУ-59: IV – 1В (111,6 – 306К) – СПГ – 2В (235,2 – 430,2К) – азот – 3В (332 – 668К) – углекислый газ – 4R (313 – 668К) – R11

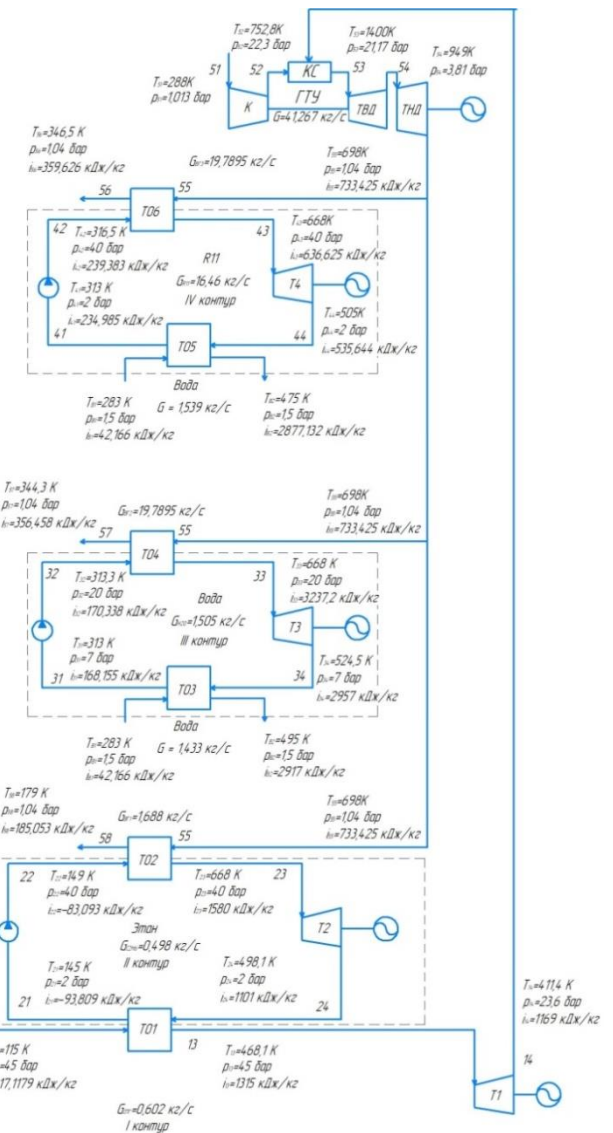


$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.60 – НЭУ-60: IV – 1В (111,6 – 306К) – СПГ – 2В (235,2 – 430,2К) – азот – 3В (332 – 668К) – углекислый газ – 4В (313 – 668К) – углекислый газ

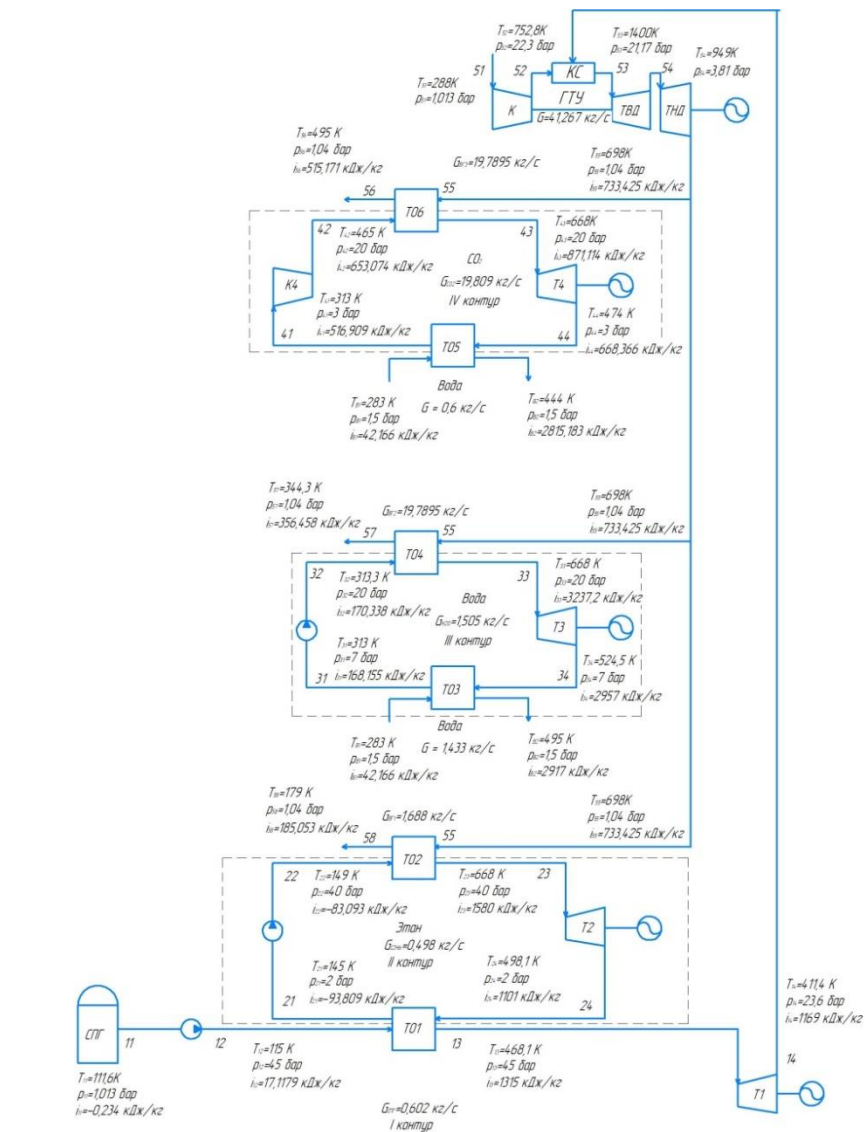




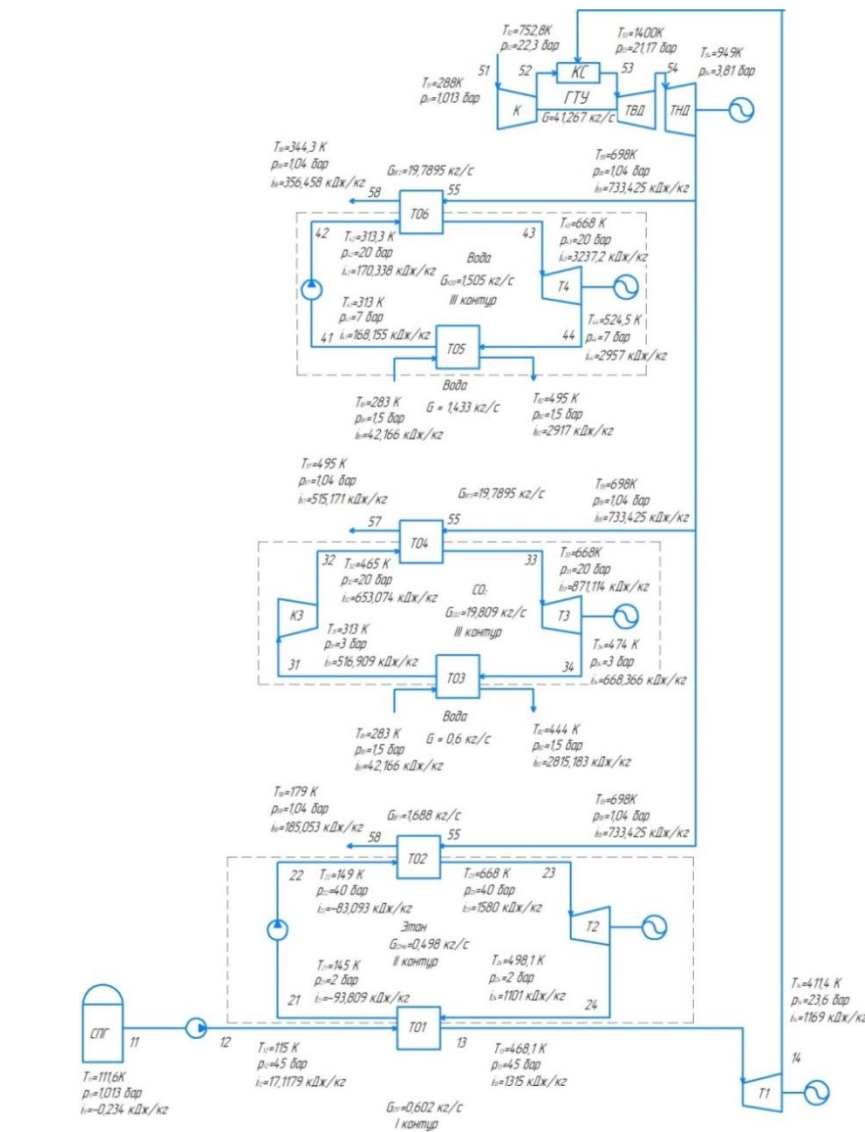
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.61 – НЭУ-61: IV – 1В (111,6 – 354К) – СПГ – 2R (235,2 – 475К) – этан – 3R (269,7 – 668К) –  
 R11 – 4В (313 – 668К) – углекислый газ



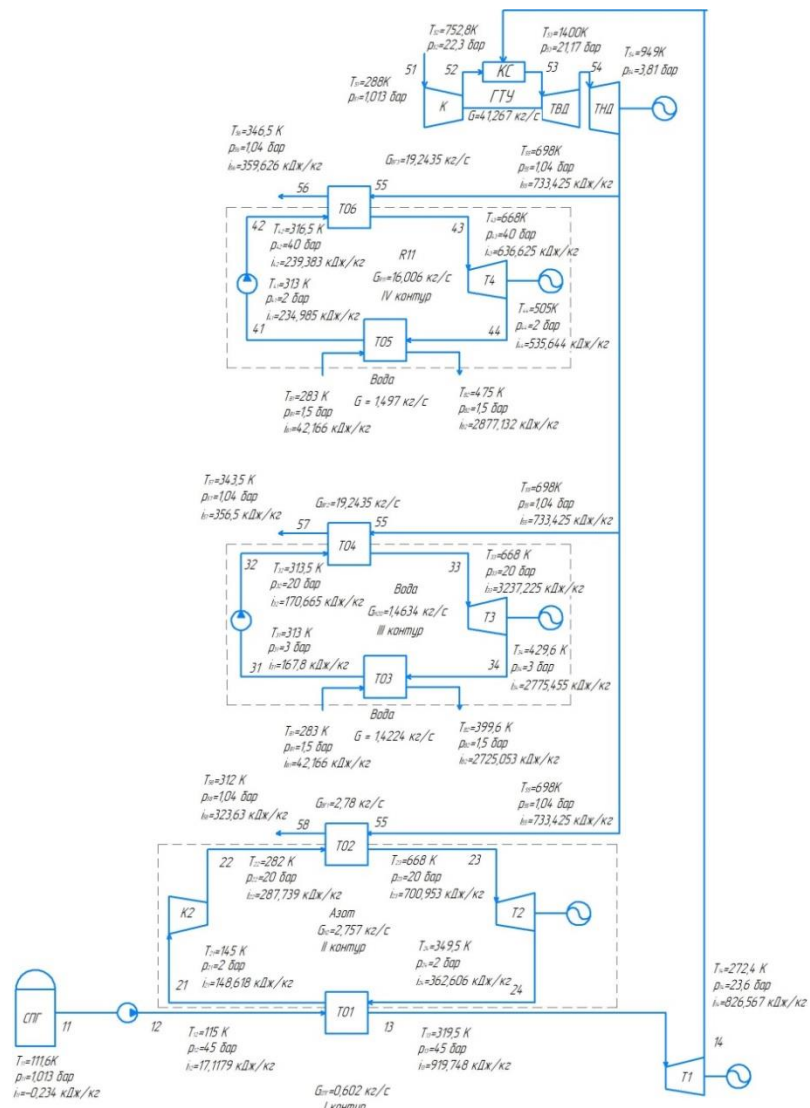
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.62 – НЭУ-62: IV – 1R (111,6 – 468,1К) – СПГ – 2R (145 – 668К) – этан – 3R (313 – 668К) –  
 вода – 4R (313 – 668К) – R11



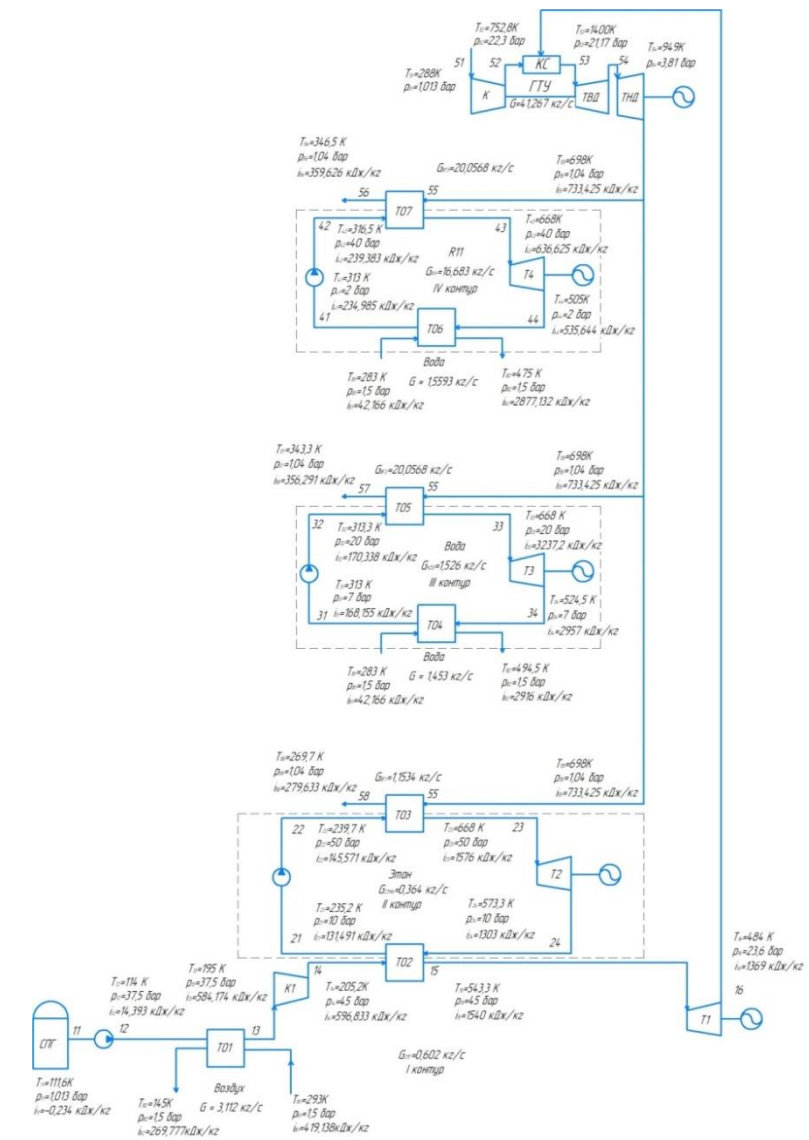
$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.63 – НЭУ-63: IV – 1R (111,6 – 468,1К) – СПГ – 2R (145 – 668К) – этан – 3R (313 – 668К) –  
 вода – 4B (313 – 668К) – углекислый газ



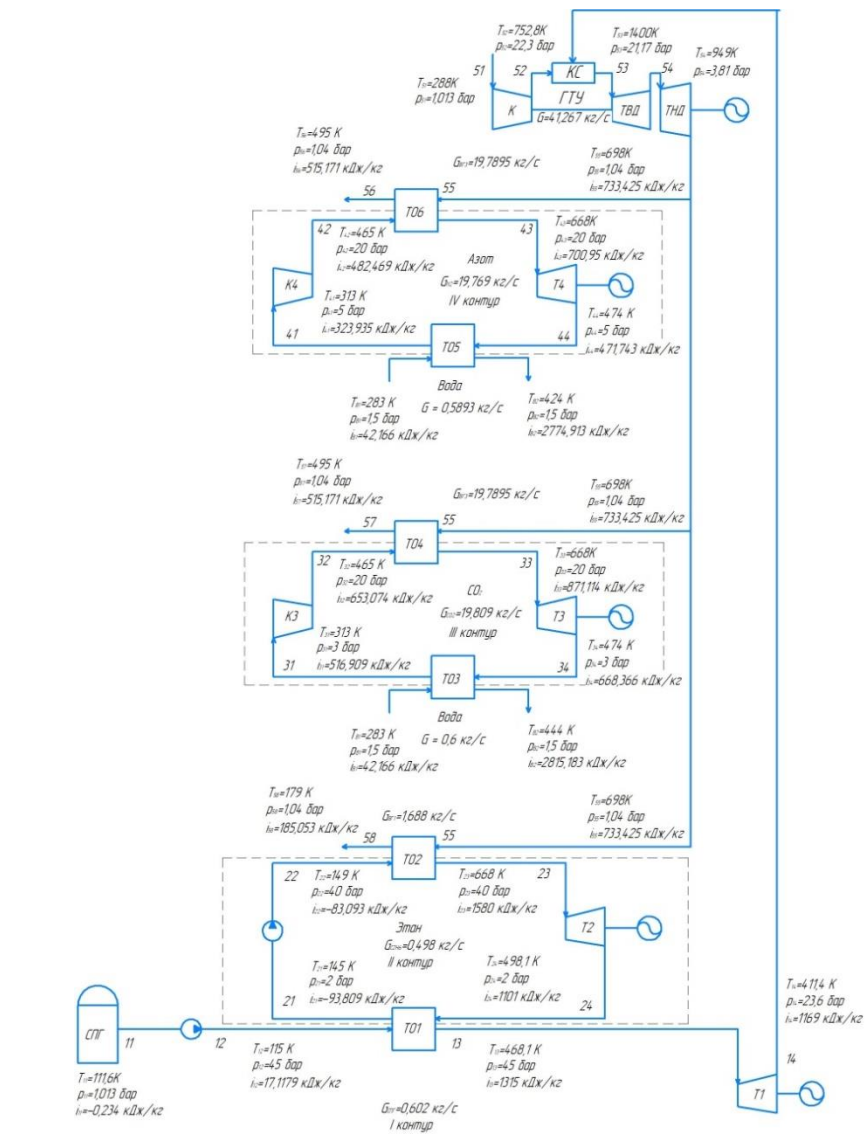
$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,  
 ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.64 – НЭУ-64: IV – 1R (111,6 – 468,1К) – СПГ – 2R (145 – 668К) – этан – 3B (313 – 668К) –  
 углекислый газ – 4R (313 – 668К) – вода



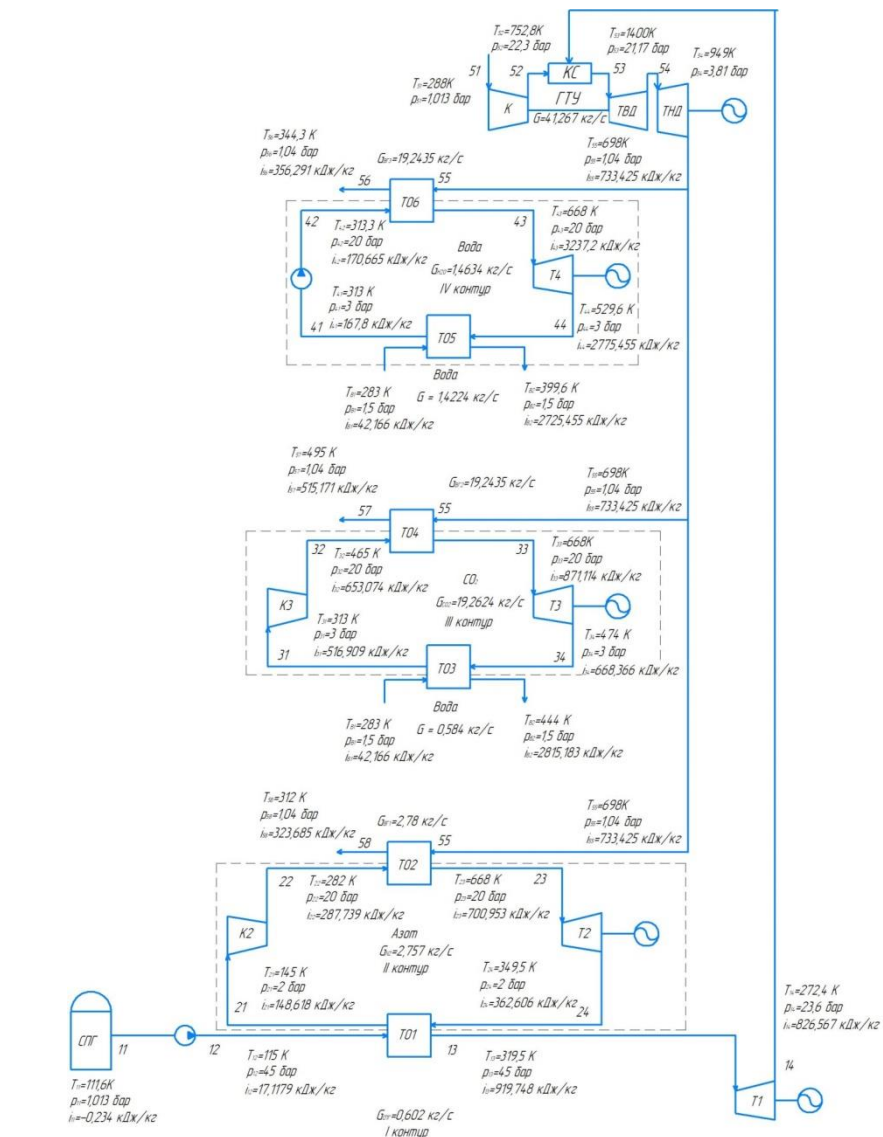
$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.65 – НЭУ-65: IV – 1R (111,6 – 319,5К) – СПГ – 2В (145 – 668К) – азот – 3R (313 – 668К) – вода – 4R (313 – 668К) – R11



$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.66 – НЭУ-66: IV – 1В (111,6 – 543,3К) – СПГ – 2R (235,2 – 668К) – этан – 3R (313 – 668К) – вода – 4R (313 – 668К) – R11

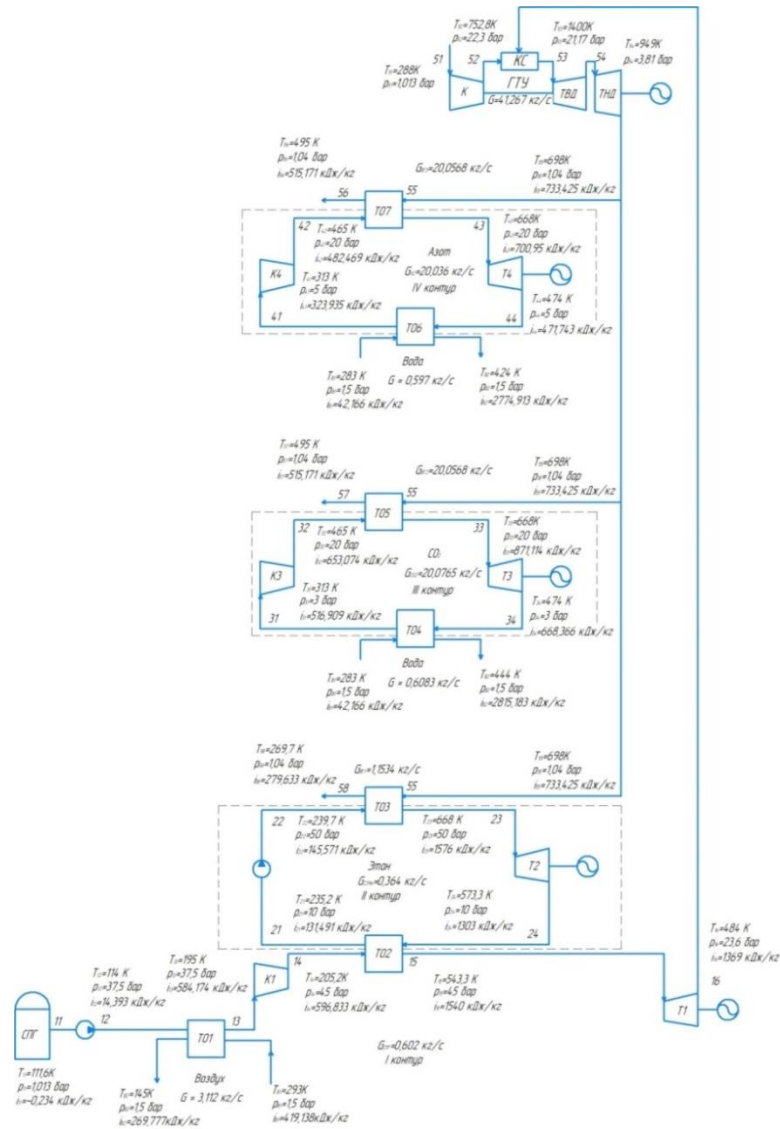


$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.67 – НЭУ-67: IV – 1R (111,6 – 468,1К) – СПГ – 2R (145 – 668К) – этан – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4В (313 – 668К) – азот

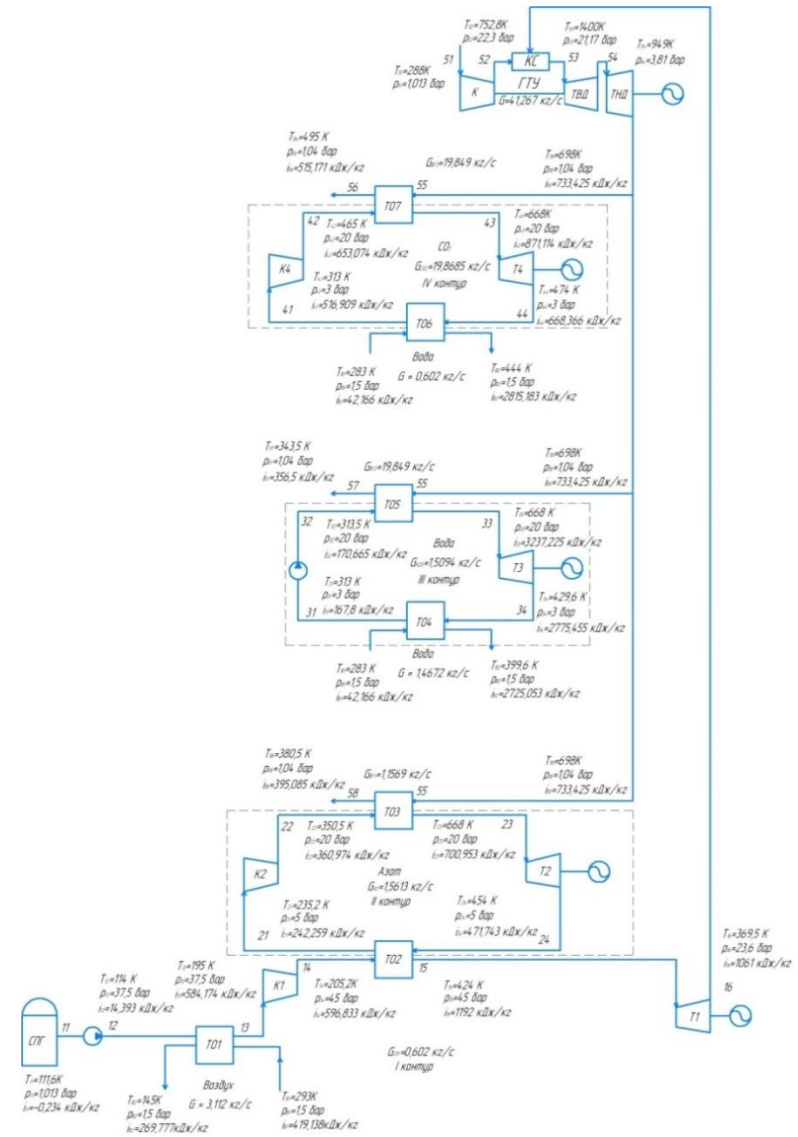


$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.68 – НЭУ-68: IV – 1R (111,6 – 319,5К) – СПГ – 2В (145 – 668К) – азот – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4R (313 – 668К) – вода

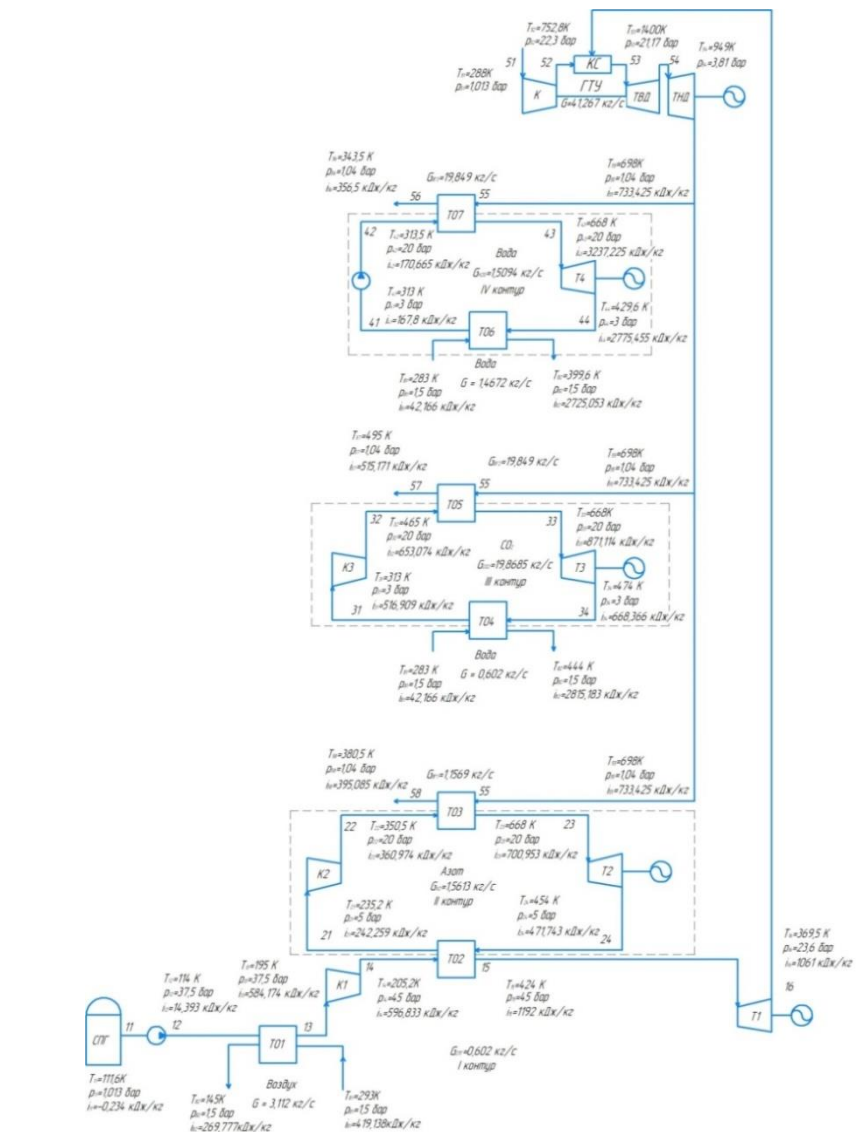




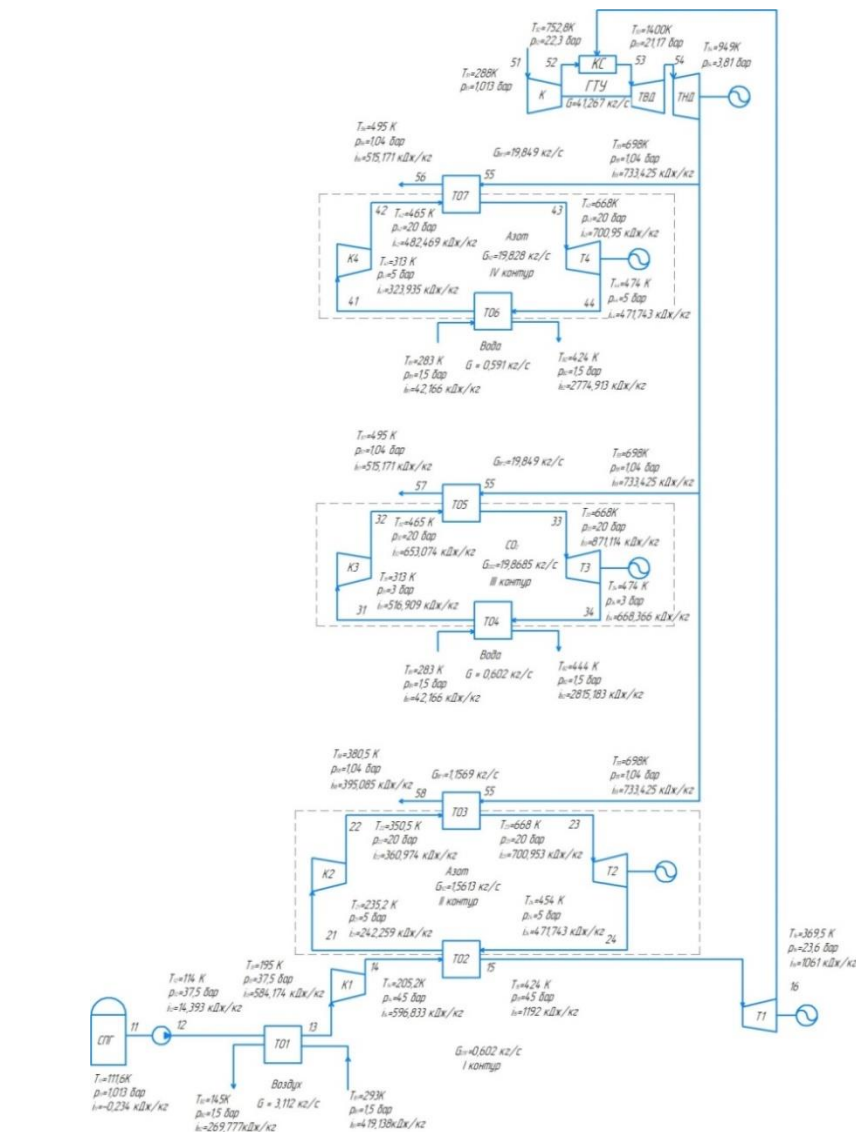
$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $TНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.71 – НЭУ-71: IV – 1В (111,6 – 543,3К) – СПГ – 2R (235,2 – 668К) – этан – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4В (313 – 668К) – азот



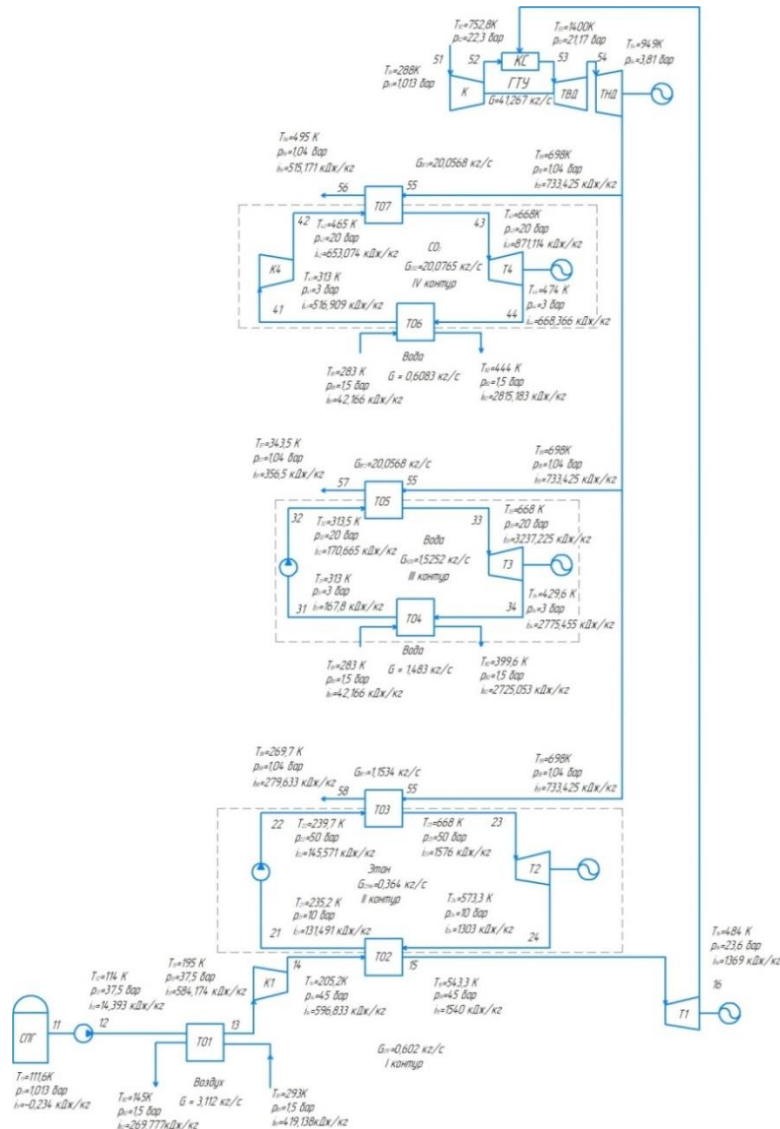
$T_1$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $TНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.72 – НЭУ-72: IV – 1В (111,6 – 424К) – СПГ – 2В (235,2 – 668К) – этан – 3R (313 – 668К) – вода – 4В (313 – 668К) – углекислый газ



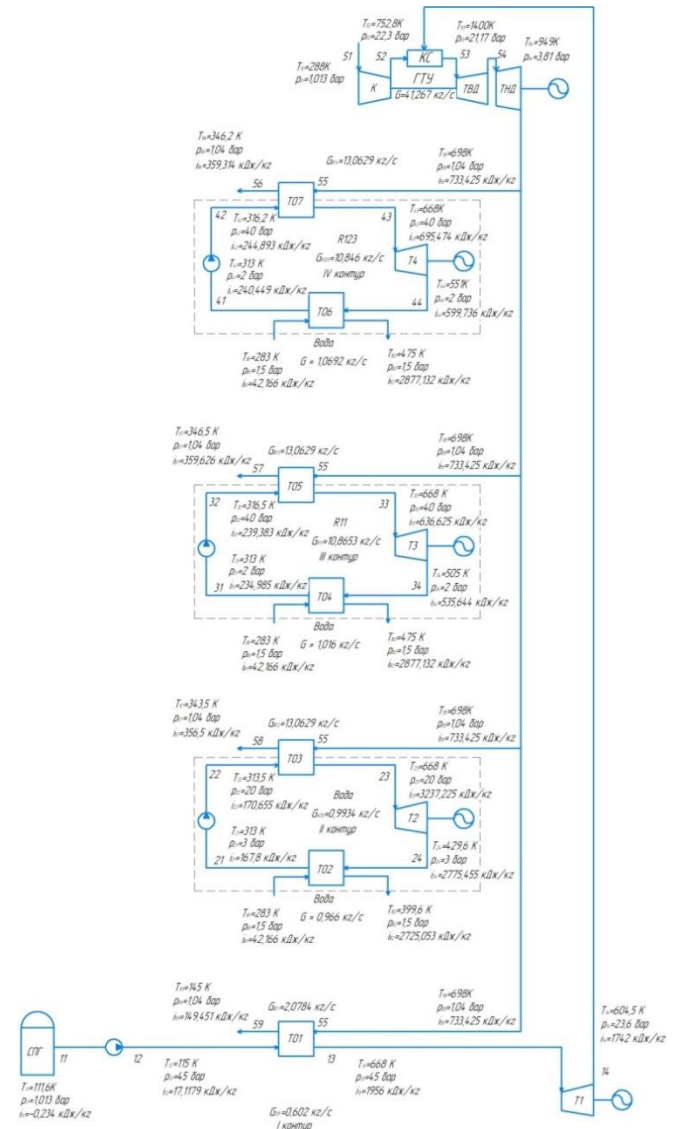
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $К_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.73 – НЭУ-73: IV – 1В (111,6 – 424К) – СПГ – 2В (235,2 – 668К) – азот – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4R (313 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $К_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.74 – НЭУ-74: IV – 1В (111,6 – 424К) – СПГ – 2В (235,2 – 668К) – азот – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4В (313 – 668К) – азот

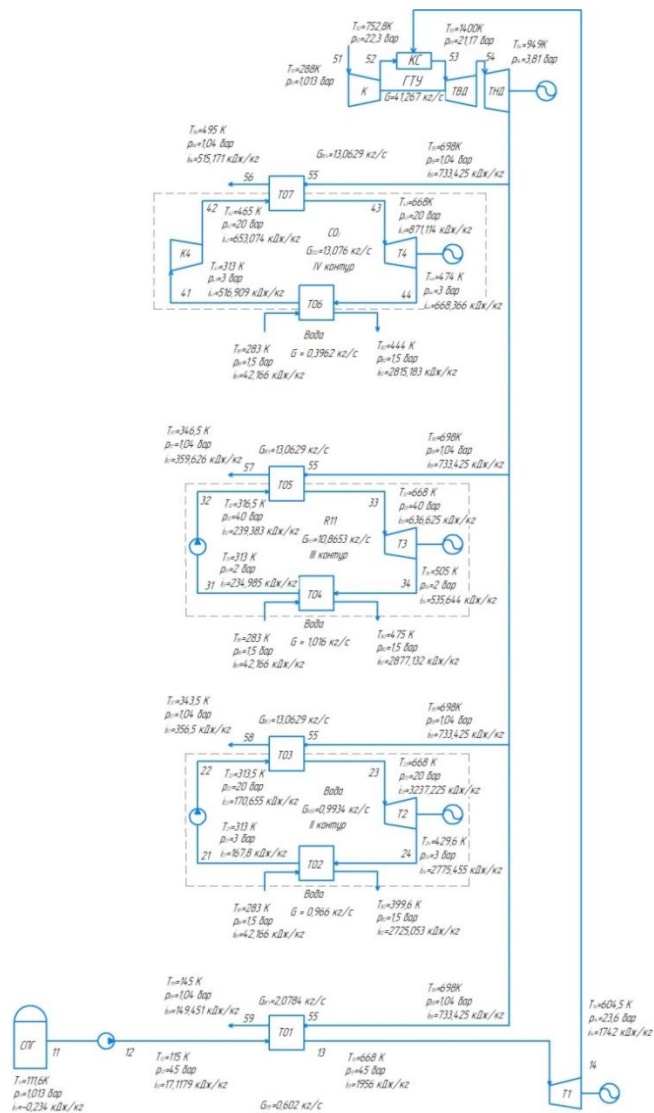


Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.75 – НЭУ-75: IV – 1В (111,6 – 543,3К) – СПГ – 2R (235,2 – 668К) – этан – 3R (313 – 668К) – вода – 4В (313 – 668К) – углекислый газ



Т<sub>1</sub> – турбина, ТО<sub>1</sub> – теплообменный аппарат, К<sub>1</sub> – компрессор, ТНД – турбина низкого давления, ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания  
 Рисунок А.76 – НЭУ-76: IV – 1R (111,6 – 668К) – СПГ – 2R (313 – 668К) – вода – 3R (313 – 668К) – R11 – 4В (313 – 668К) – R123

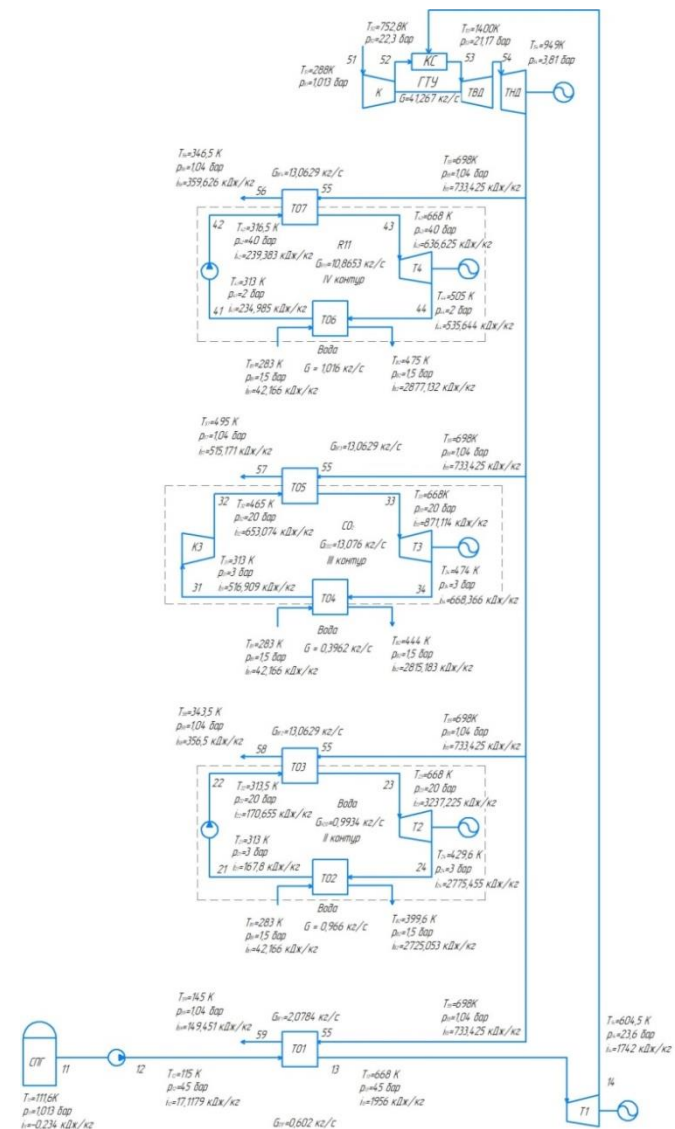




$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,

$ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

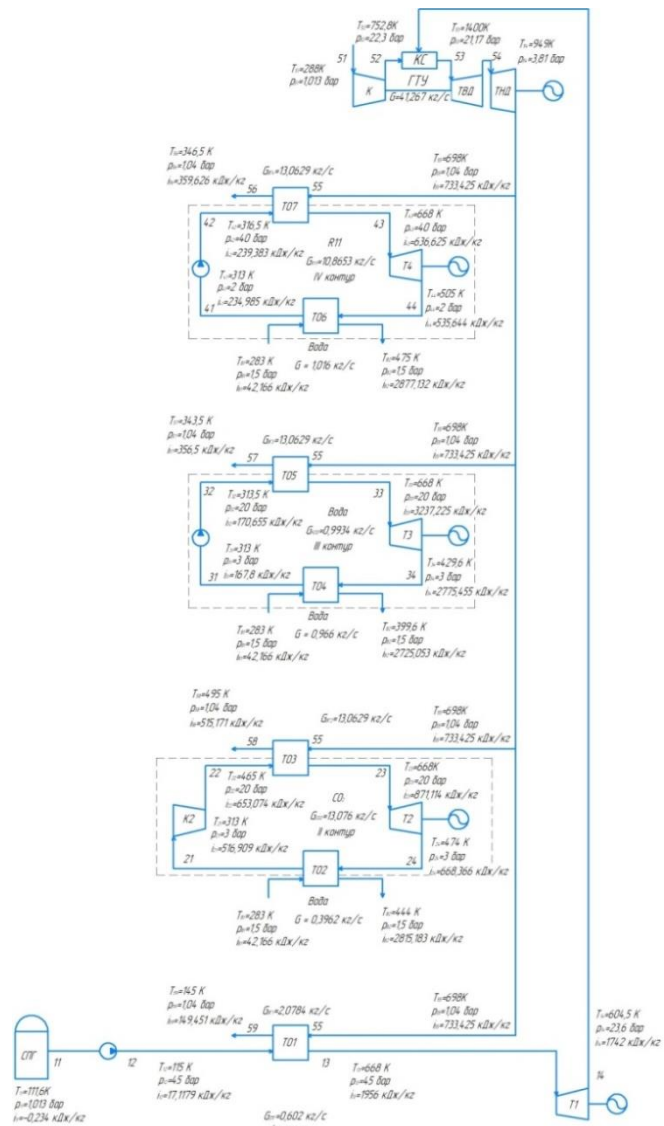
Рисунок А.77 – НЭУ-77: IV – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (313 – 668K) – вода – 3R (313 – 668K) – R11 – 4B (313 – 668K) – углекислый газ



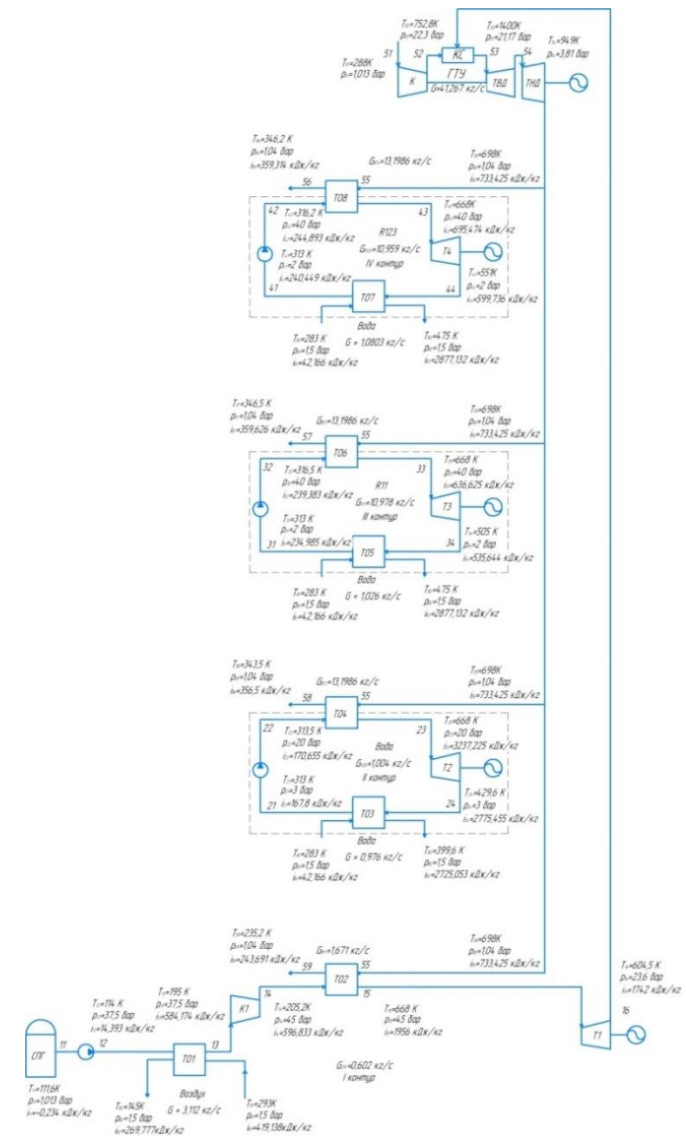
$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $K_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,

$ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

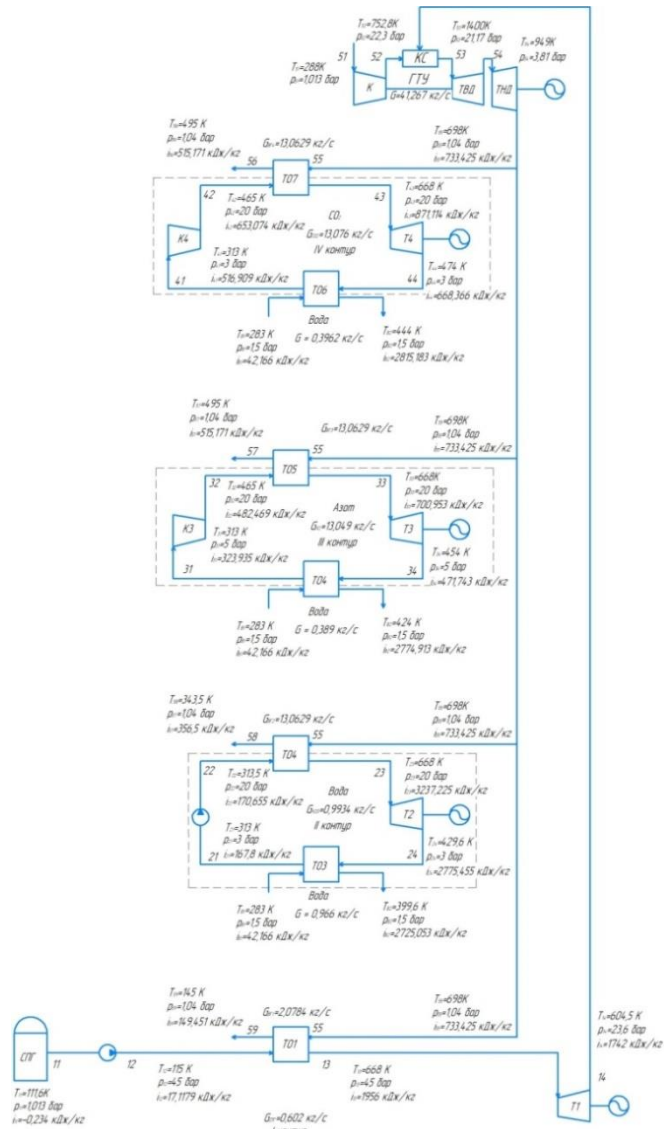
Рисунок А.78 – НЭУ-78: IV – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (313 – 668K) – вода – 3B (313 – 668K) – углекислый газ – 4R (313 – 668K) – R11



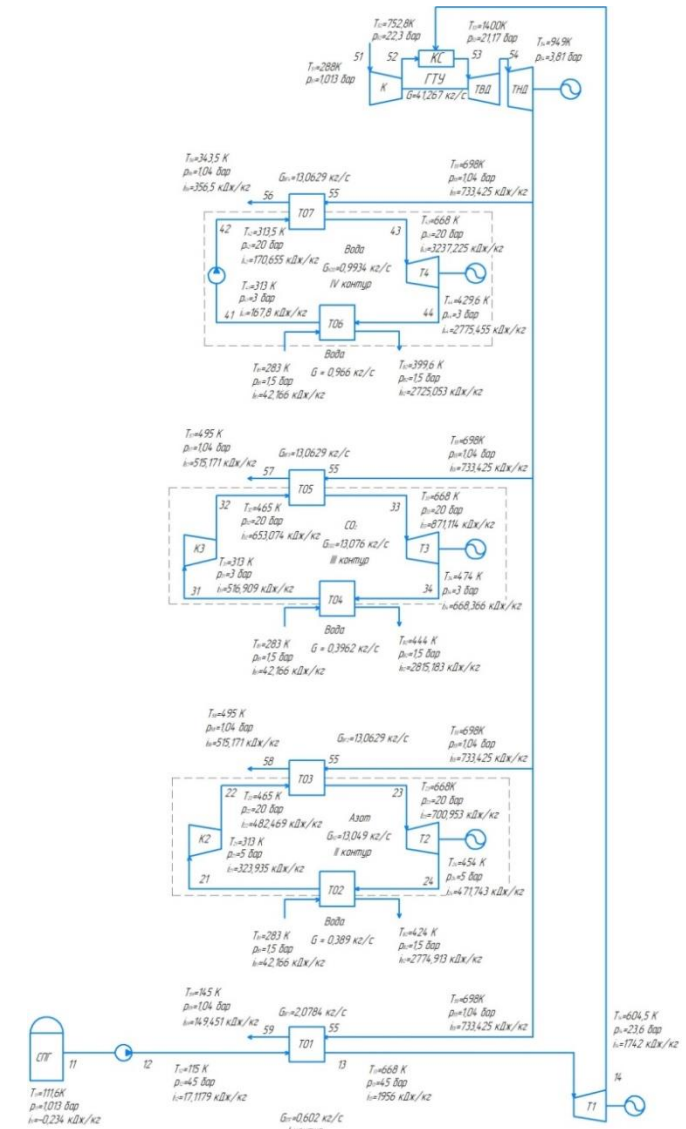
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $К_i$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.79 – НЭУ-79: IV – 1R (111,6 – 668K) – СПГ – 2В (313 – 668K) – углекислый газ – 3R (313 – 668K) – вода – 4R (313 – 668K) – R11



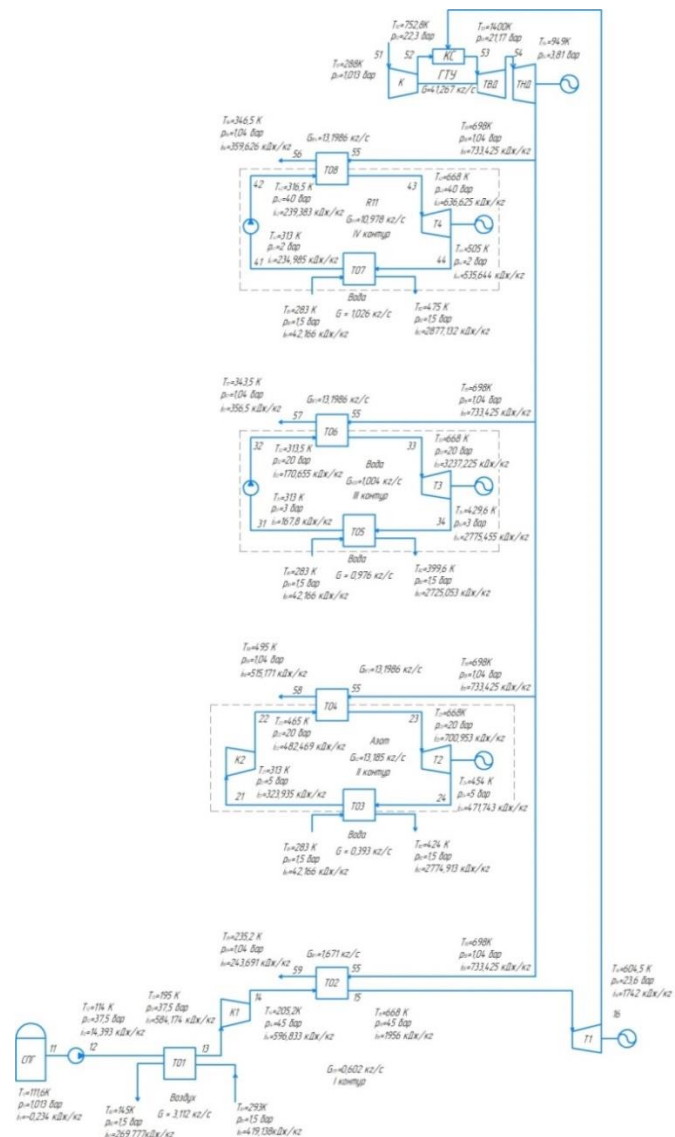
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $К_i$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.80 – НЭУ-80: IV – 1В (111,6 – 668K) – СПГ – 2R (313 – 668K) – вода – 3R (313 – 668K) – R11 – 4R (313 – 668K) – R123



$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.81 – НЭУ-81: IV – 1R (111,6 – 668К) – СПГ – 2R (313 – 668К) – вода – 3В (313 – 668К) – азот – 4В (313 – 668К) – углекислый газ



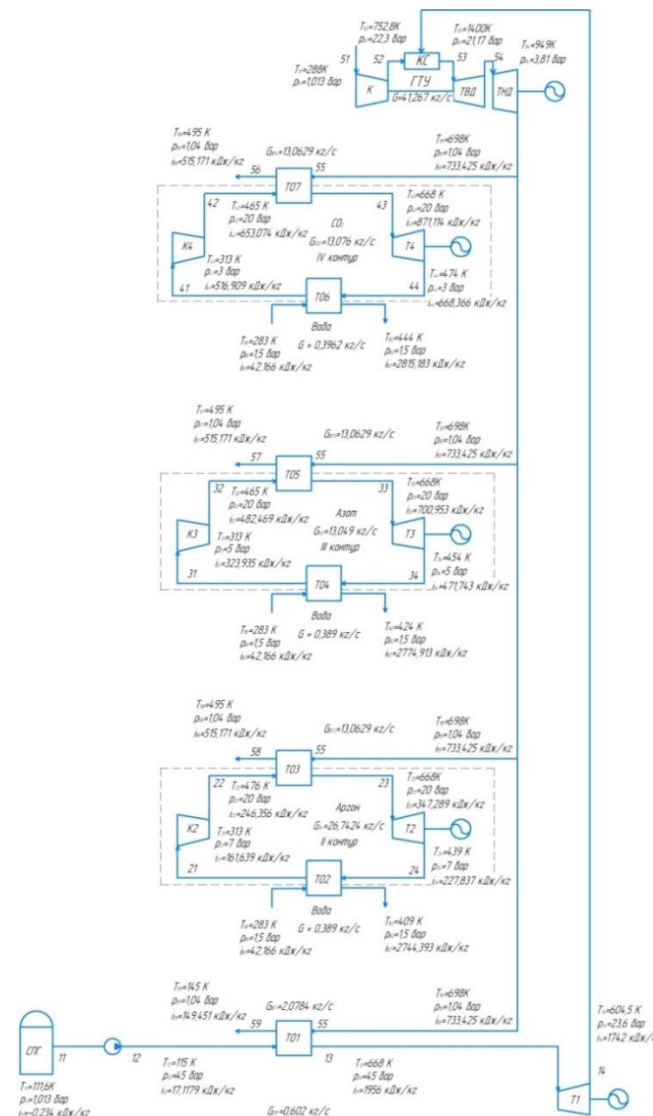
$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.82 – НЭУ-82: IV – 1R (111,6 – 668К) – СПГ – 2В (313 – 668К) – азот – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4R (313 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,

ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.83 – НЭУ-83: IV – 1В (111,6 – 668К) – СПГ – 2В (313 – 668К) – азот – 3R (313 – 668К) – вода – 4R (313 – 668К) – R11

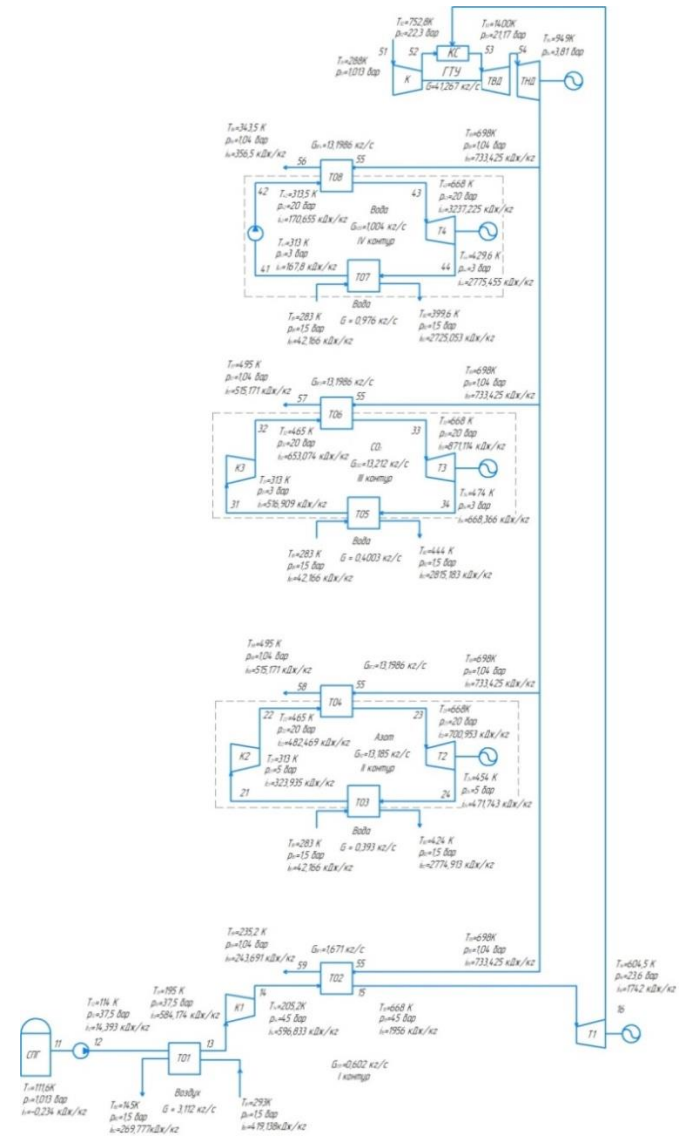


$T_1$  – турбина,  $ТО_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор, ТНД – турбина низкого давления,

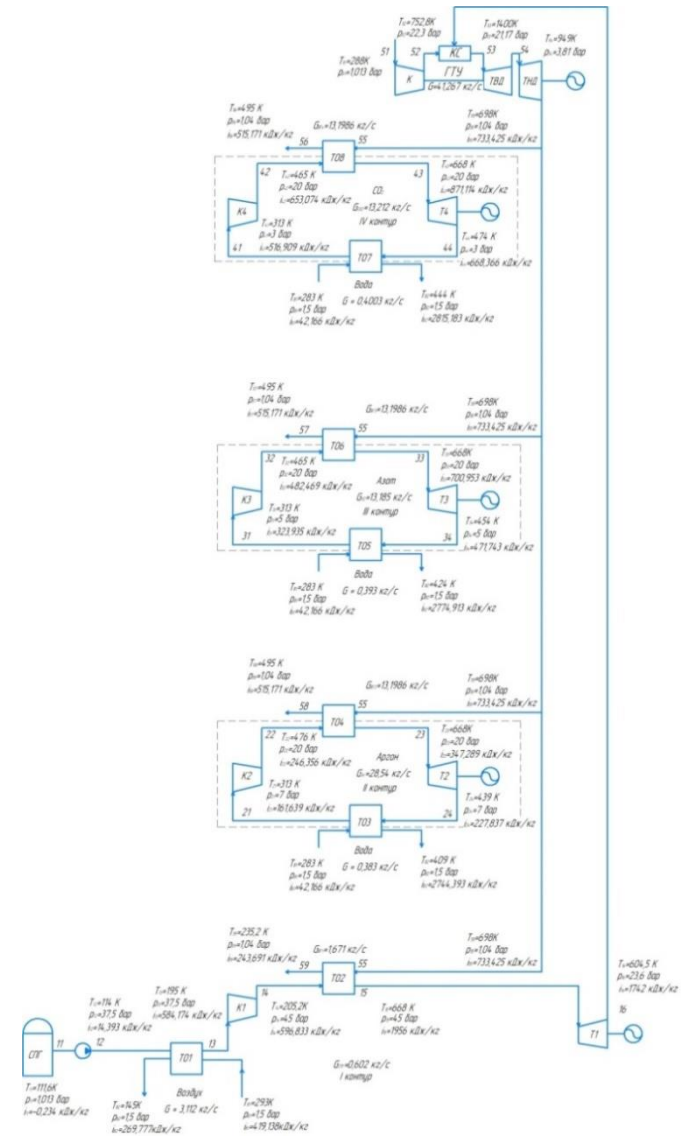
ТВД – турбина высокого давления, КС – камера сгорания

Рисунок А.84 – НЭУ-84: IV – 1R (111,6 – 668К) – СПГ – 2В (313 – 668К) – аргон – 3В (313 – 668К) – азот – 4В (313 – 668К) – углекислый газ

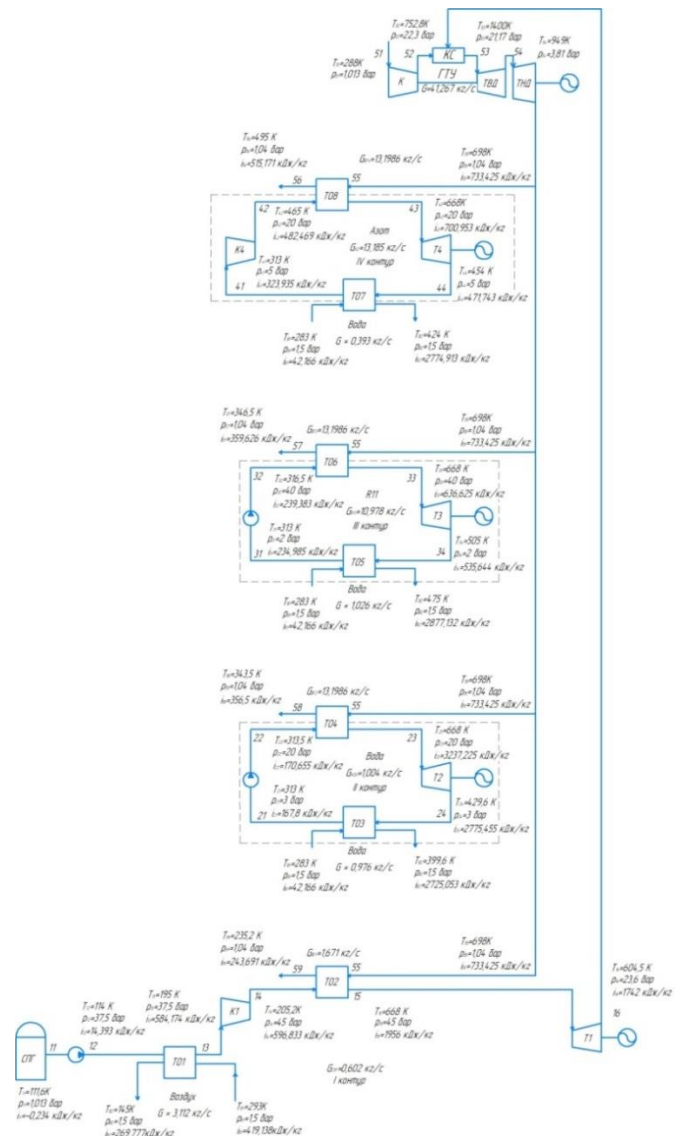




$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $К_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.87 – НЭУ-87: IV – 1В (111,6 – 668К) – СПГ – 2В (313 – 668К) – азот – 3В (313 – 668К) – углекислый газ – 4R (313 – 668К) – вода



$T_1$  – турбина,  $ТО_1$  – теплообменный аппарат,  $К_1$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,  $ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания  
 Рисунок А.88 – НЭУ-88: IV – 1В (111,6 – 668К) – СПГ – 2В (313 – 668К) – аргон – 3В (313 – 668К) – азот – 4В (313 – 668К) – углекислый газ



$T_i$  – турбина,  $TO_i$  – теплообменный аппарат,  $K_i$  – компрессор,  $ТНД$  – турбина низкого давления,

$ТВД$  – турбина высокого давления,  $КС$  – камера сгорания

Рисунок А.89 – НЭУ-89: IV – 1В (111,6 – 668К) – СПГ – 2R (313 – 668К) – вода – 3R (313 – 668К) – R11 – 4В (313 – 668К) – азот

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
Поля характеристик НЭУ



ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
Поля характеристик НЭУ

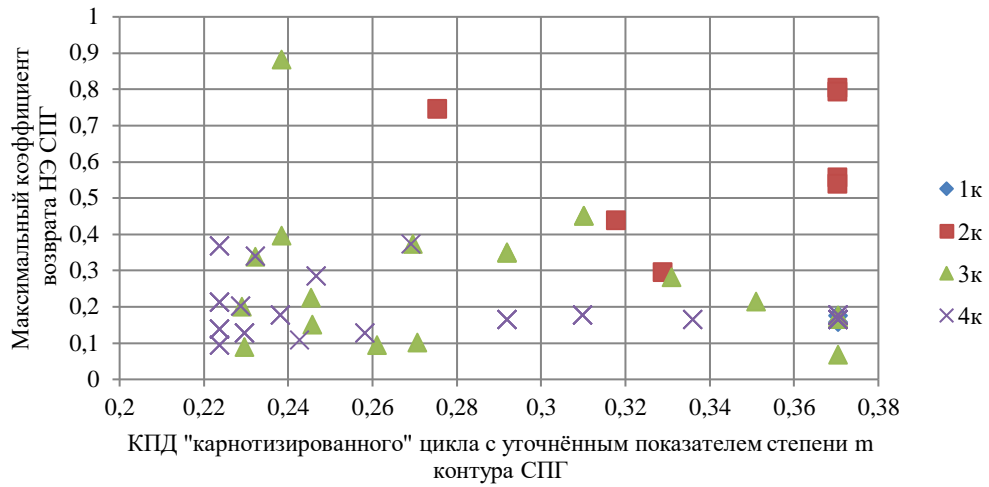


Рисунок Б.1 – Зависимость КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  контура СПГ от максимального коэффициента возврата НЭ СПГ

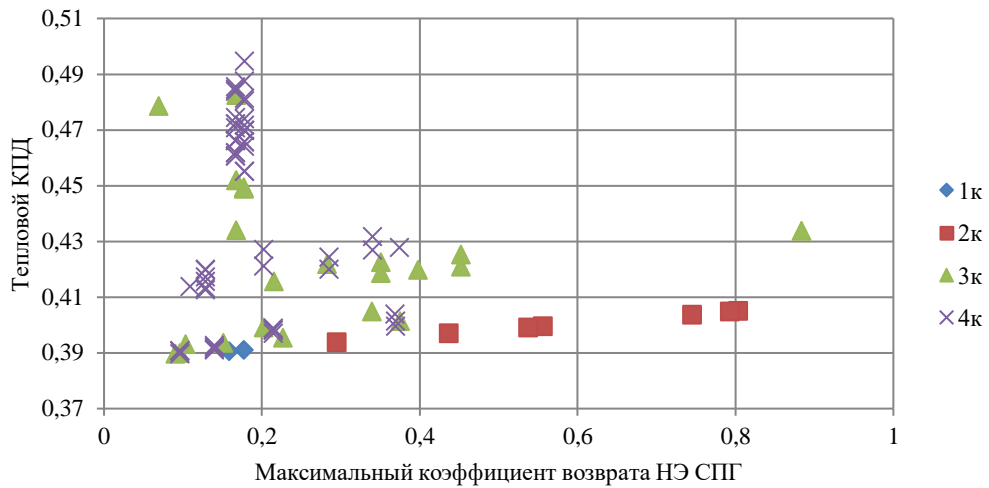


Рисунок Б.2 – Зависимость максимального коэффициента возврата НЭ СПГ от теплового КПД

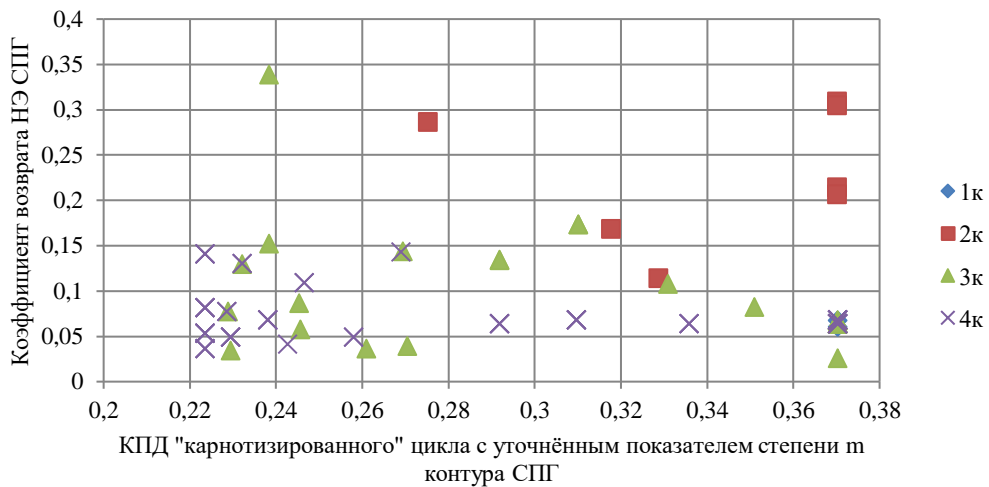


Рисунок Б.3 – Зависимость КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  контура СПГ от коэффициента возврата НЭ СПГ

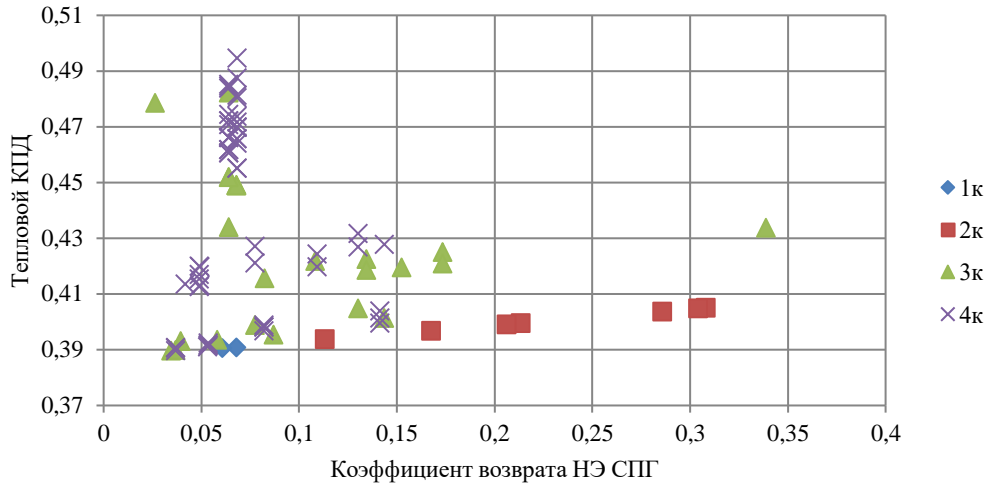


Рисунок Б.4 – Зависимость коэффициента возврата НЭ СПГ от теплового КПД

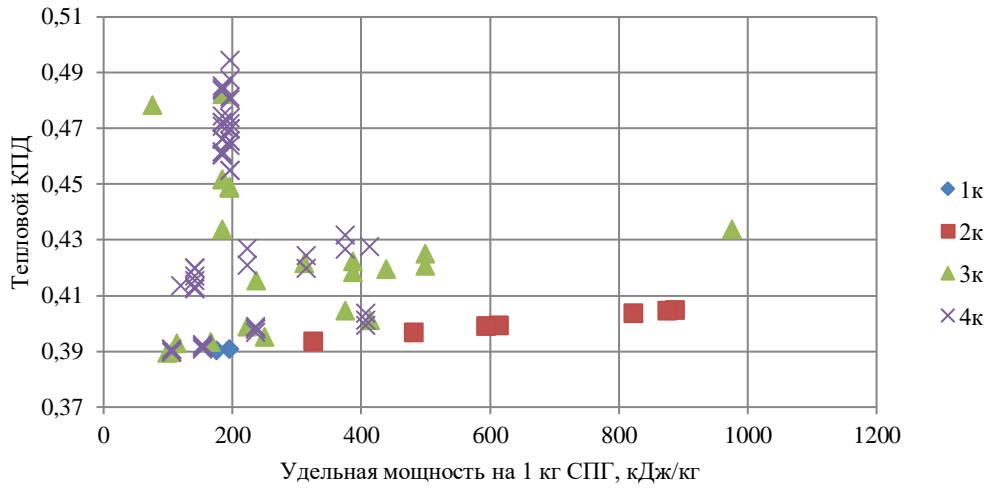


Рисунок Б.5 – Зависимость удельной мощности на 1 кг СПГ от теплового КПД

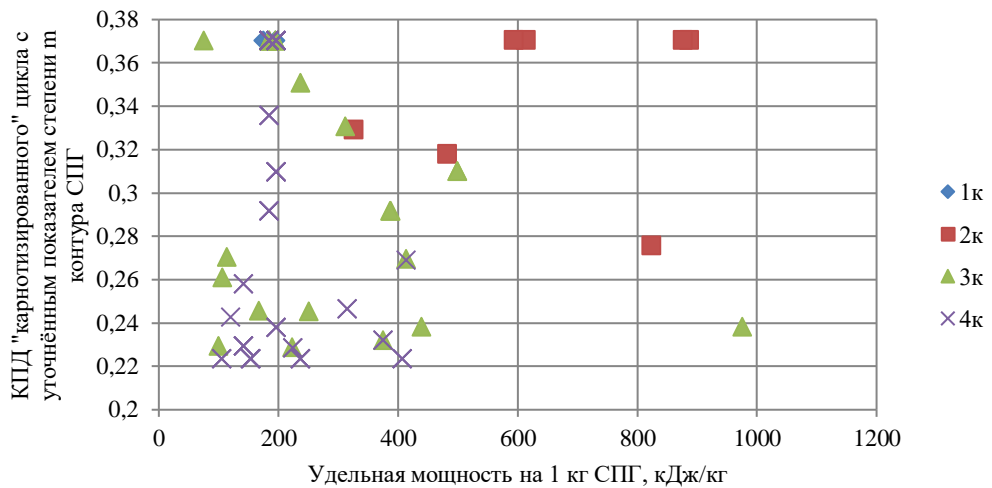


Рисунок Б.6 – Зависимость удельной мощности на 1 кг СПГ от КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени m