

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2023

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

С Днем
энергетика!





ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ПАО "ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕЭС",
КОРПОРАЦИЯ "ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС", НТФ "ЭНЕРГОПРОГРЕСС",
НП "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС"

12 Декабрь
2023

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ "Энергопрогресс"

СОДЕРЖАНИЕ

Проекты и исследования

**Федин М. А., Качалина Е. В., Молостова А. В.,
Федина С. А., Василенко А. И., Зотов М. Л.,
Демидов Ю. А.** Разработка математической
модели электромагнитного поля и схемы заме-
щения индукционно-резистивной системы на-
грева для промышленных трубопроводов 2

**Шелгинский Е. А., Яворовский Ю. В., Шел-
гинский А. Я.** Использование органического
цикла Ренкина в производстве неконцентриро-
ванной азотной кислоты. 10

**Кудинов А. А., Зиганшина С. К., Хусаинов К.
Р.** Двукратный промежуточный перегрев водя-
ного пара в одноконтурном котле-утилизаторе
парогазовой установки 19

Суслов В. А. Метод управления режимами рабо-
ты выпарных аппаратов по показаниям кажущегося
уровня заполнения их кипятильных
труб 28

Ионкин И. Л., Урвачев О. А., Алексеев С. С.
Оценка возможности сжигания водородосодер-
жащих газов в энергетических котлах 33

Альтернативные источники энергии

Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Эксперименталь-
ное исследование параметров вихревой ветро-
тепловой энергоустановки с ротором Н-Дарье . . 45

Алфавитный указатель статей, опубликованных
в 2023 г. 51



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI: 10.34831/EP.2023.85.86.001

Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов*

Федин М. А., доктор техн. наук, **Качалина Е. В.**, канд. техн. наук
Молостова А. В., **Федина С. А.**, аспиранты
Василенко А. И., **Зотов М. Л.**, студенты
ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ», Москва

Демидов Ю. А., советник генерального директора
ООО ПК «Тепловые системы Полюс», Мытищи

Описан принцип действия и приведен алгоритм численного расчета индукционно-резистивной системы нагрева с учетом перемангничивания стали (гистерезиса) и взаимодействия электромагнитного поля с многослойной проводящей средой индукционно-резистивного нагревателя, на основе которого разработана программа для расчета характеристик индукционно-резистивной системы нагрева IRSN PRO. С использованием программы приведены комплексные исследования электрических и энергетических параметров системы индукционно-резистивного нагрева в зависимости от тока индуктора и температуры нагрева. Предложены нелинейная схема замещения индукционно-резистивной системы нагрева и математическое описание параметров схемы замещения для проектирования источника питания.

Ключевые слова: электротехнологии, промышленный электрообогрев, индукционно-резистивная система нагрева, промышленные трубопроводы, система электропитания, симметрирование нагрузки, симметрирующее устройство, преобразователь числа фаз, IRSN PRO.

Современные промышленные системы электрообогрева представляют собой сложные технологические установки с автоматическим управлением и мониторингом, характеризующиеся надежностью, эффективностью и экономичностью. Они зарекомендовали себя в качестве незаменимой составляющей в системах транспорта и хранения нефти.

Индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН), основанные на использовании поверхностного эффекта и эффекта близости в электрических проводниках переменного

тока, наиболее оптимизированы для электрообогрева протяженных трубопроводов. В настоящее время ИРСН имеют следующие технические характеристики: удельная мощность — до 165 Вт/м, рабочее напряжение — до 3 – 5 кВ, диапазон температур — от –60 до 200 °С, напряжение на поверхности проводника — примерно 0,05 В/м [1, 2].

Разработка математической модели ИРСН требует проведения теоретических исследований и экспериментов, измерений и статистического анализа данных для определения зависимостей между параметрами ИРСН и внешними воздействиями. Это позволит создать модель, которая будет точно предсказывать поведение ИРСН в различных условиях. Проектирование комплекса электрообогрева на основе ИРСН с использованием математической модели позволит оптимально подобрать пара-

* Работа выполнена в рамках проекта «Разработка цифрового двойника и электрооборудования электротехнологической системы промышленного обогрева нового поколения в нефтегазовой отрасли» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022 – 2024 гг.

метры системы электропитания и системы управления, что обеспечит повышение эффективности и надежности работы всего комплекса.

При теоретическом исследовании ИРСН возникает задача расчета параметров электромагнитного поля (ЭМП) в ферромагнитной проводящей среде, при решении которой необходимо учитывать нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости материала μ от напряженности магнитного поля H , потери активной мощности на перемагничивание материала индукционно-резистивного нагревателя (гистерезис), а также взаимодействие ЭМП с многослойной проводящей средой индукционно-резистивного нагревателя [3].

Принцип действия и варианты конструкции ИРСН

На рис. 1 представлен эскиз устройства индукционно-резистивного нагрева. Индукционно-резистивный нагреватель (ИРН) представляет собой трубку 1 из низкоуглеродистой стали, внутри которой располагается специальный проводник — индукционно-резистивный проводник (ИРП) 2 из немагнитного материала (меди или алюминия), покрытого электроизоляцией 3. Проводник в конце плеча обогрева надежно соединяется со стальной трубкой, а в начале плеча между трубкой и проводником подается переменное напряжение, значение которого рассчитывается с учетом необходимого тепловыделения и длины участка обогрева.

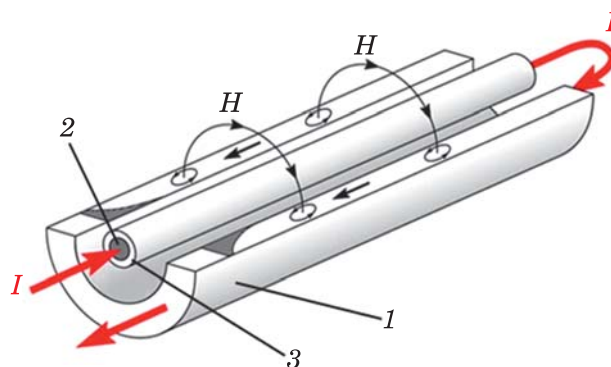


Рис. 1. Конструкция ИРСН:

1 — ИРН; 2 — ИРП; 3 — электроизоляция

При протекании тока происходит выделение тепла в обоих проводниках: в ИРП — за счет омических потерь, в ИРН — за счет омических потерь, а также индукционного нагрева индуцированными токами и в результате перемагничивания ИРН в электромагнитном поле ИРП. Вклад перемагничивания (гистерезиса) является весьма значительным, поскольку рассматриваемое устройство характеризуется слабыми ЭМП с напряженностью магнитного поля H менее 4 кА/м.

В настоящее время существуют следующие конструктивные исполнения ИРСН, которые можно разделить на три основные группы: закрытые, открытые и гибкие.

К закрытым системам относятся: классическая закрытая система, конструкция и принцип действия которой описаны выше (рис. 1, рис. 2, а); с различным исполнением ИРН, включая внутреннее шунтирование и использование в конструкции нескольких слоёв различных материалов (немагнитных и ферро-

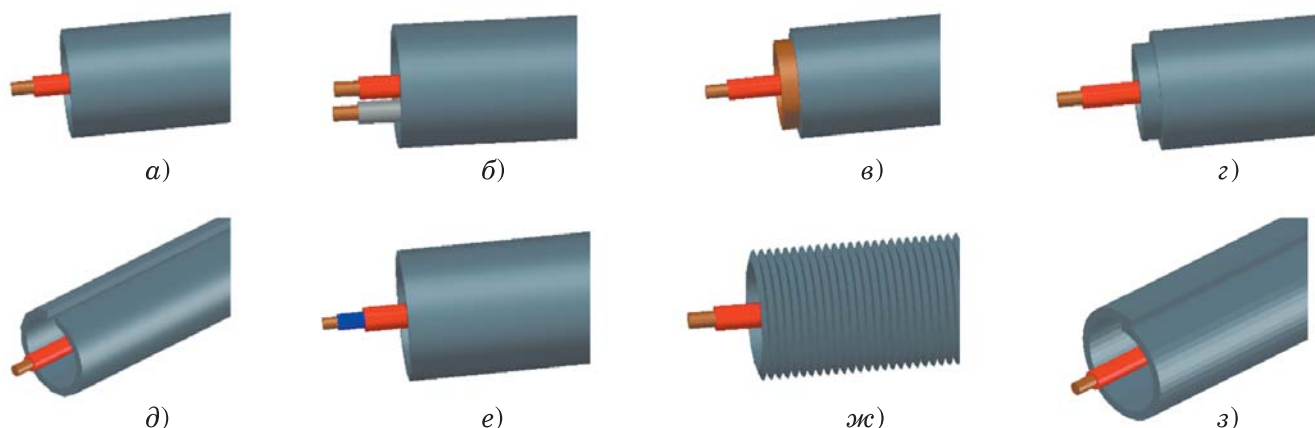


Рис. 2. Конструкции ИРСН:

а — классическая; б — с внутренним шунтированием ИРН; в — биметаллическая; г — многослойная; д — ИРН с зазором; е — градирированная ИРСН; ж — гибкая (в гофре); з — ИРН с нахлестом

магнитных), что позволяет улучшить электрические и энергетические характеристики (рис. 2 б, в, г); разомкнутые конструкции, использующие ИРН с зазором и нахлестом (рис. 2 д, е, з).

Существуют также гибкие системы, выполненные по кабельной технологии (рис. 2, ж), позволяющие использовать ИРСН для обогрева не только трубопроводов, но и резервуаров и скважин.

В открытых системах, в которых нагревательный элемент представлен петлевидным кабелем, проложенным внутри отдельных трубок из ферромагнитной стали, уложенных с небольшим зазором между собой, напряжение подается только на кабель, что обеспечивает индукционный нагрев трубок [1].

Сложность электромагнитных расчетов ИРСН, несмотря на их простую геометрию, определяется нелинейностью магнитных свойств ферромагнетика — материала ИРН, наличием эффекта гистерезиса и в ряде случаев сложностью конфигурации электромагнитного поля, обусловленной конструктивными особенностями системы нагрева [4, 5].

Разработка алгоритма и программы расчета ИРСН

В современных программных пакетах для расчета ЭМП (ANSYS, ELCUT и др.) потери на гистерезис не учитываются, что связано с практическими задачами, в которых предполагается использование сильных ЭМП и доля этих потерь незначительна. Поэтому авторами была разработана математическая модель, основанная на электрической схеме замещения. Эта модель описывает выделение мощности в ферромагнетике как за счет джоулева тепла, так и за счет перемагничивания.

Рассмотрим модель, основанную на электрической схеме замещения применительно к ферромагнитной трубе с внутренним диамет-

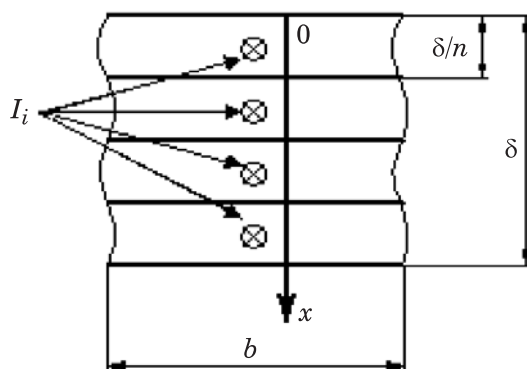


Рис. 3. Участок стенки трубы ИРСН с разбиением на слои с токами I_i

ром d и толщиной δ , по которой протекает ток I частотой f . В качестве примера принято разбиение стенки трубы по толщине (рис. 3) на четыре слоя (в общем случае — на n слоев). При этом принято, что ток в каждом слое протекает в его середине. Заданы удельное электрическое сопротивление материала трубы ρ , основная кривая намагничивания $B(H)$ и зависимость объемных потерь на гистерезис w_g от H и f .

Численный расчет параметров ИРСН основан на использовании эквивалентной электрической схемы замещения (рис. 4).

При расчете приняты следующие допущения:

- 1) индуктор и труба расположены коаксиально;
- 2) стенка трубы в электромагнитном отношении считается плоской и может рассматриваться как плита;
- 3) магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H изменяются во времени по синусоидальному закону;
- 4) относительная магнитная проницаемость в конкретной точке по толщине ферромагнитного слоя трубы постоянна во времени и равна значению, соответствующему дейст-

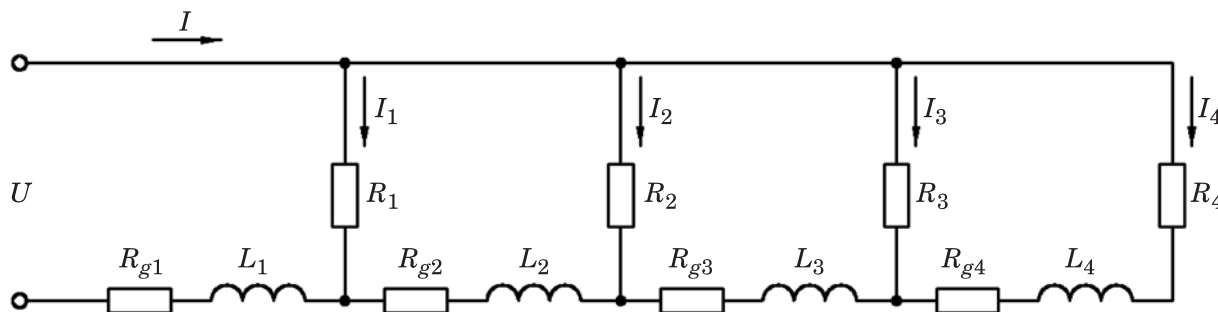


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема замещения для устройства индукционно-резистивного нагрева

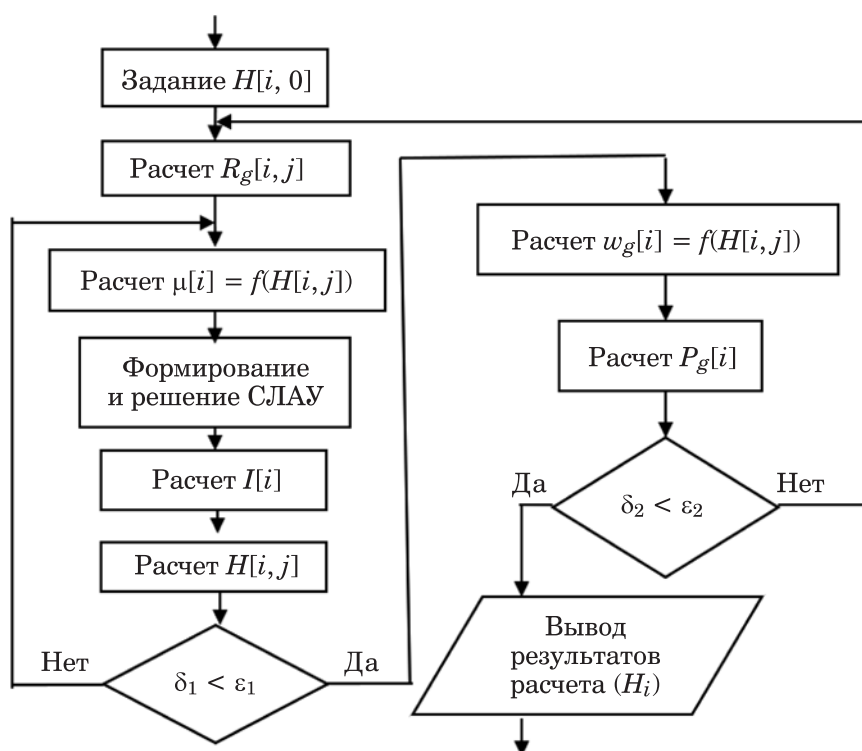


Рис. 5. Алгоритм численного расчета ЭМП в ферромагнитной трубе с учетом гистерезиса

вующему значению напряженности магнитного поля в данной точке;

5) изменение удельного электрического сопротивления, а также относительной магнитной проницаемости материала слоев трубы в процессе нагрева при расчете не учитываются.

Алгоритм расчета позволяет учесть наличие нескольких слоев в конструкции ИРН, причем материалы этих слоев могут быть ферромагнитными или же, наоборот, не обладать ферромагнитными свойствами. На практике (как видно из рис. 2) встречаются случаи, когда внешний слой ИРН выполняется из конструкционной ферромагнитной стали, а внутренний — из меди, либо когда оба слоя выполняются из ферромагнитных материалов с различными свойствами. Для этих вариантов внутренний и внешний слои ИРН разбиваются по толщине на элементарные слои, количество которых, например, составляет n_1 и n_2 . Общее количество разбиений двухслойного ИРН: $n = n_1 + n_2$. Теоретически количество слоев ИРН может быть и большим [6, 7].

Тогда для каждого слоя собственные активные сопротивления R_i и индуктивности L_i , а также активные сопротивления R_{gi} , учитывающие выделение мощности за счет гистерезиса и принимающие значения, равные нулю для слоя немагнитного материала, для каждого элементарного слоя i рассчитываются в со-

ответствии с электрофизическими свойствами и геометрическими параметрами каждого слоя многослойного ИРН.

Следует отметить, что задачу расчета параметров ЭМП в стенке трубы необходимо решать итерационным методом. Алгоритм численного расчета ЭМП в ферромагнитной трубе (рис. 5) содержит два итерационных цикла: внутренний цикл учитывает нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, внешний — нелинейную зависимость удельных объемных потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля [8, 9].

Решением системы уравнений на каждой итерации является распределение действующих значений токов в слоях стенки трубы. После этого рассчитываются значения напряженности магнитного поля в слоях, затем интегральные электрические и энергетические характеристики: активные и реактивные мощности, напряжение питания, напряжение на поверхности ИРН, электрический КПД и коэффициент мощности.

Авторами разработана и реализована программа IRSN PRO [10] для расчета ИРСН на промышленной частоте. Данная программа позволяет изучать свойства различных ИРСН в качестве электрических нагрузок с учётом нелинейных зависимостей относительной магнитной проницаемости и мощности потерь на

Исходные данные	
Площадь поперечного сечения проводника, мм ²	15
Наружный диаметр трубы, мм	32
Толщина стенки трубы, мм	3
Удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м	1,93e-8
Удельное электрическое сопротивление трубы, Ом·м	1,66e-7
Частота тока, Гц	50
Ток индуктора, А	40
Число слоев, на которые разделяется стенка трубы	50
Задание $\mu(H)$ вручную	☐
100%	

Результаты расчета	
Напряжение на поверхности трубы (на 1 м длины), В/м	0,217
Активная мощность в трубе (на 1 м длины), Вт/м	6,144
Активная мощность в индукторе (на 1 м длины), Вт/м	2,059
Суммарная активная мощность (на 1 м длины), Вт/м	8,203
Реактивная мощность в индукторе (на 1 м длины), ВАр/м	0,000
Реактивная мощность в трубе (на 1 м длины), ВАр/м	3,310
Реактивная мощность в зазоре (на 1 м длины), ВАр/м	0,179
Реактивная мощность снаружи трубы (на 1 м длины), ВАр/м	0,000
Суммарная реактивная мощность (на 1 м длины), ВАр/м	3,490
Полная мощность системы (на 1 м длины), ВА/м	8,914
cos phi	0,920
Напряжение на индукторе (на 1 м длины), В/м	0,223
Условный электрический КПД	0,749

Рис. 6. Форма с исходными данными и результатами расчёта ИРСН с параметрами ИРН — труба 32 × 3 из стали 10, ток ИРП — 100 А, частота — 50 Гц в программе IRSN PRO

гистерезис от напряженности магнитного поля. Исходные данные для расчета: геометрические параметры системы, свойства материала слоев трубы, электрические характеристики (ток индуктора I , частота f). На рис. 6 представлена форма с исходными данными и результатами расчета ИРСН разработанной программы.

Параметры схемы замещения и вольтамперные характеристики ИРСН

Для расчета оптимальных параметров системы электроснабжения авторами с помощью программы было проведено исследование электрических и энергетических характеристик ИРСН различной длины и мощности,

с разными размерами прямого и обратного проводников с учетом перемагничивания ферромагнитной трубы [11].

Схема замещения ИРСН представляет собой последовательное соединение нелинейных активного сопротивления и индуктивности нагрузки, значения которых будут изменяться в процессе работы ИРСН при изменении температуры нагрева и рабочего тока (рис. 7). При этом температуры ИРП и ИРН различны в каждый момент времени, что дополнительно усложняет расчет. Так, на рис. 7 для ИРСН с параметрами, указанными на рис. 6 (ИРН — труба 32 × 3 из стали 10, ток ИРП — 100 А, частота — 50 Гц), представлены результаты решения стационарной тепловой задачи в виде распределения температуры. Видно, что отличие температуры ИРП и ИРН составляет около 15 – 20 °С.

С увеличением температуры системы удельные электрические сопротивления ИРП и ИРН будут существенно меняться, неизменными остаются частота и площадь поперечного сечения ИРП, наружный диаметр ИРН и толщина его стенки. Подставляя рассчитанные в программе IRSN PRO значения напряжения на индукторе U_H , тока I_H и $\cos\varphi$, находим фактические значения активного сопротивления R_H и индуктивности L_H нагрузки:

$$R_H = \frac{U_H \cos\varphi}{I_H}; \quad (1)$$

$$L_H = \frac{\frac{U_H}{I_H} \sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{2\pi f}. \quad (2)$$

Для ИРСН с вышеуказанными параметрами на рис. 8 и 9 представлены зависимости активного сопротивления и индуктивности схемы замещения системы нагрева соответственно при изменении температуры нагрева от –40 °С до +200 °С для трех значений рабочего тока (75, 100 и 150 А). При изменении значения тока меняется распределение напряжённости ЭМП в слоях ИРН, а, значит, изменяются значения относительной магнитной проницаемости каждого элементарного слоя ИРН (см. рис. 3). Это и определяет изменение индуктивности схемы замещения ИРСН при изменении рабочего тока. В свою очередь, изменение индуктивности, а также магнитный гистерезис обуславливают изменение распределения плотности электрического тока в ИРН

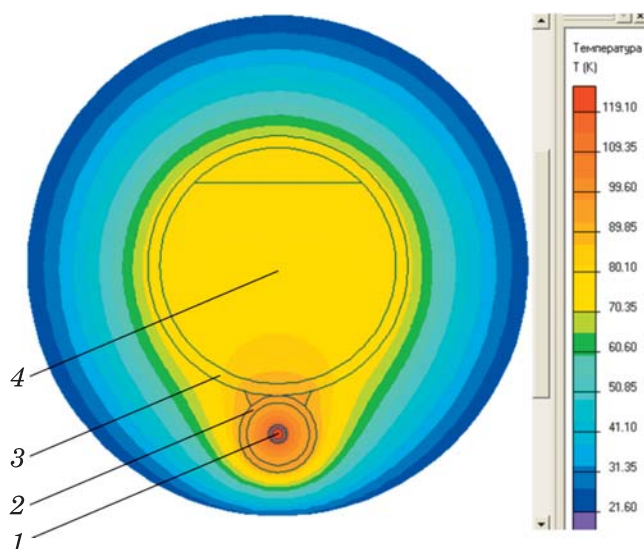


Рис. 7. Картина температурного поля в ИРСН, обогреваемом трубопроводе и окружающем его пространстве:

1 — ИРП; 2 — ИРН; 3 — транспортный трубопровод; 4 — продукт

и в конечном итоге изменение активного сопротивления системы.

Полученные теоретические зависимости параметров электрической схемы замещения ИРСН были проверены экспериментально с использованием макета ИРСН. Отличия результатов теоретических и экспериментальных исследований составляют не более 5 – 7 %. В состав экспериментального макета, функциональная схема которого показана на рис. 10, входят физическая модель ИРСН общей длиной 16 м и состоящая из четырех соединенных перемычками последовательно отрезков труб 32×3 из стали 10 длиной по 4 м каждый, внутри которых проходит ИРП сечением 15 мм^2 , лабораторный автотрансформатор $T1$ для изменения рабочего тока, понижающий силовой трансформатор $T2$, трансформатор тока $TA1$, амперметры $PA1 - PA3$,

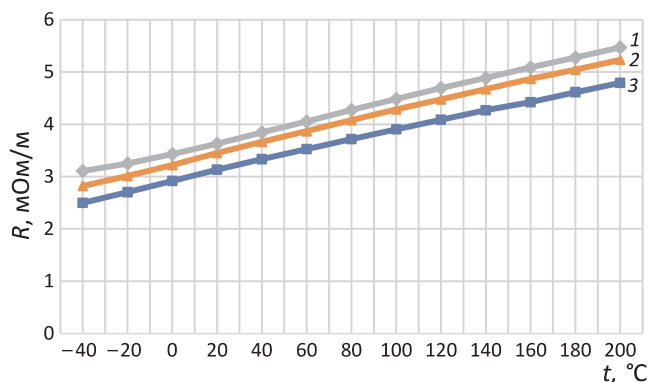


Рис. 8. Зависимость активного сопротивления системы при токе индуктора 75 (1), 100 (2) и 150 (3) от температуры нагрева

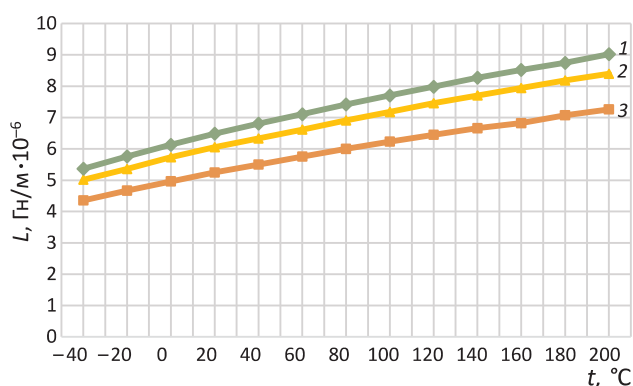


Рис. 9. Зависимость индуктивности системы при токе индуктора 75 (1), 100 (2) и 150 А (3) от температуры нагрева

вольтметры $PV1 - PV4$, ваттметр $PW1$, фазометр $P1$.

С использованием макета ИРСН с различными трубами экспериментально были получены вольтамперные характеристики, которые представлены на рис. 11 (кривые 3, 4) в сравнении с характеристиками, полученными расчетным путем (кривые 1, 2). Сравнение теоретических и экспериментальных вольтам-

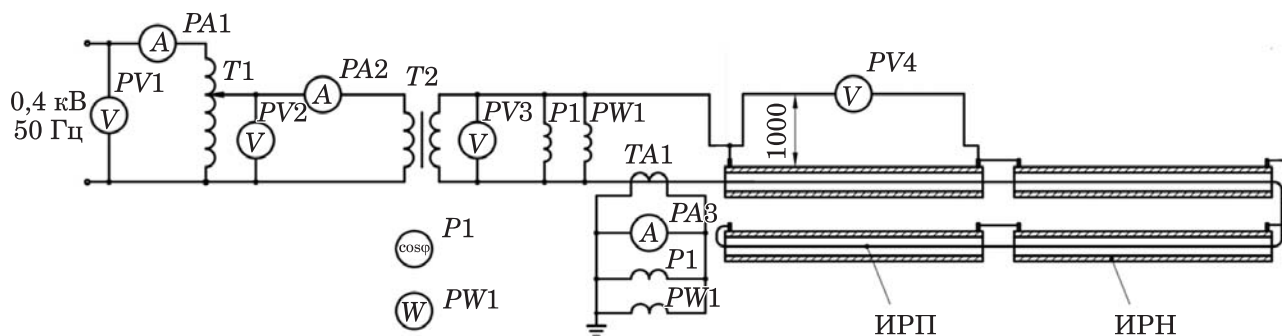


Рис. 10. Функциональная схема макета ИРСН

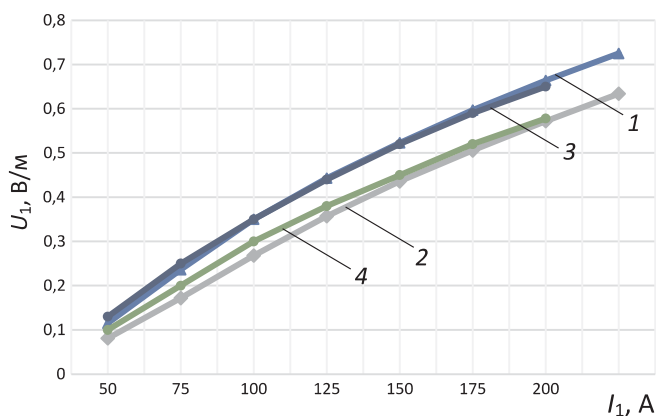


Рис. 11. Вольтамперные характеристики ИРСН с различными трубами (32×3 (1, 3) и 40×4 (2, 4)), полученные в ходе эксперимента

перных характеристик ИРСН показывает, что отличие расчетных и экспериментальных результатов составляет не более 9 – 10 %. Результаты расчетов позволяют построить имитационную модель ИРСН в программном пакете MATLAB/Simulink в виде нелинейной электрической схемы замещения, с использованием которой возможно проектирование системы электроснабжения ИРСН, обязательным элементом которой, как правило, является симметрирующее устройство.

Выводы

1. Разработана математическая модель ИРСН, учитывающая нелинейность используемых материалов, в том числе эффект магнитного гистерезиса, а также сложность конфигурации ЭМП, обусловленную конструктивными особенностями системы нагрева.

2. Проведено исследование и получены электрические и энергетические характеристики ИРСН в зависимости от температуры, длины системы, размеров ИРН и значений тока ИРП. При расчете характеристик учитывались эффект перемагничивания ИРН, а также температурные зависимости удельного электрического сопротивления материалов ИРП и ИРН. Установлено, что параметры электрической схемы замещения ИРСН (активное сопротивление и индуктивность) являются нелинейными величинами, зависящими от температуры нагрева и рабочего тока. Это необходимо учитывать при дальнейшем проектировании систем электропитания ИРСН.

3. Разработанная программа для расчета электрических и энергетических характеристик индукционно-резистивных систем нагрева

ва IRSN PRO, учитывающая нелинейность используемых в конструкции электротехнических материалов, позволяет получить более точные и надежные результаты, а также сократить время и затраты на проектирование и создание системы электрообогрева.

4. С учетом проведенного анализа литературы и математических расчетов на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ» разработан стенд, на котором выполнено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Отличия результатов составляют от 5 до 10%.

Список литературы

1. Струпинский, М. Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. — 2-е изд. / М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, А. Б. Кувалдин. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 524 с.
2. Кувалдин, А. Б. Теория индукционного нагрева: В 2 ч. Ч. 1: Основные характеристики и расчет параметров электромагнитного поля / А. Б. Кувалдин, М. А. Федин. — М.: Издательство МЭИ, 2018.
3. Кувалдин, А. Б. Теория индукционного нагрева. В 2 ч. Ч. 2. Методы расчета и моделирование: учеб. пособие / А. Б. Кувалдин, М. А. Федин. — М.: Издательство МЭИ, 2020.
4. Кувалдин, А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 200 с.
5. Кувалдин, А. Б. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве / А. Б. Кувалдин, М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, М. А. Федин // Индукционный нагрев. — 2010. — № 13. — С. 17 – 21.
6. Кувалдин, А. Б. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах / А. Б. Кувалдин, М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, В. А. Шатов // Электричество. — 2005. — № 11. — С. 56 – 61.
7. Кувалдин, А. Б. Расчет электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки / А. Б. Кувалдин, М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, М. А. Федин // Электричество. — 2009. — № 10. — С. 54 – 61.
8. Kuvaldin, A. Simulation of electromagnetic field in ferromagnetic steel taking into account hysteresis effect / A. Kuvaldin, M. Strupinskiy, N. Khrenkov, M. Fedin. International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources — Padua, 2010. P. 83 – 89.

9. Кувалдин А. Б. Расчет ферромагнитной загрузки индукционного нагревателя при использовании малых удельных мощностей / А. Б. Кувалдин, М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, М. А. Федин / Материалы 2-й международной конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» АПИИ 09, — Санкт-Петербург, 2009. С. 179 – 186.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619476 «Программа для расчета индукционно-резистивной системы нагрева IRSN PRO» / Кувалдин А. Б., Федин М. А., Федина С. А., Молостова А. В., Василенко А. И., Зотов М. Л. — Заявка № 2023618235. Дата поступления 27.04.2023. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.05.2023.
11. Кувалдин, А. Б. Моделирование электромагнитного преобразователя числа фаз для индукционно-резистивной системы обогрева промышленных трубопроводов / А. Б. Кувалдин, М. А. Федин, А. В. Молостова, М. Л. Зотов, А. И. Василенко / Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: материалы XX междунар. научно-практической конференции. — Орёл: ОГУ имени И. С. Тургенева, 2022. — С. 31 – 35.
4. Kuvaldin A. B. *Induktsionnyi nagrev ferromagnitnoi stali* (Induction heating of ferromagnetic steel), Moscow, Energoatomizdat, 1988, 200 p.
5. Kuvaldin A. B., Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Fedin M. A. *Induktsionnyi nagrev* (Induction heating), 2010, No. 13, pp. 17 – 21.
6. Kuvaldin A. B., Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Shatov V. A. *Elektrichestvo* (Electricity), 2005, No. 11, pp. 56 – 61.
7. Kuvaldin A. B., Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Fedin M. A. *Elektrichestvo* (Electricity), 2009, No. 10, pp. 54 – 61.
8. Kuvaldin A., Strupinskiy M., Khrenkov N., Fedin M. Simulation of electromagnetic field in ferromagnetic steel taking into account hysteresis effect, International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources – Padua, 2010, pp. 83 – 89.
9. Kuvaldin A. B., Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Fedin M. A. *Materialy 2-i mezhdunarodnoi konferentsii «Aktual'nye problemy teorii i praktiki induktsionnogo nagreva» APII 09* (Proceedings of the 2nd international conference «Current problems of the theory and practice of induction heating» APII 09), St. Petersburg, 2009, pp. 179 – 186.
10. Kuvaldin A. B., Fedin M. A., Fedina S. A., Molostova A. V., Vasilenko A. I., Zotov M. L. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023619476 «Programma dlya rascheta induktsionno-rezistivnoi sistemy nagreva IRSN PRO»* (Certificate of state registration of a computer program No. 2023619476 «Program for calculating the induction-resistive heating system IRSN PRO»), Application No. 2023618235, publ. 27.04.2023, Registered in the register of computer programs on 05.11.2023.
11. Kuvaldin A. B., Fedin M. A., Molostova A. V., Zotov M. L., Vasilenko A. I. *Energo- i resursosberezhenie – XXI vek: materialy XX mezhdunar. nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Energy and resource saving — XXI century: materials of the XX international scientific and practical conference), Orel, OSU named after I. S. Turgeneva, 2022, pp. 31 – 35.

References

1. Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Kuvaldin A. B. *Proektirovanie i ekspluatatsiya sistem elektricheskogo obogreva v neftegazovoi otrasli* (Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry), 2nd ed., Moscow, Vologda, Infra-Engineering, 2023, 524 p.
2. Kuvaldin A. B., Fedin M. A. *Teoriya induktsionnogo nagreva, V 2 ch., Ch. 1, Osnovnye kharakteristiki i raschet parametrov elektromagnitnogo polya* (Theory of induction heating, In 2 parts, Part 1, Basic characteristics and calculation of electromagnetic field parameters), Moscow, Publ. MPEI, 2018.
3. Kuvaldin A. B., Fedin M. A. *Teoriya induktsionnogo nagreva, Chast' 2, Metody rascheta i modelirovanie* (Theory of induction heating, Part 2, Calculation methods and modeling), Moscow, Publ. MPEI, 2020.

MolostovaAV@mpei.ru

Development of a mathematical model of the electromagnetic field and equivalent circuit for Skin Effect Pipeline Heating System

Fedin M. A., Kachalina E. V., Molostova A. V., Fedina S. A., Vasilenko A. I., Zotov M. L., Demidov Yu. A.

The principle of operation and algorithm for the numerical calculation of an induction-resistance heating system, taking into account the reversal magnetization of steel (hysteresis) and interaction of the electromagnetic field with the multilayer conductive medium of the induction-resistance heater are presented. A program for calculating the characteristics of the induction-resistance heating system (IRSN PRO) has been developed. A comprehensive study of the electrical and energy parameters of IRSN PRO and their dependences on the inductor current and heating temperature has been carried out. A nonlinear equivalent circuit of an induction-resistance heating system and a mathematical description of the parameters of the equivalent circuit for designing a power source are proposed.

Keywords: electrical technology, industrial electric heating, induction-resistance heating system, IRSN PRO, industrial pipelines, power supply system, load balancing, balancing device, phase number converter.

Использование органического цикла Ренкина в производстве неконцентрированной азотной кислоты

Шелгинский Е. А., аспирант, Яворовский Ю. В., кандидат техн. наук

Шелгинский А. Я., доктор техн. наук

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Исследован новый способ утилизации вторичных энергоресурсов в производстве неконцентрированной азотной кислоты в агрегате УКЛ-7. Утилизируемая тепловая энергия — теплота сжатого воздуха после осевого компрессора, выбрасываемая в окружающую среду через водооборотный цикл с градирней. Она поступает на нагревание и испарение фреона R600a в испарителе органического цикла Ренкина и для подогрева питательной воды перед деаэратором вместо используемого продукционного пара. Вместо теплоты пара для испарения аммиака в технологическом цикле используется теплота конденсации фреона в конденсаторе цикла. Экономленный продукционный пар отдаёт теплоту в испарителе дополнительного органического цикла Ренкина для производства еще большего количества электроэнергии. Однако для охлаждения изобутана во втором цикле применяется вода водооборотного цикла с градирней. При этом тепловая энергия выбрасывается в окружающую среду. Установлено, что при использовании теплоты сжатого воздуха вырабатывается электроэнергия в органическом цикле Ренкина в количестве 1 309 493 кВт·ч в год, количество сэкономленного пара составляет 41 057 т/год. Количество выработанной электроэнергии в дополнительном органическом цикле Ренкина составляет 2 034 014 кВт·ч в год. С учетом использования электроэнергии на собственные нужды, количество электроэнергии, на которое возможно сократить потребление от внешнего источника, составляет около 1 680 149 кВт·ч в год.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, электроэнергия, пар, органический цикл Ренкина, азотная кислота.

В связи с постоянным ростом потребления энергетических ресурсов во всех отраслях промышленности РФ и подорожанием энергоресурсов повышается актуальность проведения и реализации энергоэффективных и экономически оправданных решений. Одним из путей реализации энергоэффективных решений в промышленности является использование вторичных энергоресурсов (ВЭР). В данной работе рассмотрены вопросы утилизации ВЭР в производстве азотной кислоты, являющейся частью химической промышленности РФ.

Неконцентрированная азотная кислота (НАК) концентрацией 58 – 60 %, производится в больших количествах и используется для получения азотных минеральных удобрений. Большая часть агрегатов по производству НАК была введена в эксплуатацию еще в СССР более 50 лет назад и подлежит модернизации или выводу из эксплуатации [1]. Основными агрегатами в РФ для производства НАК являются УКЛ-7 и АК-72.

В данной статье рассмотрены вопросы утилизации ВЭР на примере производства НАК на агрегате УКЛ-7. В этом агрегате производство азотной кислоты происходит под единым

давлением 0,716 МПа на стадиях конверсии аммиака и на стадии абсорбции нитрозных газов водой. Проектная производственная мощность агрегата УКЛ-7 составляет 120 тыс. т/год моногидрата HNO_3 . Основные ресурсы для производства азотной кислоты — воздух, вода, аммиак. Используют также природный газ при неселективной очистке хвостовых газов перед выбросом в атмосферу.

Технологическая схема производства УКЛ-7 представлена на рис. 1. Очищенный атмосферный воздух после фильтра 1 поступает в осевой компрессор 2 с целью сжатия до давления 0,343 МПа. Здесь его температура повышается до 174 °С. После осевого компрессора воздух охлаждается в теплообменнике 3 до температуры 48 °С водой водооборотного цикла (ВОЦ), далее сжимается до давления 0,716 МПа в центробежном компрессоре 4. Компрессоры работают от привода газовой турбины 5. Они установлены на одном валу. После сжатия воздух разделяется на несколько потоков, которые направляются в абсорбционную и продувочную колонну 20, на смешивание с хвостовыми газами (ХГ) перед газовой

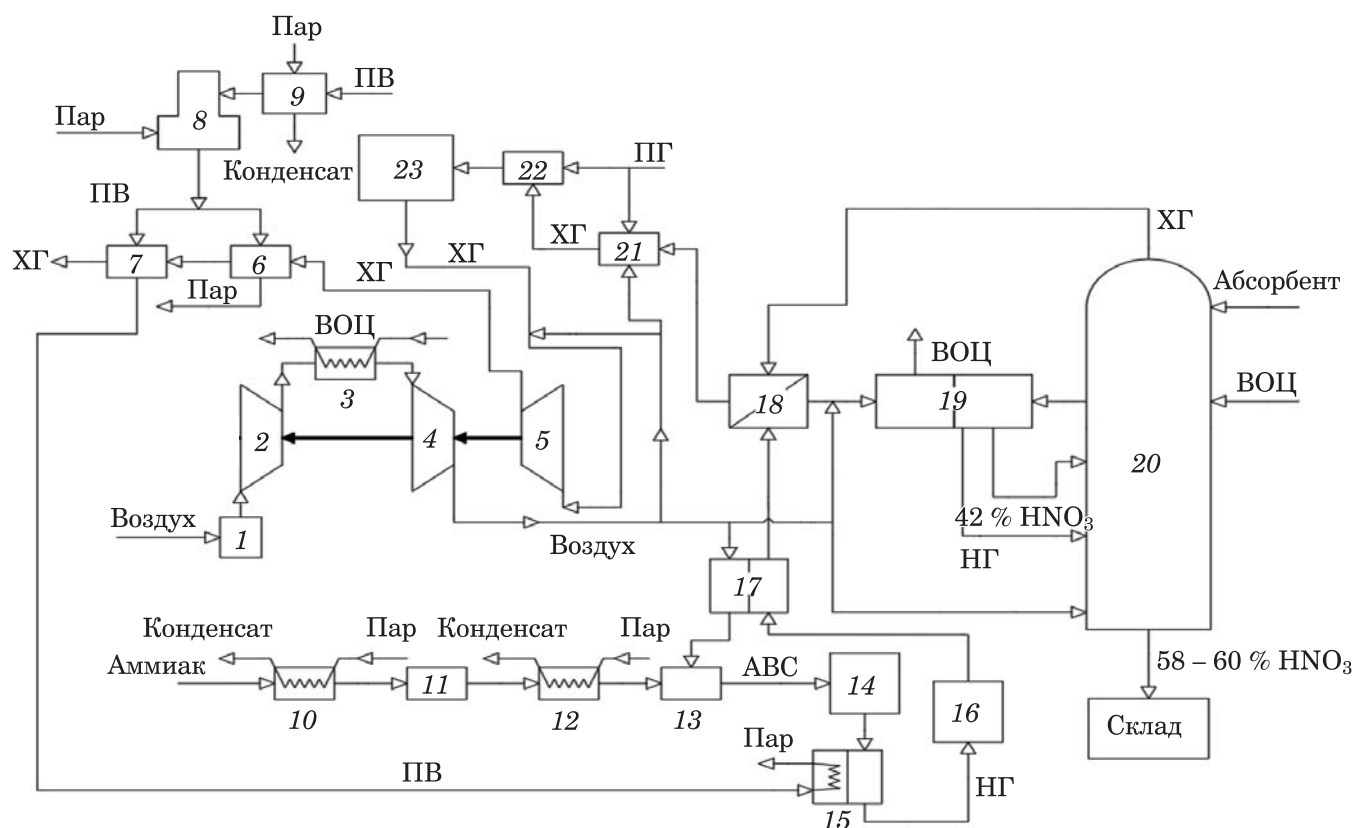


Рис. 1. Технологическая схема агрегата УКЛ-7 по производству НАК

1 — фильтр воздуха; 2 — осевой компрессор; 3 — охладитель воздуха; 4 — центробежный компрессор; 5 — газовая турбина; 6 — котёл-утилизатор; 7 — экономайзер; 8 — деаэратор; 9 — подогреватель питательной воды; 10 — испаритель аммиака; 11 — фильтр аммиака; 12 — подогреватель аммиака; 13 — фильтр и смеситель аммиачно-воздушной смеси; 14 — контактный аппарат конверсии аммиака; 15 — котёл-утилизатор; 16 — окислитель нитрозных газов; 17 — подогреватель воздуха нитрозным газом; 18 — подогреватель хвостовых газов; 19 — холодильники конденсаторы; 20 — абсорбционная колонна с продувочной колонной; 21 — камера сгорания; 22 — смеситель природного газа и хвостовых газов; 23 — контактный аппарат обезвреживания хвостовых газов; ПВ — питательная вода; ПГ — природный газ; ХГ — хвостовой газ; АВС — аммиачно-воздушная смесь; НГ — нитрозный газ; ВОЦ — водооборотный цикл

турбиной, на смешивание с нитрозным газом (НГ) перед холодильниками-конденсаторами (ХК) 19 и в камеру сгорания 21. Один из потоков воздуха направляется в смеситель с фильтром 13 для образования аммиачно-воздушной смеси (АВС). Аммиак в жидком состоянии с температурой 20–30 °С под давлением 1,0–1,2 МПа поступает в испаритель 10, где испаряется паром давлением 1,4–1,6 МПа и температурой 230–250 °С. Газообразный аммиак с температурой 30 °С после испарителя поступает в фильтр для очистки 11 и в подогреватель 12, где подогревается паром до 120–150 °С.

Газообразный аммиак смешивается с воздухом в смесителе с фильтром. После очистки АВС поступает в контактный аппарат 14, для конверсии смеси в НГ. НГ подается в ко-

тёл-утилизатор 15, отдавая теплоту химической реакции питательной воде (ПВ). Далее НГ поступает в окислитель 16, в подогреватель воздуха 17, в подогреватель ХГ 18 и в холодильники-конденсаторы. В ХК НГ охлаждается до 40–50 °С обратной водой из абсорбционной колонны. После ХК НГ поступает на нижнюю тарелку абсорбционной колонны, а образованная азотная кислота в ХК — на 4–10 тарелки колонны. Сверху в колонну подается абсорбент (вода) для поглощения оксидов азота. При этом выделяется теплота химической реакции. Её отводят из колонны обратной водой. Образовавшаяся азотная кислота направляется в продувочную колонну, где потоком воздуха из нее выдуваются непоглощенные оксиды азота, затем кислота поступает на склад. Из колонны выходят ХГ, содер-

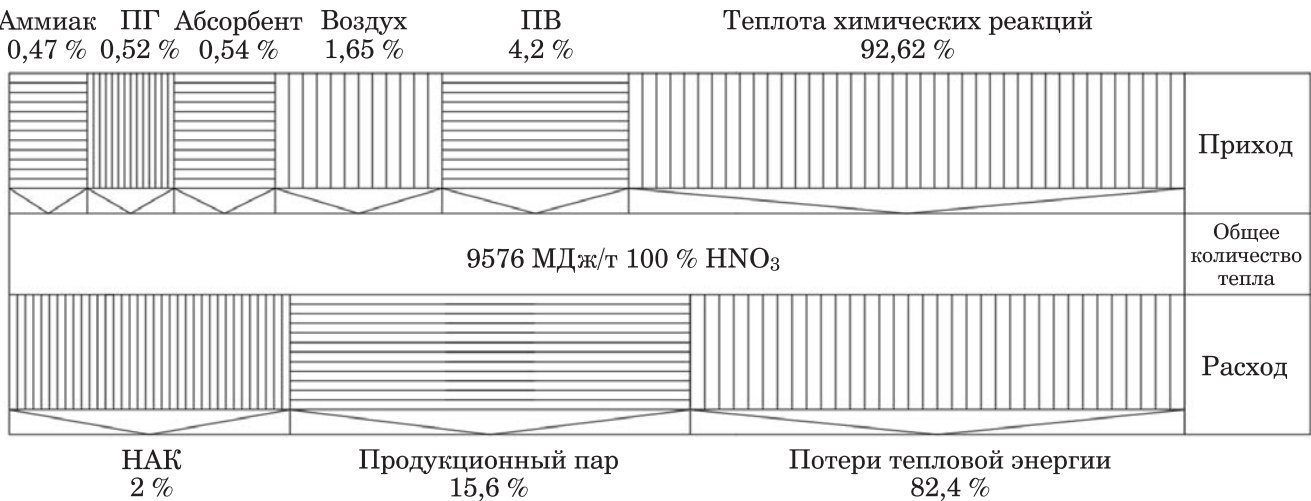


Рис. 2. Диаграмма теплового баланса технологической схемы УКЛ-7

жащие непоглощенные оксиды азота. Пройдя несколько подогревателей, ХГ направляются в камеру сгорания 21, где, смешиваясь с продуктами сгорания ПГ, поступают в смеситель 22, смешиваются с ПГ и затем поступают на каталитическую очистку в контактный аппарат 23.

После очистки ХГ поступают в газовую турбину 5. ПВ подогревается паром в подогревателе 9 перед деаэратором. После деаэратора нагретая вода разделяется на несколько потоков. Один поток поступает в котел-утилизатор 6, второй поток ПВ через экономайзер 7 — в котел-утилизатор 15 [2 – 7].

На рис. 2 представлена диаграмма теплового баланса производства НАК УКЛ-7.

Использование тепловых ВЭР

В [8] было предложено схемное решение для утилизации ВЭР в агрегате УКЛ-7 с целью выработки дополнительной электроэнергии в турбоагрегате в органическом цикле Ренкина (далее — ОЦР 1) и экономии производственного пара с последующим повышением производительности агрегата, т.е. увеличением производимого продукта — азотной кислоты.

В настоящей работе предлагается также использовать разработанную схему для утилизации ВЭР с целью выработки электроэнергии, но вместо повышения производительности агрегата показать возможность выработки еще большего количества дополнительной электроэнергии, используя сэкономленный производственный пар как тепловой источник для испарителя второго органического цикла Ренкина (далее — ОЦР 2), в котором и вырабатывается

дополнительная электроэнергия в турбоагрегате.

Следует отметить, что в настоящей работе были уточнены расходы аммиака в производстве и показатели КПД турбоагрегатов. Вследствие этого мощность турбоагрегата в [8] имеет более высокое значение, чем в данной работе.

Краткое описание схемы утилизации ВЭР

В ОЦР 1 предлагается использовать фреон R600a (изобутан). В качестве ВЭР используются теплота сжатого воздуха в теплообменнике 3 и теплота конденсации фреона для испарения аммиака в испарителе 10 (см. рис. 1). Схема представлена на рис. 3.

Воздух после осевого компрессора 1 температурой 174 °С поступает в теплообменник 3. В него же подается вода температурой 35 °С и нагревается воздухом до температуры 165 °С. Воздух охлаждается до 48 °С. Далее горячая вода поступает в испаритель фреона 4, нагревая и испаряя фреон R600a. Воздух температурой 48 °С направляется в центробежный компрессор 2 на сжатие до давления 0,716 МПа. После испарителя фреон R600a с давлением около 3,5 МПа поступает в расширительную турбину 5, где в процессе расширения давление фреона падает до 0,5 МПа. Полученная работа расходуется на привод электрогенератора 14, в котором вырабатывается электроэнергия мощностью 162 – 168 кВт. Расширенный газообразный фреон направляется в конденсатор 6, где конденсируется, испаряя при этом аммиак для производства. Жидкий фреон температурой 35 °С и давлением

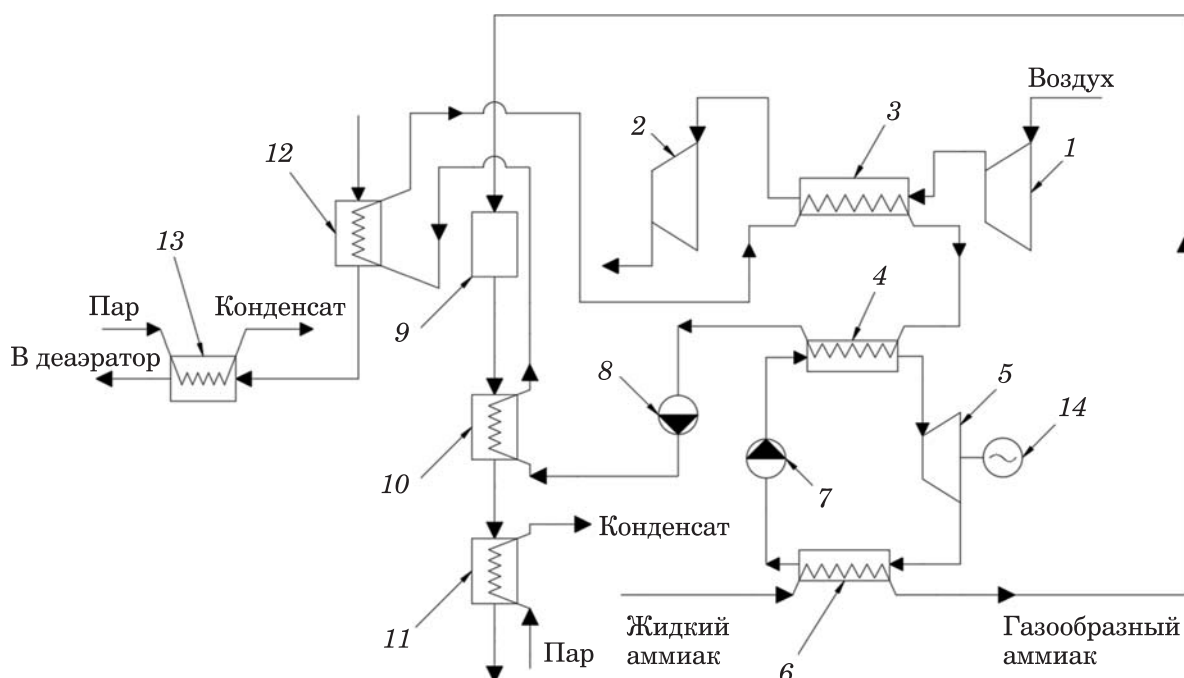


Рис. 3. Принципиальная схема использования тепловых ВЭР в производстве НАК на агрегате УКЛ-7

1 — осевой компрессор; 2 — центробежный компрессор; 3 — охладитель воздуха; 4 — испаритель изобутана; 5 — расширительная турбина; 6 — конденсатор изобутана; 7 — насос изобутана; 8 — насос горячей воды; 9 — фильтр аммиака; 10 — подогреватель аммиака; 11 — паровой подогреватель аммиака; 12 — подогреватель питательной воды; 13 — паровой подогреватель питательной воды; 14 — электрогенератор; ПВ — питательная вода

3,5 МПа после насоса 7 поступает в испаритель 4. Пар аммиака, пройдя фильтр 9, направляется в подогреватель 10 и подогреватель 11. В подогревателе 10 аммиак подогревается горячей водой, идущей из испарителя 4. В подогревателе 11 аммиак подогревается паром до 110 – 150 °С. Образованный конденсат пара направляется в сеть конденсата. За счёт подогрева аммиака горячей водой происходит экономия пара в теплообменнике 11. Горячая вода после теплообменника 10 поступает в подогреватель ПВ 12, нагревает ПВ, охлаждаясь до 35 °С. Вода возвращается в охладитель воздуха 3. ПВ после подогревателя 12 направляется в теплообменник 13, где догревается паром. Полученный конденсат пара поступает в сеть конденсата. Благодаря подогреву ПВ в теплообменнике 12 происходит экономия пара в подогревателе 13.

Использование сэкономленного пара для выработки дополнительной электроэнергии

Сэкономленный пар давлением 1,4 МПа и температурой 230 °С направляется в испаритель 15 ОЦР 2 (рис. 4). Пар отдает теплоту в испарителе фреону R600a и конденсируется.

Конденсат поступает в сеть конденсата. Газообразный изобутан под давлением около 3,5 МПа поступает в расширительную турбину 17. Полученная работа расширения передается электрогенератору 19. Его мощность составляет 256,4 – 257,2 кВт. Расширенный фреон с давлением около 0,5 МПа поступает в конденсатор 16, где охлаждается водой ВОЦ с градирней 20 и конденсируется. В насосе 18 жидкий изобутан сжимается до давления 3,5 МПа.

Зависимость параметров комплексного схемного решения от расходов аммиака и питательной воды

Проанализированы зависимости показателей мощности турбоагрегатов от расходов аммиака и питательной воды, так как в процессе производства данные показатели варьируются от минимальных до максимальных значений в зависимости от режимов работы агрегата, а также от других химико-технологических факторов.

В табл. 1 показаны минимальные и максимальные значения расходов питательной воды и аммиака [1].

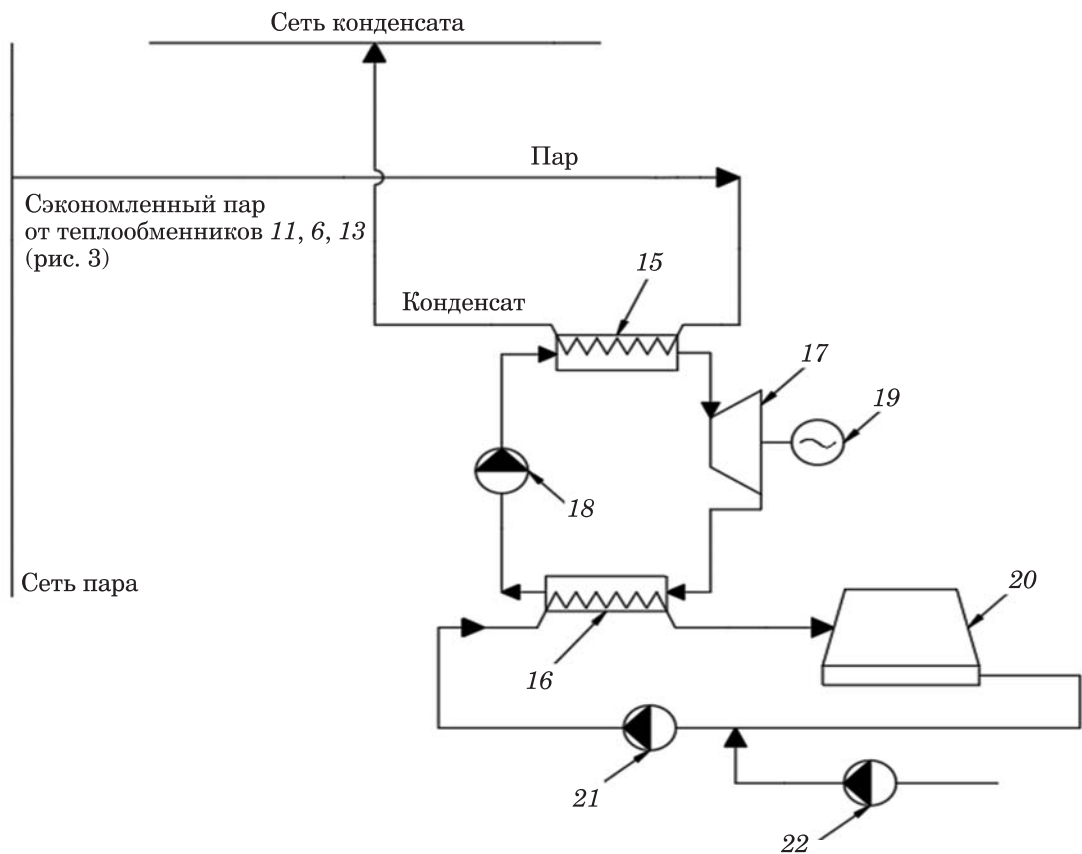


Рис. 4. Принципиальная схема использования сэкономленного пара для выработки дополнительной электроэнергии:

15 — испаритель; 16 — конденсатор; 17 — расширительная турбина; 18 — насос изобутана; 19 — электрогенератор; 20 — градирня; 21 — циркуляционный насос; 22 — подпиточный насос

В расчетах при минимальном и максимальном значениях расхода аммиака принимался и соответствующий показатель расхода питательной воды, так как чем больше расход аммиака, тем больше теплота химических реакций и тем больше производится продукционного пара в котлах-утилизаторах.

Зависимости выдаваемой мощности электрогенератором турбоагрегата в ОЦР 1 и в ОЦР 2 от расхода аммиака показаны на рис. 5 и 6.

Зависимость расхода сэкономленного пара, идущего в испаритель 15 (рис. 4) в ОЦР 2, от расхода аммиака показана на рис. 7.

Чем больше значение расхода аммиака, тем большее количество расхода изобутана требуется для испарения аммиака в конденсаторе 6 ОЦР 1 (рис. 3) при неизменных параметрах давления до и после расширения газа.

Так как с увеличением расхода аммиака происходит увеличение тепловой мощности, переданной от горячей воды в испарителе ОЦР 1, то происходит и уменьшение передан-

Таблица 1

Минимальные и максимальные показатели расходов питательной воды и аммиака в агрегате УКЛ-7

Показатель	Расход питательной воды $G_{\text{пв}}$, кг/с	Расход аммиака G_{NH_3} , кг/с
Минимальный	8	1,24
Максимальный	10,6	1,28

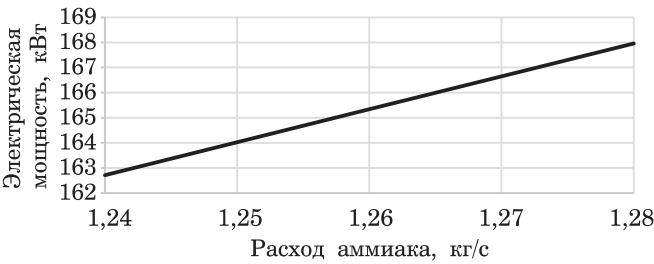


Рис. 5. График зависимости выдаваемой мощности электрогенератором от расхода аммиака в ОЦР 1

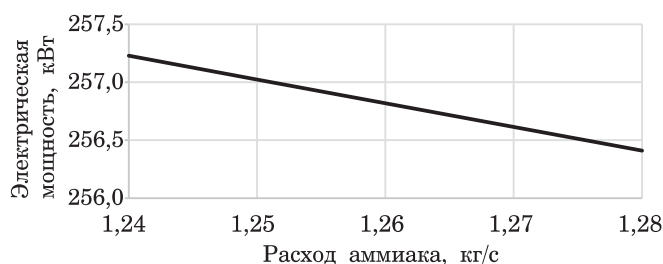


Рис. 6. График зависимости выдаваемой мощности электрогенератором от расхода аммиака в ОЦР 2

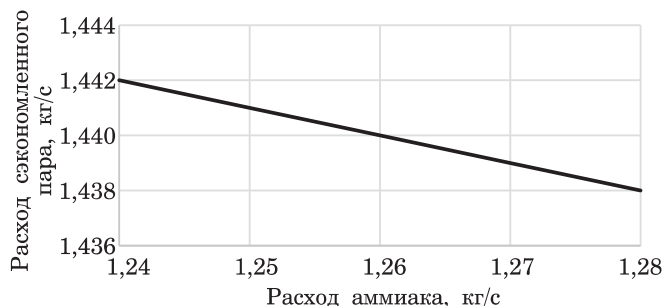


Рис. 7. График зависимости расхода сэкономленного пара от расхода аммиака в системе

ной тепловой мощности в теплообменниках 10 и 12. В связи с этим происходит и уменьшение расхода сэкономленного пара, идущего на испаритель в ОЦР 2, несмотря на увеличение расхода питательной воды. Как следствие, с увеличением расхода аммиака происходит и снижение вырабатываемой мощности в ОЦР 2 электрогенератором (см. рис. 6).

Сравнение разработанного комплексного решения и исходной системы агрегата УКЛ-7 по энергетическим и материальным показателям

Сравнение потребления электроэнергии и потерь тепловой энергии схемы агрегата УКЛ-7 в рассматриваемых узлах производства и разработанных схемных решений по утилизации ВЭР с целью выработки электроэнергии для агрегата УКЛ-7 представлено в табл. 2.

За счёт использования теплоты сжатого воздуха в разработанном решении удастся выработать около 1 309 493 кВт·ч в год электроэнергии в турбоагрегате ОЦР 1 и около 2 034 014 кВт·ч в год электроэнергии — в ОЦР 2. С учетом дополнительных затрат электроэнергии в разработанных схемных решениях, полезно выработанное количество электроэнергии составит около 1 680 149 кВт·ч

в год. В сравнении с исходной схемой агрегата УКЛ-7, где электроэнергия тратилась на охлаждение воздуха между компрессорами посредством ВОЦ в количестве около 1 290 300 кВт·ч в год, экономия электроэнергии с учетом дополнительно выработанной составляет около 2 970 449 кВт·ч в год.

За счет использования теплоты сжатого воздуха для выработки электроэнергии в ОЦР 1 и в ОЦР 2 происходит уменьшение выбросов теплоты в окружающую среду (ОС) посредством ВОЦ в агрегате УКЛ-7. Однако за счет охлаждения изобутана в ОЦР 2 сокращение выбросов тепловой энергии в ОС через градирни в агрегате УКЛ-7 составляет около 6 486 Гкал/год.

Выводы

1. Разработана новая схема утилизации ВЭР на основе ОЦР с целью выработки электроэнергии в агрегате УКЛ-7 в производстве неконцентрированной азотной кислоты. Вторичными энергоресурсами являются теплота сжатого воздуха при охлаждении между компрессорами и теплота конденсации фреона при испарении аммиака. Теплота сжатого воздуха используется для выработки электроэнергии в ОЦР 1, а также с целью экономии продукционного пара, который, в свою очередь, поступает в испаритель ОЦР 2, где также происходит выработка электроэнергии.

2. Результаты расчетов показывают, что при использовании теплоты сжатого воздуха и теплоты, выделяемой в конденсаторе ОЦР 1, возможно выработать около 1 309 493 кВт·ч в год электроэнергии и сэкономить продукционный пар в количестве около 41 057 т/год, идущего в испаритель ОЦР 2. В ОЦР 2 происходит выработка электроэнергии в количестве около 2 034 014 кВт·ч в год. С учетом затрат электроэнергии на собственные нужды разработанной схемы дополнительно выработанное количество электроэнергии составляет около 1 680 149 кВт·ч в год.

3. За счет рекуперации тепловой энергии сжатого воздуха для выработки электроэнергии в системах ОЦР 1 и ОЦР 2 происходит снижение выбросов теплоты в окружающую среду посредством ВОЦ в агрегате УКЛ-7 на 6486 Гкал/год. Количество тепловой энергии, непосредственно перешедшей в электрическую энергию, составляет около 1445 Гкал/год.

Таблица 2

Сравнение потребления электроэнергии и тепловой энергии в агрегате УКЛ-7 без утилизации и при утилизации ВЭР

Агрегат УКЛ-7	Агрегат УКЛ-7 с разработанными схемными решениями (усредненные показатели)
Потребление электроэнергии	
Потребление электроэнергии насосом ВОЦ охлаждения воздуха, кВт·ч в год	Потребление электроэнергии насосом 8, кВт·ч в год
1 290 300	123 552
—	Потребление электроэнергии насосом 7, кВт·ч в год
	261 360
	Потребление электроэнергии насосом 18, кВт·ч в год
	405 979
	Потребление электроэнергии насосом 21, кВт·ч в год
	855 360
	Потребление электроэнергии насосом 22, кВт·ч в год
Суммарное потребление электроэнергии, кВт·ч в год	
1 290 300	1 663 358
Выработка дополнительной электроэнергии в турбоагрегате в ОЦР 1 в новой схеме, кВт·ч в год	
1 309 493	
Выработка дополнительной электроэнергии в турбоагрегате в ОЦР 2 в новой схеме, кВт·ч в год	
2 034 014	
Полезная выработанная электроэнергия в ОЦР 1 и в ОЦР 2, кВт·ч в год	
1 680 149	
Экономия электроэнергии, по сравнению с базовой схемой (с учетом полезно выработанной), кВт·ч в год	
2 970 449	
Потери тепловой энергии	
Потери в окружающую среду посредством ВОЦ через градирню при охлаждении воздуха между компрессорами, Гкал/год	Потери в окружающую среду посредством ВОЦ через градирню при охлаждении изобутана в ОЦР 2, Гкал/год
22 334	15 848
Сокращение потерь теплоты посредством ВОЦ через градирню, Гкал/год	
6486	
Количество тепловой энергии, перешедшее непосредственно в полезную электрическую энергию, Гкал/год	
1445	

4. По отношению к общему тепловому балансу системы, количество утилизированной тепловой энергии невелико — порядка 0,5 % от общего прихода тепла в систему. Несмотря на такие показатели, удается с помощью ОЦР не только снизить электропотребление предприятия, но и вырабатывать электроэнергию как для собственных нужд агрегата, так и для сети всего производства.

Список литературы

1. **Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС-2-2019** // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — М., Бюро НДТ. 2019.
2. **Атрошенко, В. И. Технология азотной кислоты. Изд. 3-е, перераб. и доп.** / В. И. Атрошенко, С. И. Каргин. — М.: Химия. 1970. — 496 с.
3. **Справочник азотчика. Производство разбавленной и концентрированной азотной кислоты: Производство азотных удобрений: Материалы, компрессоры и газгольдеры производств азотной кислоты и удобрений: Энергоснабжение производств связанного азота и органических продуктов: Техника безопасности производств связанного азота и органических продуктов.** 2-е изд. перераб. — М.: Химия. 1987. — 464 с.
4. **Пат. 95370 Российская Федерация, МПК F 04 D 29/00.** Газотурбинная установка «Салют» для производства азотной кислоты по схеме УКЛ-7 / В. Е. Беляев, С. О. Беляева, В. С. Багдасарян, С. В. Багдасарян; заявитель и патентообладатель В. Е. Беляев, С. О. Беляева, В. С. Багдасарян, С. В. Багдасарян. — № 2009126006/22; заявл. 08.07.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18.
5. **Пат. 2220097 Российская Федерация, МПК C 01 B 21/26, 21/38.** Способ утилизации тепла в процессе производства азотной кислоты / М. Л. Ферд, А. Ф. Рубинчик, С. М. Кононов, В. Я. Кайль; заявитель и патентообладатель М. Л. Ферд, А. Ф. Рубинчик, С. М. Кононов, В. Я. Кайль. — № 2002105937/15; заявл. 06.03.2002; опубл. 27.12.2003, Бюл. № 36.
6. **Пат. 2248322 Российская Федерация, МПК C 01 B 21/40, 21/26.** Способ производства азотной кислоты и агрегат для производства азотной кислоты / Б. П. Шайдак, Б. И. Юдовин, Г. И. Богорадовский, Л. Г. Кореневский, В. В. Поярков, В. И. Титенский, М. Л. Ферд, Н. В. Юргенсон; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Научно-исследовательский конструкторско-технологический институт турбокомпрессоростроения». — № 2003138251/15; заявл. 29.12.2003; опубл. 20.03.2005, Бюл. № 8.
7. **Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности** / Под ред. В. М. Олевского. — М.: Химия, 1985. — 400 с.
8. **Шелгинский, Е. А. Утилизация вторичных энергоресурсов в агрегате азотной кислоты с повышением производительности** / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский, А. Я. Шелгинский // Промышленная энергетика. — 2022. — № 7. — С. 10 – 17.

References

1. **Proizvodstvo ammiaka, mineral'nykh udobrenii i neorganicheskikh kislot. Informatsionno-tehnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS-2 – 2019** (Production of ammonia, mineral fertilizers and inorganic acids. Information and technical reference book on the best available technologies ITS-2-2019), Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, Moscow, Bureau of NDT, 2019.
2. **Atroshchenko V. I., Kargin S. I. Tekhnologiya azotnoi kisloty** (Nitric acid technology), Moscow, Chemistry, 1970, 496 p.
3. **Spravochnik azotchika. Proizvodstvo razbavlennoi i kontsentrirrovannoi azotnoi kisloty: Proizvodstvo azotnykh udobrenii: Materialy, kompressory i gazgol'dery proizvodstv azotnoi kisloty i udobrenii: Energosnabzhenie proizvodstv svyazannogo azota i organicheskikh produktov: Tekhnika bezopasnosti proizvodstv svyazannogo azota i organicheskikh produktov** (Nitrogen specialist's reference book. Production of dilute and concentrated nitric acid: Production of nitrogen fertilizers: Materials, compressors and gas holders for production of nitric acid and fertilizers: Energy supply for production of fixed nitrogen and organic products: Safety precautions for production of fixed nitrogen and organic products), 2nd ed. Reworked, Moscow, Chemistry, 1987, 464 p.
4. **Belyaev V. E., Belyaeva S. O., Bagdasaryan V. S., Baghdasaryan S. V. Patent 95370 Rossiiskaya Federatsiya, MPK F 04 D 29/00.** Gazoturbinnaya ustanovka «Salyut» dlya proizvodstva azotnoi kisloty po skheme UKL-7 (Patent 95370 Russian Federation, IPC F 04 D 29/00. Gas turbine plant «Salyut» for the production of nitric acid according to the UKL-7 scheme), No. 2009126006/22, claimed 08.07.2009, publ. 27.06.2010, Bul. No. 18.
5. **Ferd M. L., Rubinchik A. F., Kononov S. M., Kyil V. Ya. Patent 2220097 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C 01 B 21/26, 21/38.** Sposob utilizatsii tepla v protsesse proizvodstva azotnoi kisloty (Patent 2220097 Russian Federation, IPC C 01 B 21/26, 21/38. Method of heat recovery in the process of nitric acid production), No. 2002105937/15, claimed 06.03.2002, publ. 27.12.2003, Bul. No. 36.
6. **Shaidak B. P., Yudovin B. I., Bogoradovsky G. I., Korenevsky L. G., Poyarkov V. V., Titensky V. I., Ferd M. L., Yurgenson N. V. Patent 2248322 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C 01 B 21/40, 21/26.** Sposob proizvodstva azotnoi kisloty i agregat dlya proizvodstva azotnoi kisloty (Patent 2248322 Russian Federation, IPC C 01 B 21/40, 21/26. Method for the production of nitric acid and a unit for the production of nitric acid), Closed joint-stock company «Research Design and Technological Institute of Turbo-compressor Engineering», No. 2003138251/15, claimed 29.12.2003, publ. 20.03.2005, Bul. No. 8.
7. **Olevsky V. M. Proizvodstvo azotnoi kisloty v agregatakh bol'noi edinichnoi moshchnosti** (Production of nitric acid in units of high unit capacity), Moscow, Chemistry, 1985, 400 p.
8. **Shelginsky E. A., Yavorovsky Yu. V., Shelginsky A. Ya. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 2022, No. 7, pp. 10 – 17.

The use of Organic Rankine Cycle in the production of non-concentrated nitric acid

Shelginskii E. A., Yavorovskii Yu. V., Shelginskii A. Ya.

A new method for recycling secondary energy resources in the production of non-concentrated nitric acid in a UKL-7 unit is considered. The heat energy to be utilized is the heat of compressed air after an axial compressor, which is released into the environment through a water circulation cycle with a cooling tower. The heat of compressed air is used for heating and evaporation of freon R600a in a Rankine organic cycle evaporator to heat feed water in front of a deaerator instead of the production steam. Instead of the steam heat, the heat of freon condensation in a condenser of the cycle is used to evaporate ammonia in the technological cycle. The saved production steam is used as a source of heat in an additional organic Rankine cycle to produce even more electricity. However, to cool isobutane in the second cycle, water of the water circulation cycle with a cooling tower is used, which contributes to the release of thermal energy into the environment. It is shown that when using the heat of compressed air, the electricity generated in ORC amounts to 1,309,493 kWh per year, the amount of steam thus saved being 41 057 tons per year, whereas the amount of electricity generated in the additional organic Rankine cycle is 2,034,014 kWh per year. It appeared possible to reduce the energy consumption from an external source by about 1,680,149 kWh per year taking into account the electricity for balance-of-plant needs generated in ORC.

Keywords: energy resources, electricity, steam, Organic Rankine Cycle, nitric acid.

DOI: 10.34831/EP.2023.48.39.003

Двукратный промежуточный перегрев водяного пара в одноконтурном котле-утилизаторе парогазовой установки

Кудинов А. А., Зиганшина С. К., доктора техн. наук

Хусаинов К. Р. канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Для повышения эффективности парогазовой установки предложено в контуре высокого давления котла-утилизатора выполнять генерацию и перегрев суммарного потока газа, направляемого в ЦВД паровой турбины, а в контуре низкого давления после водяного экономайзера высокого давления последовательно по ходу газов установить две теплообменные поверхности для промежуточного перегрева водяного пара, отработавшего соответственно в цилиндре высокого и среднего давления паровой турбины, и газовый подогреватель исходной воды. Выполнен анализ работы парогазовой установки на примере ПГУ-450 без использования и с использованием двухступенчатого промежуточного перегрева водяного пара. Расчетным путем установлено, что двукратный промежуточный перегрев водяного пара позволяет снизить удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии на 4,16 % (с 242,32 до 232,25 г/(кВт·ч)).

Ключевые слова: газотурбинная установка, котел-утилизатор, паровая турбина, парогазовая установка, промежуточный пароперегреватель, исходная вода, газовый подогреватель, тепловой расчет, удельный расход условного топлива, эффективность.

Наибольшее распространение получили парогазовые установки утилизационного типа (ПГУ-У) с двухконтурным котлом-утилизатором (КУ), в котором генерируется водяной пар двух параметров — высокого и низкого давления [1 – 3]. Поток водяного пара высокого давления подается в цилиндр высокого давления (ЦВД) паровой турбины, а в цилиндр низкого давления (ЦНД) — суммарный поток пара отработавшего в ЦВД и сгенерированного в контуре низкого давления котла-утилизатора, что обуславливает создание специальной конструкции паровой турбины с уменьшенным ЦВД и повышенным расходом пара в ЦНД. Кроме того, наличие двух контуров генерации водяного пара с двумя питательными насосами и барабанами высокого и низкого давления усложняет конструкцию котла-утилизатора [4 – 6]. При этом КПД паровой турбины не достигает больших значений как из-за отсутствия системы регенеративного подогрева турбинного конденсата и питательной воды и невысоких начальных параметров свежего пара, так и за счет пониженных расходов пара в ЦВД, а также необходимости устройства в ряде случаев сепаратора влаги [7 – 9].

Предлагается упростить конструкцию двухконтурного котла-утилизатора ПГУ путем генерации и перегрева суммарного потока водяного пара, направляемого в ЦВД, в контуре высокого давления, а в контуре низкого давле-

ния (после водяного экономайзера высокого давления) вместо испарителя и экономайзера низкого давления последовательно по ходу газов установить две теплообменные поверхности ПП-1 и ПП-2 для промежуточного перегрева водяного пара, отработавшего в цилиндре высокого и среднего давления (ЦСД) турбины. Таким образом, парогазовая установка будет состоять из газотурбинной установки, трехцилиндровой паровой турбины и одноконтурного по генерации водяного пара котла-утилизатора. При этом в котле-утилизаторе по ходу газов будут расположены пароперегреватель высокого давления (ПЕВД), испаритель высокого давления (ИВД) и экономайзер высокого давления (ЭКВД), две поверхности промежуточного пароперегревателя (ПП-1 и ПП-2) и газовый подогреватель конденсата (ГПК). В хвостовой части котла-утилизатора для снижения температуры уходящих газов и повышения КПД желательно разместить теплообменную поверхность для нагрева сетевой воды или исходной воды перед подачей ее на химводоочистку [10]. Схема ПГУ представлена на рис. 1.

Эффективность предлагаемого способа совершенствования ПГУ рассмотрим на примере ПГУ-450, установленной на Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга. В состав рассматриваемой ПГУ входят две ГТУ Siemens V94.2 номинальной мощностью по 157 МВт, два двухконтурных котла-утилизатора П-90 и паровая

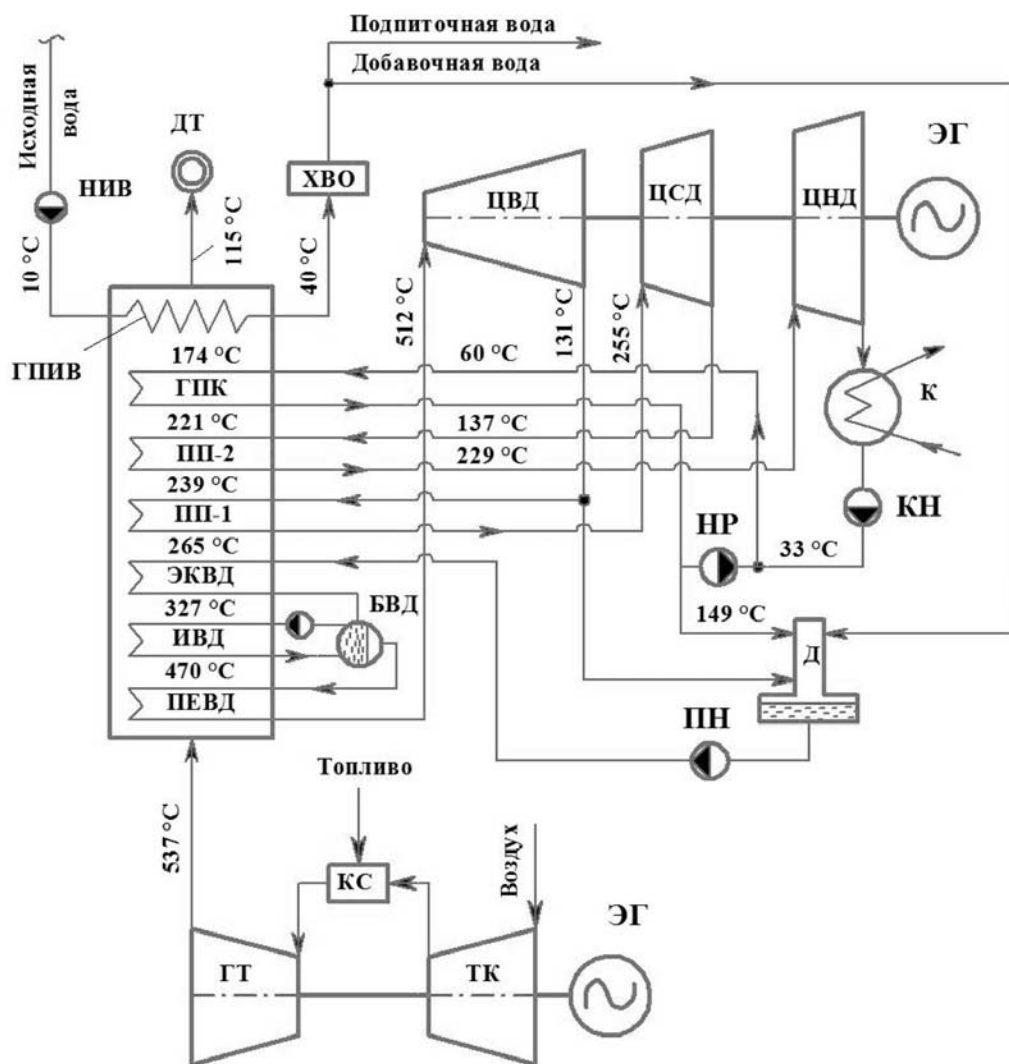


Рис. 1. Тепловая схема парогазовой установки ПГУ-450:

ТК — турбокомпрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; ЭГ — электрогенератор; ЦВД, ЦСД и ЦНД — цилиндры высокого, среднего и низкого давления паровой турбины; К — конденсатор; Д — деаэратор; ПЕВД, ИВД и ЭКВД — пароперегреватель, испаритель и водяной экономайзер высокого давления; ПП-1 и ПП-2 — промежуточные пароперегреватели первой и второй ступеней; ГПК и ГПИВ — газовые подогреватели конденсата и исходной воды; БВД — барабан высокого давления; КН и ПН — конденсатный и питательный насосы; НР — насос рециркуляции; НИВ — насос исходной воды; ХВО — химводоочистка; ДТ — дымовая труба

турбина Т-150-8. В парогазовом энергоблоке ПГУ-450 предусмотрен отпуск тепловой энергии с горячей сетевой водой, нагреваемой в сетевых подогревателях, питаемых отборным паром из турбины Т-150-8 [2, 6].

Парогазовая установка при реализации двухступенчатого промежуточного перегрева водяного пара в котле-утилизаторе функционирует следующим образом (см. рис. 1). Наружный атмосферный воздух поступает в турбокомпрессор ГТУ, где сжимается до необходимого давления. Далее часть циклового воздуха поступает в камеру сгорания ГТУ, куда подается органическое топливо. Продукты сгора-

ния, образовавшиеся в процессе горения топлива, смешиваются с вторичным воздухом, образовавшиеся газы направляют в газовую турбину, где осуществляется процесс их расширения и совершается работа, затрачиваемая на привод электрического генератора и турбокомпрессора. Отработавшие в турбине газы отводятся в паровой котел-утилизатор, последовательно проходят через его поверхности нагрева: пароперегреватель, испаритель и водяной экономайзер высокого давления (ПЕВД, ИВД, ЭКВД); первую и вторую ступени промежуточного пароперегревателя (ПП-1, ПП-2); газовый подогреватель конденсата

(ГПК); газовый подогреватель исходной воды (ГПИВ). Затем охлаждаются и отводятся в атмосферу.

В водяном экономайзере высокого давления (ЭКВД) питательная вода подогревается до температуры, близкой к температуре насыщения в испарительном контуре котла-утилизатора. В ИВД осуществляется процесс генерации насыщенного водяного пара, который отделяется от воды в барабане высокого давления БВД и далее направляется в пароперегреватель высокого давления ПЕВД. Перегретый в ПЕВД до температуры 512 °С водяной пар поступает в ЦВД турбины, в котором расширяется до давления $p_{\text{цвд}}'' = 0,25$ МПа. Отработавший пар при температуре $t_{\text{цвд}} = 131$ °С отводится на промежуточный перегрев в ПП-1, в котором перегревается до 255 °С. Вторично перегретый водяной пар направляется в проточную часть ЦСД турбины, где расширяется до давления $p_{\text{цсд}}'' = 0,07$ МПа и далее при температуре 137 °С подается во вторую ступень ПП-2 вторичного пароперегревателя, где перегревается до 229 °С. Завершается процесс расширения повторно перегретого в ПП-2 водяного пара в ЦНД турбины. Отработавший в турбине водяной пар отводится в конденсатор. Образовавшийся турбинный конденсат подается конденсатным насосом в ГПК котла-утилизатора, подогревается и направляется в деаэратор.

С целью определения эффективности использования усовершенствованной схемы ПГУ были проведены тепловой расчет и сравнительный анализ работы установки с двукратным промежуточным перегревом водяного пара в котле-утилизаторе и при его отсутствии с использованием методики, изложенной в [6, 11].

Тепловой расчет ПГУ-450 был выполнен при следующих исходных данных: КПД $\eta_{\text{гту}} = 34,5$ %, мощность ГТУ $N_{\text{гту}} = 157,9$ МВт; начальная и конечная температура газов: $t_{\text{гт}}' = 1060$ °С и $t_{\text{гт}}'' = 537$ °С; расход уходящих газов ГТУ $G_{\text{г}} = 509$ кг/с; давление перегретого пара высокого давления $p_0^{\text{ВД}} = 8,0$ МПа; внутренний относительный КПД паровой турбины ГТУ $\eta_{0i} = 0,85$; электромеханический КПД турбины $\eta_{\text{эм}} = 0,975$; давление в конденсаторе турбины $p_{\text{к}} = 5$ кПа; давление в деаэраторе $p_{\text{д}} = 0,6$ МПа; температурные напоры на горячей и холодной сторонах поверхностей нагрева КУ $\delta t = 25$ °С недогрева до температуры насыщения $\Delta t = 10$ °С. Расчет выполнен для

работы ПГУ в конденсационном режиме при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = +10$ °С.

Из уравнения теплового баланса для пароперегревателя высокого давления определяется паропроизводительность котла-утилизатора:

$$D_0 = \frac{G_{\text{г}}(h_{\text{гт}}'' - h_{\text{ивд}}'')}{h_0 - h_{\text{п.в}}}, \quad (1)$$

где h_0 — энтальпия перегретого пара, кДж/кг; $h_{\text{гт}}''$ — энтальпия отработавших в турбине газов, кДж/кг; $h_{\text{ивд}}''$ — энтальпия газов после испарителя высокого давления, кДж/кг; $h_{\text{п.в}}$ — энтальпия нагретой в ЭКВД питательной воды, кДж/кг.

Из уравнений теплового баланса для пароперегревателя и водяного экономайзера высоких параметров определяются энтальпии газов на выходе из ПЕВД и ЭКВД:

$$h_{\text{певд}}'' = h_{\text{гт}}'' - \frac{D_0(h_0 - h_s'')}{G_{\text{г}}}, \quad (2)$$

$$h_{\text{эквд}}'' = h_{\text{ивд}}'' - \frac{D_0(h_{\text{п.в}} - h_{\text{д}})}{G_{\text{г}}}, \quad (3)$$

где h_s'' — энтальпия насыщенного пара в испарительном контуре высокого давления (ВД), кДж/кг; $h_{\text{ивд}}''$ — энтальпия газов после испарителя КУ, кДж/кг; $h_{\text{д}}$ и $h_{\text{п.в}}$ — энтальпии питательной воды на входе в ЭКВД КУ и на выходе из него, кДж/кг.

На рис. 2 изображен цикл Брайтона – Ренкина ПГУ-450 с двукратным промперегревом водяного пара и указанием характерных точек процессов [6].

Внутренние мощности ЦВД, ЦСД и ЦНД паровой турбины определяются по формулам:

$$N_i^{\text{цвд}} = 2D_0[(h_0 - h_{1(\text{ид})})\eta_{0i}]; \quad (4)$$

$$N_i^{\text{цсд}} = 2D_0[(h_2 - h_{3(\text{ид})})\eta_{0i}]; \quad (5)$$

$$N_i^{\text{цнд}} = 2D_0[(h_4 - h_{5(\text{ид})})\eta_{0i}], \quad (6)$$

где $h_{1(\text{ид})}$, $h_{3(\text{ид})}$, $h_{5(\text{ид})}$ — энтальпии водяного пара в конце идеальных процессов расширения в ЦВД, ЦСД и ЦНД турбины, кДж/кг; h_2 , h_4 — энтальпии вторично перегретого водяного пара на выходе из ПП-1 и ПП-2 (см. рис. 2).

Энтальпии газов на выходе из первой и второй ступеней промежуточного паропере-

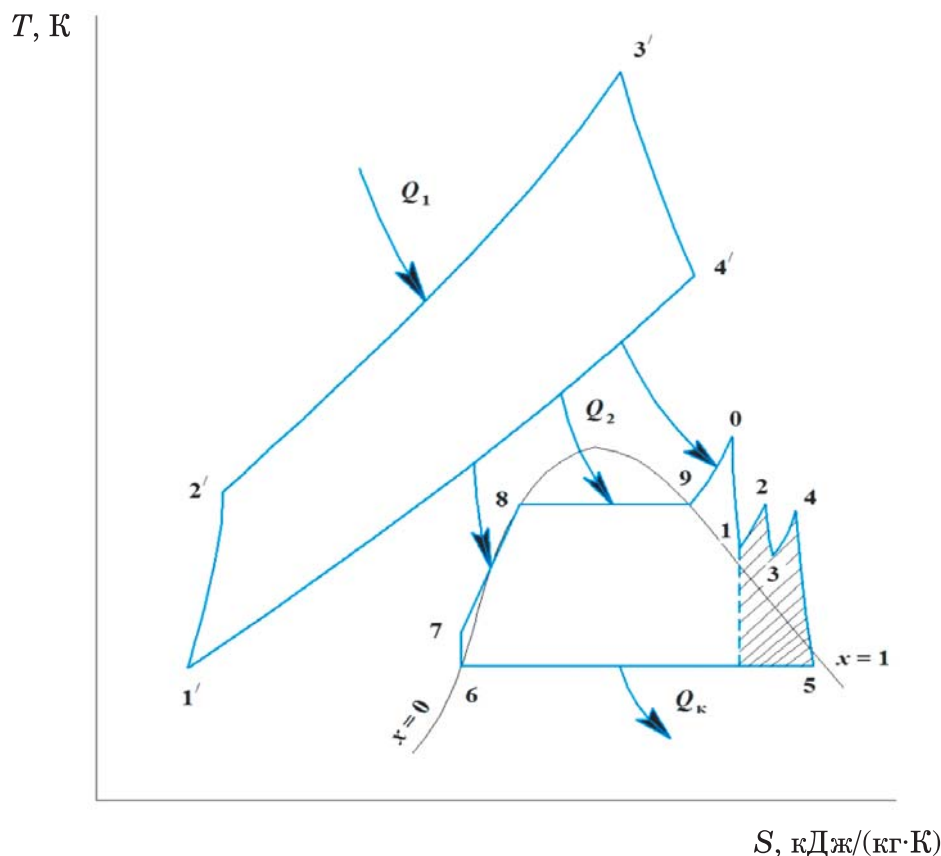


Рис. 2. Цикл Брайтона – Ренкина ПГУ с двукратным вторичным перегревом водяного пара

гревателя определяются из уравнений теплового баланса:

$$h''_{\text{пп-1}} = h''_{\text{эквд}} - \frac{D_0(h_2 - h_1)}{G_r}; \quad (7)$$

$$h''_{\text{пп-2}} = h''_{\text{пп-1}} - \frac{D_0(h_4 - h_3)}{G_r}; \quad (8)$$

где h_1 и h_3 — энтальпии водяного пара, обработавшего в ЦВД и ЦСД турбины (см. рис. 2).

По энтальпиям $h''_{\text{пп-1}}$ и $h''_{\text{пп-2}}$ определяются температуры уходящих газов ГТУ: $t''_{\text{пп-1}}$ и $t''_{\text{пп-2}}$.

Температура вторично перегретого водяного пара на выходе из первой ступени промежуточного пароперегревателя определяется с учетом температуры газов на выходе из ЭКВД $h''_{\text{эквд}}$ и температурного напора на горячей стороне ПП-1 $\delta t_{\text{пп-1}}$:

$$t_2 = t''_{\text{эк}} - \delta t_{\text{пп}}. \quad (9)$$

Аналогичным образом определяется температура вторично перегретого водяного пара на

выходе из второй ступени промежуточного пароперегревателя:

$$t_4 = t''_{\text{пп-1}} - \delta t_{\text{пп}}. \quad (10)$$

Мощность и КПД паровой турбины рассчитываются по формулам:

$$N_{\text{пт}} = (N_i^{\text{цвд}} + N_i^{\text{цсд}} + N_i^{\text{цнд}})\eta_{\text{эм}}; \quad (11)$$

$$\eta_{\text{пт}} = \frac{N_{\text{пт}}}{2Q_{\text{ку}}}, \quad (12)$$

где $Q_{\text{ку}} = G_r(h''_{\text{гт}} - h''_{\text{гпк}})$ — тепловая нагрузка котла-утилизатора, кВт.

Через $h''_{\text{гпк}}$ обозначена энтальпия газов на выходе из газового подогревателя конденсата, определяемая по формуле

$$h''_{\text{гпк}} = h''_{\text{пп-2}} - \frac{G_{\text{гпк}}(h_{\text{к2}} - h_{\text{к1}})}{G_r}, \quad (13)$$

где $G_{\text{гпк}} = D_0 + G_p$ — расход турбинного конденсата через ГПК котла-утилизатора, кг/с; G_p — расход конденсата на рециркуляцию, кг/с; $h_{\text{к1}}$, $h_{\text{к2}}$ — энтальпии турбинного конден-



Figure 1 consists of two graphs, (a) and (b), showing the dependence of enthalpy h (kJ/kg) on entropy S (kJ/(kg·K)) for a steam turbine cycle. Both graphs include isobars for 8.0 MPa, 0.65 MPa, 0.25 MPa, and 0.005 MPa, and a saturation curve.

Graph (a) shows a cycle with a condenser pressure of 0.005 MPa and a reheat pressure of 0.65 MPa. Key points on the h - S axis are labeled with their respective values: 3429.0, 2872.0, 2773.7, 2249.49, 2136.9, 6.7644, 7.0089, 7.3768, 8.07153, and 8.82507.

Graph (b) shows a cycle with a condenser pressure of 0.005 MPa and a reheat pressure of 0.25 MPa. Key points on the h - S axis are labeled with their respective values: 3429.0, 2979.1, 2725.29, 2713.5, 2601.1, 2545.45, 2477.4, 6.7644, 7.0742, 7.6227, 7.7223, 8.1215, 8.3439, 0.9471, 0.9937, and 0.9656.

$$\eta_{\text{Ky}} = \frac{h''_{\text{IT}} - h''_{\text{KY}}}{h''_{\text{IT}} - h''_{\text{HB}}}. \quad (14)$$

Таблица 1

Расчетные характеристики ПГУ-450 с двукратным вторичным перегревом водяного пара в КУ и без промперегрева

Параметр	Значение параметра	
	Без использования промежуточного перегрева водяного пара	С использованием двукратного промежуточного перегрева водяного пара
Мощность ГТУ, МВт	157,9	157,9
КПД ГТУ, %	34,5	34,5
Мощность паровой турбины, МВт	151,79	142,59
КПД паровой турбины, %	33,02	35,01
КПД котла-утилизатора, %	78,28	80,48
Мощность ПГУ, МВт	467,59	458,4
КПД ПГУ, %	50,76	52,96
Удельный расход условного топлива, г/(кВт·ч)	242,32	232,25
Значения температур, °С, газов по поверхностям нагрева котла-утилизатора		
После ГТУ	537	537
После ПЕВД	470	470
После ИВД	327	327
После ЭКВД	265	265
После ПЕНД	259	—
После ИНД	191	—
После ПП-1	—	239
После ПП-2	—	221
После ГПК	126	174
После ГПИВ	—	115

Для определения экономичности ПГУ-450 использовалась формула [5, 8]:

$$\eta_{пгу} = \eta_{гту} + (1 - \eta_{гту})\eta_{ку} \eta_{пт}. \tag{15}$$

На рис. 3 и 4 приведены тепловая диаграмма котла-утилизатора и процесс расширения водяного пара в проточной части паровой турбины. На тепловой диаграмме на оси абсцисс показаны значения тепловых нагрузок поверхностей нагрева котла-утилизатора. В частности, тепловая мощность газового подогревателя исходной воды составила 32,66 МВт (см. рис. 3, б).

В табл. 1 приведены основные расчетные характеристики парогазовой установки ПГУ-450 с использованием и без использования двукратного промежуточного перегрева водяного пара в котле-утилизаторе. Они были получены в результате теплового расчета, проведенного при условии работы парогазового энергетического блока в конденсационном режиме — при отключенных сетевых подогревателях (на рис. 1 не показаны).

В рамках данной работы проведен анализ влияния давлений водяного пара, отработавшего в ЦВД с ЦСД турбины $p_{цвд}$ и $p_{цсд}$ и от-

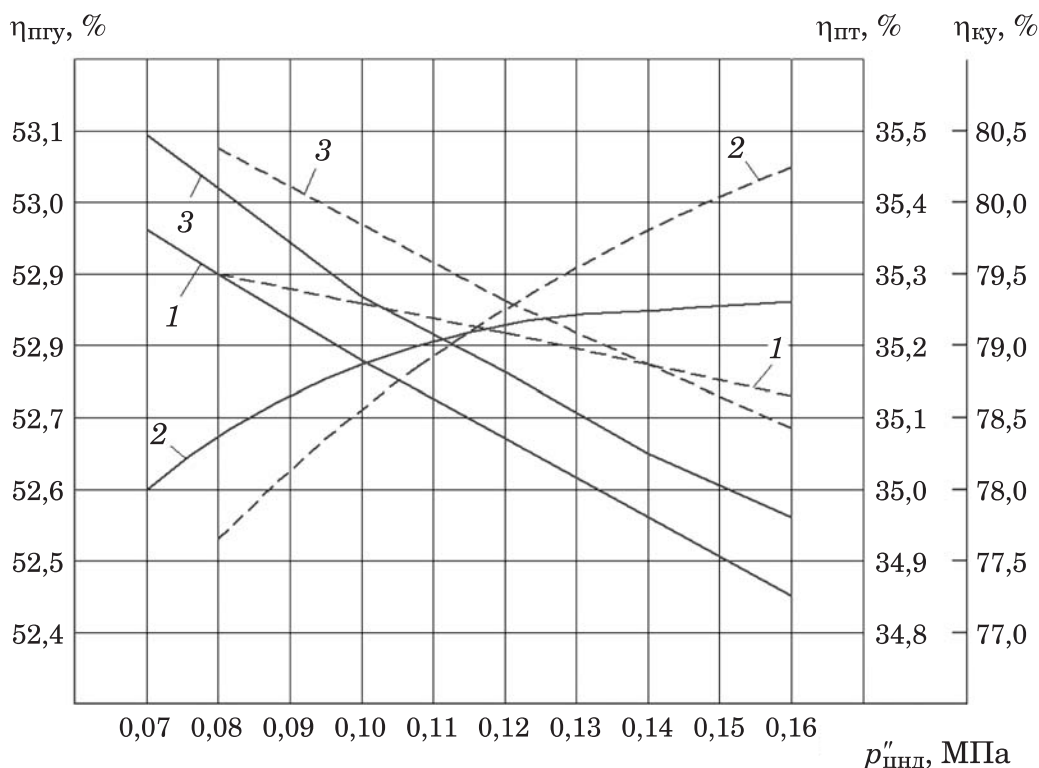


Рис. 5. Влияние давления отработавшего в ЦСД турбины водяного пара $p''_{\text{цсд}}$ на экономичность парогазового блока ПГУ-450 при давлениях $p_{\text{цвд}} = 0,25$ МПа (сплошная линия) и $p_{\text{цвд}} = 0,55$ МПа (пунктирная линия):
1 — КПД ПГУ-450; 2 — КПД паровой турбины; 3 — КПД котла-утилизатора

Таблица 2

Влияние давления водяного пара на выходе из ЦВД и ЦСД на показатели работы парогазового блока ПГУ-450 при двукратном вторичном перегреве водяного пара (при отсутствии ГПИВ в хвостовой части КУ)

Давление пара после ЦВД турбины $p_{\text{цвд}}$, МПа	Давление пара после ЦСД турбины $p_{\text{цсд}}$, МПа	КПД ПГУ $\eta_{\text{пгу}}$, %	Удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии b_y , г/(кВт·ч)
0,7	0,4	49,64	247,78
0,7	0,25	50,11	245,46
0,7	0,14	49,64	247,78
0,6	0,16	50,14	245,31
0,4	0,25	49,8	246,99
0,4	0,1	50,31	244,48
0,25	0,16	49,90	246,49
0,25	0,12	49,96	246,2
0,25	0,07	50,41	244

водимого на вторичный перегрев, на основные показатели работы ПГУ-450 (см. табл. 2, рис. 5).

На рис. 5 пунктирными линиями обозначены значения КПД парогазовой установки (кривая 1), паровой турбины (кривая 2) и котла-утилизатора (кривая 3) при давлении водяного пара $p''_{\text{цвд}} = 0,55$ МПа. Аналогичные зависимости, построенные для значения давления $p''_{\text{цвд}} = 0,25$ МПа, обозначены сплошными линиями.

Расчетным путем установлено, что КПД парогазовой установки достигает максимального значения при минимальных давлениях водяного пара, отработавшего в ЦВД и ЦСД турбины, при которых он в перегретом состоянии отводится на вторичный перегрев соответственно в промежуточные пароперегреватели ПП-1 и ПП-2, последовательно размещенные в котле-утилизаторе после экономайзера высокого давления.

Повышение экономичности при введении двукратного промежуточного перегрева водяного пара в котле-утилизаторе можно оценить путем сравнения результатов проведенных расчетов в обоих вариантах для рассматриваемой парогазовой установки. Анализ результа-

тов расчетов показывает, что КПД парогазовой установки с введением двукратного промежуточного перегрева водяного пара (см. рис. 1) равен 52,96 % (с учетом размещения в хвостовой части котла-утилизатора теплообменной поверхности газового подогревателя исходной воды (ГПИВ)), а без использования двукратного промперегрева – 50,76 %. Таким образом, прирост повышения КПД парогазовой установки составляет 2,2 %. Расчет КПД ПГУ производился по формуле: $\eta_{\text{пгу}} = \eta_{\text{гту}} + (1 - \eta_{\text{гту}}) \cdot \eta_{\text{ку}} \eta_{\text{пт}}$.

Дополнительно КПД ПГУ был рассчитан по уравнению энергетического баланса как отношение суммарной мощности турбин ПГУ к энергии топлива, сжигаемого в ГТУ (для ПГУ-450 в двух ГТУ).

Такие расчеты выполнены для исходных данных.

Состав природного газа: $\text{CH}_4 = 98,24$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,29$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,2$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,09$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,04$; $\text{CO}_2 = 0,14$; $\text{N}_2 = 1,0$; $\text{H}_2 = 0$; $\text{O}_2 = 0$; $\text{CO} = 0$; $\text{H}_2\text{S} = 0$; $d_{\text{топ}} = 0$.

$\rho_{\text{топ}} = 0,7312 \text{ кг/м}^3$; $Q_{\text{н}} = 48\,771,36 \text{ кДж/кг}$; $B_{\text{т.г}} = 9,3842 \text{ кг/с}$.

Получены следующие результаты.

Теплота сожженного топлива в камере сгорания одной ГТУ $Q_{\text{с}} = 457\,681,16 \text{ кВт}$.

Для традиционной ПГУ-450 ($N_{\text{пгу}} = 151,79 \text{ МВт}$): мощность ПГУ — 467 590,0 кВт; $\eta_{\text{пгу}} = 51,08 \%$.

Для ПГУ-450 с двукратным промперегревом водяного пара в котле-утилизаторе ($N_{\text{пгу}} = 142,59 \text{ МВт}$): мощность ПГУ — 458 390,0 кВт; $\eta_{\text{пгу}} = 50,08 \%$.

При выполнении расчетов КПД ПГУ $\eta_{\text{пгу}} = \eta_{\text{гту}} + (1 - \eta_{\text{гту}}) \eta_{\text{ку}} \eta_{\text{пт}} = 50,41 \%$. Расхождение результатов расчетов КПД ПГУ по приближенной формуле и по уравнению энергетического баланса составляет:

абсолютная погрешность вычислений $\Delta = 50,08 - 50,41 = -0,33 \%$;

относительная погрешность вычислений $\delta = (50,08 - 50,41)/50,08 = -0,006589 (-0,659 \%)$.

Выводы

1. Предложено в котле-утилизаторе парогазовой установки после водяного экономайзера высокого давления вместо испарителя и экономайзера низкого давления последовательно по ходу газов установить две теплообменные поверхности для промежуточного перегрева водяного пара, отработавшего в ЦВД и ЦСД паровой турбины. Такое решение по-

зволяет перейти к одноконтурной схеме генерации водяного пара, что упрощает конструкцию котла-утилизатора и паровой турбины вследствие неизменного (равного) расхода пара, направляемого в ЦВД, ЦСД и ЦНД турбины. При этом в хвостовой части котла-утилизатора для повышения его КПД путем снижения температуры уходящих газов размещается теплообменная поверхность для нагрева исходной воды.

2. Выполнен расчет тепловой схемы парогазовой установки на примере ПГУ-450, установлено, что за счет повышения расхода пара, направляемого в ЦВД паровой турбины, и введения двукратного промежуточного перегрева водяного пара КПД паровой турбины возрастает на 1,99 % (с 33,02 до 35,01 %). В целом, прирост КПД ПГУ составляет 2,2 % (для случая, когда в котле-утилизаторе размещена теплообменная поверхность газового подогревателя исходной воды). В денежном выражении при наработке парогазовой установки 7500 ч/год и стоимости условного топлива 7000 руб/(т у.т.) экономия составляет 257,506 млн руб в год. Удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии снижается на 10,07 г/(кВт·ч): с 242,32 до 232,25 г/(кВт·ч).

3. Расчетным путем установлено, что наибольшая тепловая экономичность парогазовой установки ($\eta_{\text{пгу}} = 52,96 \%$) достигается при минимальных давлениях водяного пара ($p''_{\text{цвд}} = 0,25 \text{ МПа}$ и $p''_{\text{цсд}} = 0,07 \text{ МПа}$), отработавшего в ЦВД и ЦНД паровой турбины и направляемого на перегрев в промежуточные пароперегреватели ПП-1 ПП-2, при которых он находится в состоянии перегрева.

Список литературы

1. Рогалев, Н. Д. Тепловые электрические станции: учебник по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / Н. Д. Рогалев, А. А. Дудолин, Е. Н. Олейникова; под ред. Н. Д. Рогалева. — М.: Издательство МЭИ, 2022. — 768 с.
2. Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов; под редакцией С. В. Цанева. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 584 с.
3. Кудинов, А. А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: учеб. пособие для вузов с грифом УМО / А. А. Кудинов. — М.: ИНФРА-М, 2012. — 325 с.
4. Трухний, А. Д. Парогазовые установки электростанций: учеб. пособие для вузов / А. Д. Трухний. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. — 648 с.

5. Трухний, А. Д. Основы современной энергетики. Ч. 1. Современная теплоэнергетика / А. Д. Трухний, А. А. Макаров, В. В. Клименко. — М.: Издательский дом МЭИ, 2002. — 368 с.
6. Кудинов, А. А. Расчет тепловых схем парогазовых установок тепловых электростанций: учеб. пособие / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, К. Р. Хусайнов. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. — 263 с.
7. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: монография / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. — М.: Машиностроение, 2011. — 374 с.
8. Александров, А. А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., стереот. / А. А. Александров. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 158 с.
9. Щинников, П. А. Перспективные ТЭС. Особенности и результаты исследования / П. А. Щинников. — Новосибирск: НГТУ, 2007. — 282 с.
10. Парогазовая установка электростанции / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, Е. А. Кудинов // Патент 2806955 Российская Федерация, МПК7 F 01 K 23/10; заявитель и патентообладатель СамГТУ — № 2023117120; заявл. 29.06.2023; опубл. 08.11.2023. — Бюл. № 31. — 9 с.
11. Кудинов, А. А. Парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие для вузов / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. — 230 с.
- tions of thermal power plants), Moscow, Publ. MPEI, 2009, 584 p.
3. Kudinov A. A. *Teplovye elektricheskie stantsii. Skhemy i oborudovanie* (Thermal power plants. Circuits and equipment), Moscow, INFRA-M, 2012, 325 p.
4. Trukhniy A. D. *Parogazovye ustanovki elektrostantsii* (Combined-cycle plants of power plants), Moscow, Publ. MPEI, 2013, 648 p.
5. Trukhniy A. D., Makarov A. A., Klimenko V. V. *Osnovy sovremennoi energetiki. Ch. 1. Sovremennaya teploenergetika* (Fundamentals of modern energy. Part 1. Modern thermal power engineering), Moscow, Publ. MPEI, 2002, 368 p.
6. Kudinov A. A., Ziganshina S. K., Khusainov K. R. *Raschet teplovykh skhem parogazovykh ustanovok teplovykh elektrostantsii* (Calculation of thermal circuits of combined cycle gas plants of thermal power plants), Samara, Samarskii state technical university, 2022, 263 p.
7. Kudinov A. A., Ziganshina S. K. *Energoberezhnie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* (Energy saving in heat power engineering and heat technologies), Moscow, Mashinostroenie, 2011, 374 p.
8. Alexandrov A. A. *Termodinamicheskie osnovy tsiklov teploenergeticheskikh ustanovok* (Thermodynamic fundamentals of thermal power plant cycles), Moscow, Publ. MPEI, 2006, 158 p.
9. Shchinnikov P. A. *Perspektivnye TES. Osobennosti i rezul'taty issledovaniya* (Promising thermal power plants. Features and results of the study), Novosibirsk, NSTU, 2007, 282 p.
10. Kudinov A. A., Ziganshina S. K., Kudinov E. A. *Patent 2806955 Rossiiskaya Federatsiya, MPK7 F 01 K 23 / 10, Parogazovaya ustanovka elektrostantsii* (Patent 2806955 Russian Federation, MPK7 F 01 K 23 / 10, Combined-cycle plant of a power plant), SamSTU, No. 2023117120, claimed 29.06.2023, publ. 08.11.2023, Bul. No. 31, 9 p.
11. Kudinov A. A., Ziganshina S. K. *Parogazovye ustanovki teplovykh elektricheskikh stantsii* (Combined-cycle installations of thermal power plants), Samara, Samarskii state technical university, 2019, 230 p.

a.a.kudinov@yandex.ru

Double resuperheat of the water steam in a single-circuit heat recovery boiler of a combined cycle plant

Kudinov A. A., Ziganshina S. K., Khusainov K. R.

To increase the efficiency of a combined-cycle plant, we propose to generate and overheat the cumulative gas flow directed to the central heating unit of the steam turbine in the high-pressure circuit, and to install two heat exchange surfaces sequentially along the gas flow in the low-pressure circuit behind the high-pressure water economizer for intermediate overheating of water vapor spent in a high and medium pressure cylinder of the steam turbine, respectively, and a gas heater of source water. The operation of a combined-cycle plant is analyzed in the case study of a PGU-450 with and without using a two-stage intermediate superheating of water steam. Calculations show that double resuperheat of the steam allows reducing the specific consumption of the conventional fuel for the electrical energy generation by 4.16% (from 242.32 to 232.25 g/(kWh)).

Keywords: gas turbine plant, heat recovery boiler, steam turbine, combined-cycle plant, steam reheater, source water, gas heater, thermal design, specific consumption of conventional fuel, efficiency.

Метод управления режимами работы выпарных аппаратов по показаниям кажущегося уровня заполнения их кипятильных труб

Суслов В. А., доктор техн. наук

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

Предложен метод контроля управлением режимами работы выпарных аппаратов, основанный на показаниях уровней водомерных стекол. Рассмотрены вопросы теплообмена и гидродинамики при кипении восходящей парорастворной смеси в выпарных аппаратах целлюлозно-бумажного производства.

Ключевые слова: выпарные аппараты, теплоотдача, кипение, пенные растворы, двухфазная смесь, кажущийся уровень, скорость циркуляции.

Выпарные станции (ВС) широко применяются во многих отраслях промышленности. Так, ВС в процессе регенерации отработанных химикатов производства целлюлозы является одним из звеньев, обеспечивающих экономию химикатов и выполнение экологических требований по охране окружающей среды [1].

Интенсивность теплообмена, определяющая эффективность работы выпарного аппарата (ВА), определяется суммарным влиянием основных режимных параметров его работы: температурного напора, массовой скорости раствора, его концентрации, температуры недогрева до состояния насыщения, расходного массового паросодержания. Влияние этих параметров на теплообмен, как показано в [2, 3], проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте кипятильных труб ВА зон с различными режимами кипения раствора.

В соответствии с задачей исследования теплообмена при выпаривании отработанных растворов целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) был спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1 [4]. Основная рабочая часть стенда — кипятильная труба натуральных по отношению к выпарному аппарату размеров с установленными на ней измерительными датчиками. Интервал изменения гидродинамических и теплообменных параметров стенда позволял охватить весь диапазон работы промышленных ВС при выполнении основных требований теплового моделирования.

В качестве рабочих растворов использовались вода, отработанный (черный) сульфат-

ный щелок, полученный при варке хвойных пород и водный предгидролизат от лиственных пород древесины. Физико-технические характеристики растворов приведены в работе [5].

Замкнутый циркуляционный контур экспериментального стенда (рис. 1) состоял из однотрубного вертикального однопроводного ВА и вспомогательных элементов (подогревателей, конденсатора вторичного пара, мерников конденсата греющего и вторичного пара, водомерного стекла, электронагревателя греющего пара, бакового хозяйства, щелочевой ловушки, регулирующей и запорной арматуры).

При анализе полученных экспериментальных данных зону кипения недогретого раствора определяли между сечениями, где температура стенки и температура раствора достигали значений температуры насыщения. В этой зоне насыщения диапазон значений расходных массовых паросодержаний раствора соответствовал $x_{н.к.} < x < 0$, где $x_{н.к.}$ — паросодержание начала кипения.

При достижении раствором температуры насыщения (при $x = 0$) фиксировали начало зоны развитого кипения (пенного, так как исследовались пенообразующие растворы), характеризующегося низкими температурными напорами и относительно высокими коэффициентами теплоотдачи.

В процессе выпаривания влагосодержание потока уменьшалось, образовывалось двухфазное движение с увеличивающейся скоростью парорастворной смеси: кипящей плёнки раствора по стенке и влажного пара в центре трубы (пены). На этом участке дисперсно-

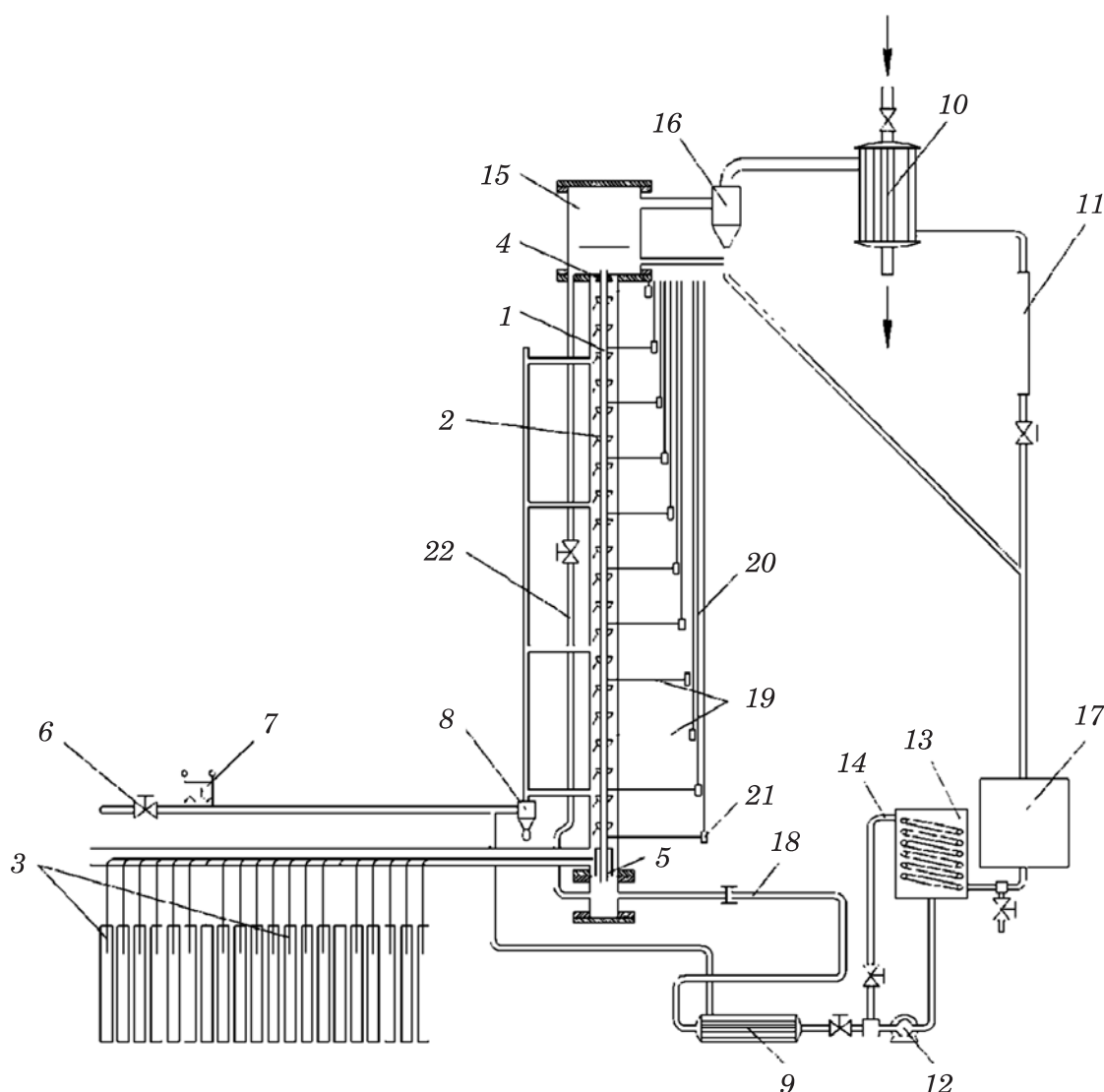


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — кипяtilьная труба; 2 — конденсатосборные стаканы; 3 — мерники конденсата; 4 — конус для отвода конденсата с верхней трубной доски; 5 — стакан отвода конденсата с нижней трубной доски; 6 — дроссельный вентиль; 7 — электрический нагреватель; 8 — водоотделитель; 9 — паровой подогреватель раствора; 10 — конденсатор вторичного пара; 11 — мерник конденсата; 12 — шестеренчатый насос; 13 — питательный бак; 14 — возвратная магистраль; 15 — сепаратор; 16 — тангенциальная щелочная ловушка; 17 — сборный бак; 18 — участок стабилизации для измерения скорости потока раствора; 19 и 20 — импульсные и пьезометрические трубки; 21 — буферные сосуды; 22 — водомерное стекло

кольцевого режима течения наблюдался значительный рост значений коэффициентов теплоотдачи.

По мере продвижения двухфазной смеси в область высоких паросодержаний контакт парорастворной смеси с поверхностью трубы уменьшался вследствие испарения из потока влаги, отмечались рост температуры стенки трубы и падение коэффициентов теплоотдачи. При паросодержании $x = x_{кр}$ фиксировали кризис теплоотдачи, начиная с которого образовывалась зона ухудшенной теплоотдачи.

Показателем тепловой эффективности ВА, явившейся результатом перераспределения этих зон, как показано в [2, 6], может служить кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы $L_{ур}$, измеренный по уровню установленного на ВА водомерного стекла или с помощью манометров. Работы по интенсификации режимов выпаривания ВА с помощью показаний водомерных стёкол, установленных на кипяtilьниках ВА сахарных заводов, были начаты с середины прошлого века Н. Ю. Тобилевичем [6]. Однако в этих ВА с многократной циркуля-

цией выпаривался сахарный, а не пенообразующий раствор, как на ВС ЦБП, поэтому использовались кипяtilьные секции погружного типа с длиной кипяtilьных труб до 4 м. Для борьбы с образующейся при выпаривании растворов ЦБП пеной применяемые ВА, как правило, являются однопроходными с восходящим движением раствора и длиной кипяtilьных труб не менее 9 м. Вследствие различия конструкций и условий работы ВА сахарных заводов и ВА ЦБП значения уровней заполнения кипяtilьных труб в указанных ВА должны быть различны.

Значение пьезометрического уровня ВА, характеризующее интенсивность его режимов работы, определялось с помощью выражения:

$$L_{ур} = \frac{L_{эк}\rho' + (L_{тр} - L_{эк})\rho_{см} + \sum \Delta P}{\rho'},$$

где $L_{ур}$ — величина пьезометрического уровня; $L_{тр}$ — длина кипяtilьной трубы; $L_{эк}$ — длина экономайзерного участка трубы; ρ' — плотность раствора; $\rho_{см}$ — плотность смеси; $\sum \Delta P$ — потери напора при движении парорастворной смеси.

Значение пьезометрического уровня, при котором фиксировали максимальный усредненный по поверхности трубы коэффициент теплоотдачи, назвали оптимальным кажущимся уровнем $L_{ур}^{opt}$.

Представленные в работе [2] данные при кипении в трубе воды и растворов показали, что при определенных соотношениях между количествами теплоты пара и раствора, подаваемых в аппарат, достигаются высокие значения коэффициентов теплоотдачи, в том числе и в ВА, выпаривающих растворы высокой концентрации. Максимальное значение усредненного коэффициента теплоотдачи при кипении раствора с постоянной концентрацией на входе в трубу и неизменной тепловой нагрузкой определялось оптимальной скоростью циркуляции раствора w_{opt} . Оптимальный режим при α_{max} достигался при одновременном возрастании плотности теплового потока и увеличении расхода выпариваемого раствора. При достижении критических тепловых нагрузок повышение скорости циркуляции раствора приводило к снижению темпа уменьшения α .

Результаты проведенных исследований [7] и приведенных на рис. 2 подтверждают вывод о влиянии на интенсивность теплообмена ско-

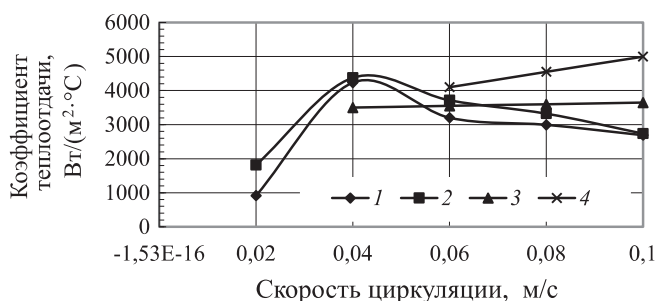


Рис. 2. Влияние скорости циркуляции раствора и тепловой нагрузки q на интенсивность теплоотдачи:
1 — $q = 10$ кВт/м²; 2 — $q = 30$; 3 — $q = 60$; 4 — $q = 90$; $b = 40$ % абсолютно сухих веществ (а.с.в)

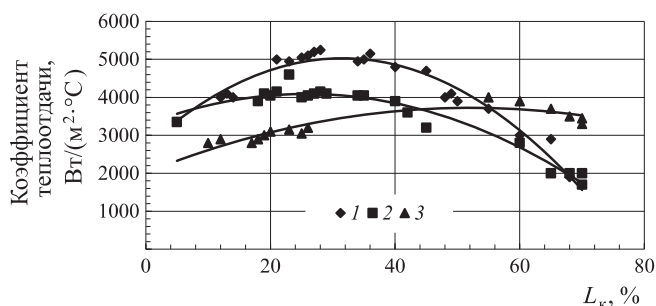


Рис. 3. Изменение среднего коэффициента теплоотдачи в зависимости от кажущегося уровня заполнения кипяtilьной трубы щелоком концентрацией:

1 — 20 % а.с.в; 2 — 30 %; 3 — 40 % при $q = 60$ кВт/м²

рости циркуляции и тепловой нагрузки. При этом влияние тепловой нагрузки на участке пузырькового кипения недогретого до насыщения раствора особенно значительно. С увеличением концентрации кипящего раствора уменьшается влияние тепловой нагрузки на интенсивность кипения и усиливается её зависимость от скорости.

При достижении кажущегося уровня более 35 % и дальнейшем его увеличении при выпаривании раствора с концентрацией $b \leq 30$ % наблюдалось снижение интенсивности теплообмена (рис. 3).

Оптимальный кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы для всех режимов работы ВА, выпаривающих растворы данной концентрации, составляет 30 – 35 %. При выпаривании щелоков с концентрацией менее 30 % оптимальны уровни, составляющие 20 – 40 % высоты трубы, а для щелоков более высокой концентрации — уровни порядка 50 – 70 %.

Следовательно, в ВА для выпарки отработанных щелоков ЦБП высокой концентрации необходимо поддерживать повышенное значение кажущегося уровня. При этом отмечалось, что наряду с удовлетворительной теплоотдачей снижалось накипеобразование в трубах.

Также из рис. 3 следует, что в зависимости от L_k при выпаривании плотных щелоков значение $\bar{\alpha}$ может быть выше, чем при выпаривании средних и слабых щелоков. Этот факт указывает на более сильную зависимость теплоотдачи от гидродинамики процесса кипения, чем от плотности щелока.

Представленные опытные данные показывают значительную зависимость теплоотдачи от скорости циркуляции раствора, его концентрации и плотности теплового потока. Особенно резкое падение α при незначительном отклонении w_0 от оптимальной скорости наблюдается при низких плотностях тепловых потоков для концентрированных растворов. Поэтому поддержание значений параметров, определяющих оптимальные режимы, имеет актуальное значение для ведения процесса выпаривания растворов с переменными q , w_0 и b .

Выводы

1. Интенсивность теплообмена в ВА определяется суммарным влиянием основных режимных параметров: температурного напора, расходного массового паросодержания, массовой скорости раствора, его концентрации, температуры недогрева до состояния насыщения, что проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте кипяtilьных труб ВА зон с различными режимами кипения раствора.

2. Характеристикой эффективности перераспределения зон кипения может служить кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы.

3. Зависимость теплоотдачи от гидродинамики процесса кипения более сильная, чем от плотности выпариваемых растворов.

4. Оптимальный кажущийся уровень заполнения кипяtilьных труб ВА ЦБП, выпаривающих раствор концентрацией от 30 до 50 % а.с.в., должен составлять порядка 30 – 35 % высоты трубы. Для концентрации щелока менее 30 % оптимальными являются уровни, составляющие 20 – 40 %, а для щело-

ков высокой концентрации (более 50 %) — уровни порядка 50 – 70 % высоты трубы.

Список литературы

1. Непенин, Ю. Н. **Технология целлюлозы**. Том II / Ю. Н. Непенин. — М.: Гослесбумиздат, 1963. — 935 с.
2. Суслов, В. А. **Оптимальные значения режимных параметров при выпаривании черных сульфатных щелоков** / В. А. Суслов // Целлюлоза. Бумага. Картон. — 2006. — № 5. — 68 – 71 с.
3. Ягов, В. В. **Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов** / В. В. Ягов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 542 с.
4. Суслов, В. А. **Стенд для исследования механизма теплообмена и гидродинамики при пленочном кипении сульфатного щелока** / В. А. Суслов, В. И. Кушнир // Машины, конструирование, расчеты и оборудование ЦБП. Межвуз. сб. научн. тр. Вып. 6. — Л.: ЛТА, 1978. Межвуз. сб. научн. тр., вып. 6.-Л., ЛТА, 1978.- С. 102 – 106.
5. Суслов, В. А. **Повышение эффективности выпаривания отработанных варочных растворов целлюлозного производства** / В. А. Суслов. Автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. — СПб, 2006.
6. Тобилевич, Н. Ю. **Исследование рабочих процессов при выпаривании сахарных растворов** / Н. Ю. Тобилевич. Автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. — Киев: КТИ ПП, 1969.
7. Суслов, В. А. **Оптимальные скорости подачи щелока в трубы выпарных аппаратов сульфат целлюлозного производства** / В. А. Суслов, Г. В. Рижинашвили // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС. Межвуз. сб. научн. тр. — СПб.: СПбТИ ЦБП, 1992. — С. 19 – 21.

References

1. Nepenin Yu. N. **Tekhnologiya tsellyulozy** (Cellulose technology), Moscow, Vol. II, Goslesbumizdat, 1963, 935 p.
2. Suslov V. A. **Tsellyuloza. Bumaga. Karton** (Cellulose. Paper. Cardboard), 2006, No. 5, pp. 68 – 71.
3. Yagov V. V. **Teploobmen v odnofaznykh sredakh i pri fazovykh prevrashcheniyakh** (Heat transfer in single-phase media and during phase transformations), Moscow, Publ. MPEI, 2014, 542 p.
4. Suslov V. A., Kushnir V. I. **Mashiny, konstruirovaniye, raschety i oborudovaniye TsBP** (Machines, design, calculations and equipment for pulp and paper industry), Vol. 6, Leningrad, LTA, Interuniversity Sat. scientific tr., pp. 102 – 106.
5. Suslov V. A. **Povysheniye effektivnosti vyparivaniya otrabotannykh varochnykh rastvorov tsellyuloznogo proizvodstva** (Increasing the efficiency of evaporation of waste cooking solutions from pulp production),

Abstract of the thesis for the degree of Doctor of Tech. Scien., St. Petersburg, 2006.

6. **Tobilevich N. Yu.** *Issledovanie rabochikh protsessov pri vyparivanii sakharnykh rastvorov* (Study of work processes during the evaporation of sugar solutions), Abstract of the thesis for the degree of Doctor of Tech. Scien., Kyiv, KTI PP, 1969.

7. **Suslov V. A., Rizhinashvili G. V.** *Problemy ekonomii toplivno-energeticheskikh resursov na prompredpriyatiyakh i TES* (Problems of saving fuel and energy resources at industrial enterprises and thermal power plants), Interuniversity Sat. scientific tr., St. Petersburg, SPbTI TsBP, 1992, pp. 19 – 21.

vyachsuslov@mail. ru

A method for controlling operation modes of evaporators by the indications of the apparent level of filling their boiling tubes

Suslov V. A.

A method of controlling operation modes of evaporators based on the readings of the levels of water measuring glasses is proposed. The issues of heat transfer and hydrodynamics during boiling of an ascending two-phase mixture in the evaporators of pulp and paper production (PPP) are considered.

Keywords: evaporators, heat transfer, boiling solutions under conditions of an ascending two-phase mixture, apparent level, circulation rate.

DOI: 10.34831/EP.2023.34.67.005

Оценка возможности сжигания водородосодержащих газов в энергетических котлах

Ионкин И. Л., канд. техн. наук, Урвачев О. А., аспирант

Алексеев С. С., студент
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Рассмотрена возможность сжигания водородосодержащих газов в энергетических котлах электростанций. Проведены вариантные расчеты с использованием математической модели котла ТГМ-96Б, созданной в программном комплексе Boiler Designer, в том числе при пониженных нагрузках. Рассмотрены и проанализированы изменения режимных параметров в зависимости от доли водорода в метано-водородной газовой смеси.

Ключевые слова: водородосодержащие газы, вариантные расчеты, режимные параметры, метано-водородная смесь, программа Boiler Designer.

В последнее время большое внимание уделяется снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. При этом в теплоэнергетике основные усилия направлены на минимизацию выбросов углекислого газа. Один из вариантов снижения выбросов CO_2 , которому уделяется большое внимание за рубежом, это замена используемых в настоящее время органических топлив водородом [1, 2]. Несмотря на то, что в России в теплоэнергетике в качестве топлива в наибольшей степени используется природный газ (до 70 % в топливном балансе), при сжигании которого образуется существенно меньше CO_2 , чем при сжигании угля, использование водорода как альтернативного топлива при выработке тепловой и электрической энергии для нас также актуально. Основные задачи по получению и использованию водорода отражены в «Концепции развития водородной энергетики в РФ» [3]. Несмотря на то, что сжигание водорода в настоящее время обойдется значительно дороже, чем традиционного топлива, его использование кроме снижения воздействия на климат также позволит противостоять дискриминации российских организаций промышленности топливно-энергетического комплекса на мировых рынках под предлогом реализации климатической и экологической политики, в частности — введения трансграничного углеродного регулирования [3]. При сжигании водорода в атмосферу будут выбрасываться водяные пары, которые также являются парниковым газом, однако их значительно проще удалить из продуктов сгорания. Например, используя конденсационные теплоутилизаторы, можно не только сократить выбросы водяных паров на 50 – 60 %, но и дополнительно получить до 14 % низкопотенциаль-

ной теплоты, которая может быть использована в теплофикации [4]. На предприятиях нефтепереработки, нефтехимии и металлургии по завершению цикла одним из побочных продуктов является газ с очень высоким содержанием водорода — до 85 % [5]. Этот побочный газ в виде смеси с природным можно использовать в качестве топлива для получения пара в энергетических котлах, который будет возвращаться обратно в технологический цикл или использоваться для выработки электроэнергии.

В данной работе рассматривается возможность перевода существующих паровых котлов тепловых электростанций, сжигающих природный газ, на водородосодержащие газы (ВСГ)* и чистый водород на примере котла ТГМ-96Б.

Как правило, оценку возможности замены одного газообразного топлива другим определяют по значению числа Воббе (низшего или высшего), характеризующего постоянство теплового потока (тепловой мощности), получаемого при сжигании газа [6]:

$$W_{\text{о.в.,о.н.}} = \frac{Q_{\text{в,н}}^p}{\sqrt{\rho_{\text{г}} / \rho_{\text{в}}}},$$

где $Q_{\text{в,н}}^p$ — объемная теплота сгорания (высшая или низшая), МДж/м³; $\rho_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{в}}$ — плотность газообразного топлива и воздуха.

Считается, что при замене газообразного топлива на новое, значения числа Воббе кото-

* Поскольку основным компонентом природного газа является метан, доля которого может составлять до 98 %, для упрощения расчетов рассматривалась смесь метана и водорода.

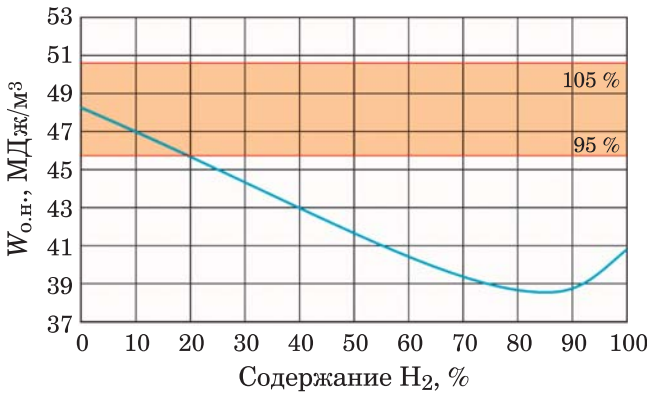


Рис. 1. Зависимость значения нижнего объемного числа Воббе от содержания H₂ в ВСГ

рого отличаются не более, чем на ±5 %, при равном давлении истечения оно может использоваться без замены горелки [6]. Результаты расчетов числа Воббе для различных соотношений метана и водорода в ВСГ приведены в табл. 1.

Если за начальную точку отсчета принимаем число Воббе для случая использования метана, его значение для ВСГ не должно выходить за пределы 45,79 – 50,61 МДж/м³ (по условиям поддержания значения числа Воббе 95 – 105 %). Как видно, число Воббе выходит за указанный диапазон при содержании водорода более 18 % (рис. 1).

Для определения конкретных условий работы котла на ВСГ использовалась программа для теплогидравлических расчетов котельных агрегатов Boiler Designer [7 – 9]. Состав топлива менялся со 100 % CH₄ до 100 % H₂ с шагом 10 %: 90 % CH₄ + 10 % H₂, 80 % CH₄ + 20 % H₂, 70 % CH₄ + 30 % H₂ и т.д.

Исследования проводились на ранее разработанной на кафедре МиПЭУ МЭИ адекват-

ной расчетной модели котла ТГМ-96Б (Е-480-13,8-560ГМ) [10]. Рассматриваемый котел представляет собой однобарабанный вертикально-водотрубный котел с естественной циркуляцией, предназначенный для сжигания природного газа и мазута в режиме работы с уравновешенной тягой [11]. ТГМ-96Б имеет П-образную компоновку с разделенной надвое конвективной шахтой (рис. 2).

Котел ТГМ-96Б укомплектован четырьмя вихревыми газомазутными горелками, скомпонованными на фронтальной стене топки в два яруса с наклоном осей горелок вверх на 10°.

Призматическая топка котла имеет прямоугольное сечение с размерами в осях труб 6,08 × 14,7 м. Боковые и задняя стены топки полностью экранированы трубами. В верхней части трубы заднего экрана образуют аэродинамический выступ, в нижней — под с углом наклона 15°, заложенный шамотным кирпичом. Данный котел имеет специфические конструктивные особенности: большая часть фронтальной стены топки по всей высоте закрыта шестью панелями НРПП; потолок топки, соединительного газохода и части поворотной камеры экранирован трубами потолочного пароперегревателя.

После топки по ходу газов расположены ширмы первого ряда, однорядный фестон, ширмы второго ряда, экранированная настенным пароперегревателем и экономайзером поворотная камера с проходящими через нее трубами подвесной системы пароперегревателя, ступени КПП1 и КПП2, пакеты ЭК2 и ЭК1. Затем продукты сгорания поступают в РВП и двумя дымососами через трубу сбрасываются в атмосферу.

Таблица 1

Значения числа Воббе для различных соотношений метана и водорода в ВСГ

CH ₄ /H ₂ , %	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	0/100
Низшая объемная теплота сгорания Q, МДж/м ³	35,88	33,371	30,862	28,353	25,844	23,335	20,826	18,317	15,808	13,299	10,79
Плотность ρ, кг/м ³	0,717	0,6543	0,5916	0,5289	0,4662	0,4035	0,3408	0,2781	0,2154	0,1527	0,09
Относительная плотность (ρ _г /ρ _в)	0,555	0,506	0,458	0,409	0,361	0,312	0,264	0,215	0,167	0,118	0,070
Нижнее число Воббе W, МДж/м ³	48,2	46,9	45,6	44,3	43,0	41,8	40,6	39,5	38,7	38,7	40,8

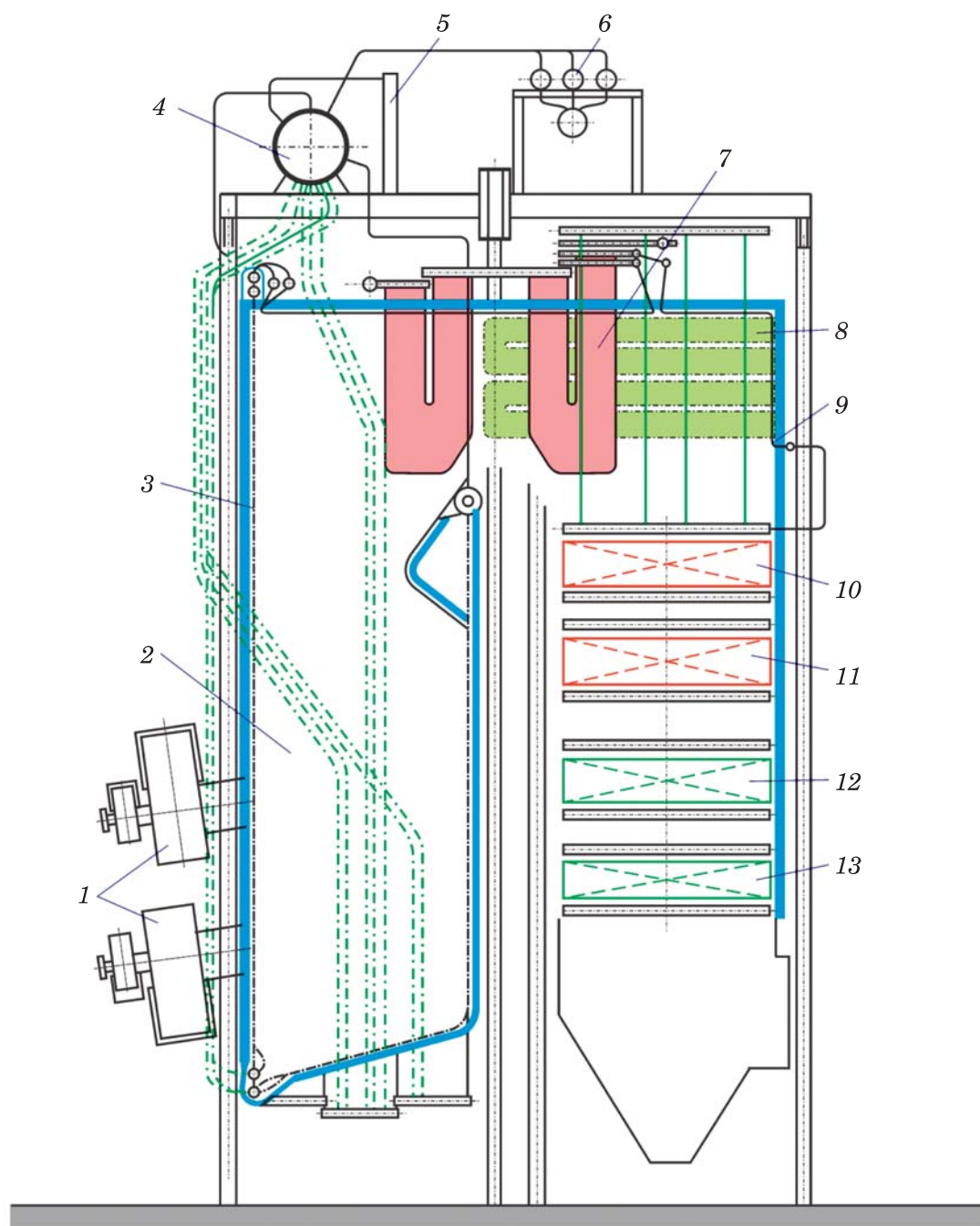


Рис. 2. Конструктивная схема котла ТГМ-96Б:

1 — горелки; 2 — топка; 3 — настенный радиационный пароперегреватель (НРПП); 4 — барабан; 5 — выносные циклоны; 6 — конденсационные установки (КУ); 7 — ширмы; 8 — настенный экономайзер; 9 — настенный пароперегреватель; 10 — первая ступень конвективного пароперегревателя (КПП1); 11 — вторая ступень конвективного пароперегревателя (КПП2); 12 — верхний пакет экономайзера (ЭК2); 13 — нижний пакет экономайзера (ЭК1)

Насыщенный пар из барабана направляется в панели двухходового НРПП: опускается вниз, перемешивается в нижнем коллекторе и поднимается вверх, после чего прямоотком проходит через потолочный пароперегреватель. Затем обогреваемая среда по паропроводу, в котором установлен первый впрыскивающий

пароохладитель, попадает в крайние ширмы второго ряда, из них — в крайние ширмы первого ряда. Движение пара во всех крайних ширмах противоточное.

После этого происходит второй впрыск и пар прямоотком проходит средние ширмы первого и второго рядов. В каждом ряду насчи-

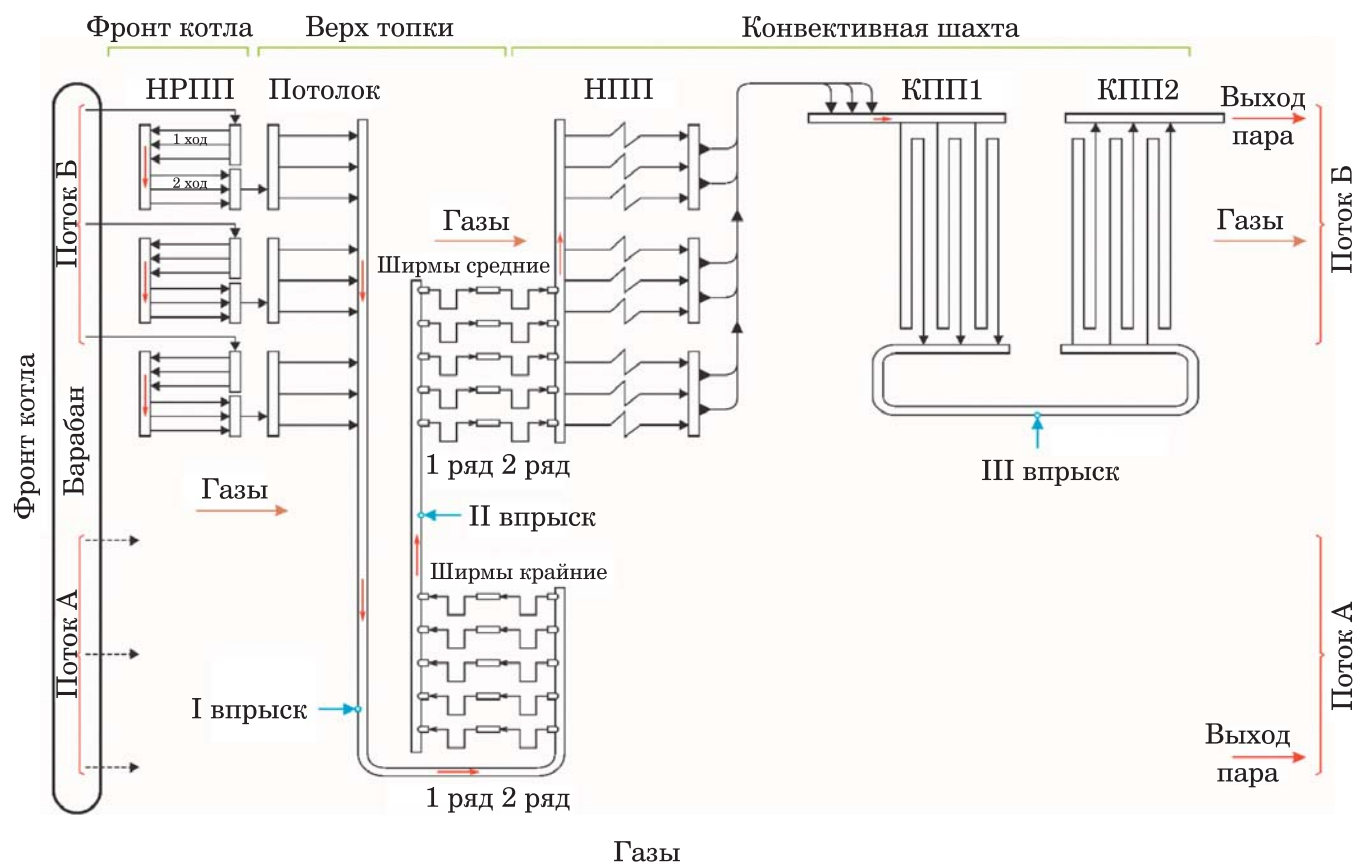


Рис. 3. Схема пароперегревателя котла ТГМ-96Б

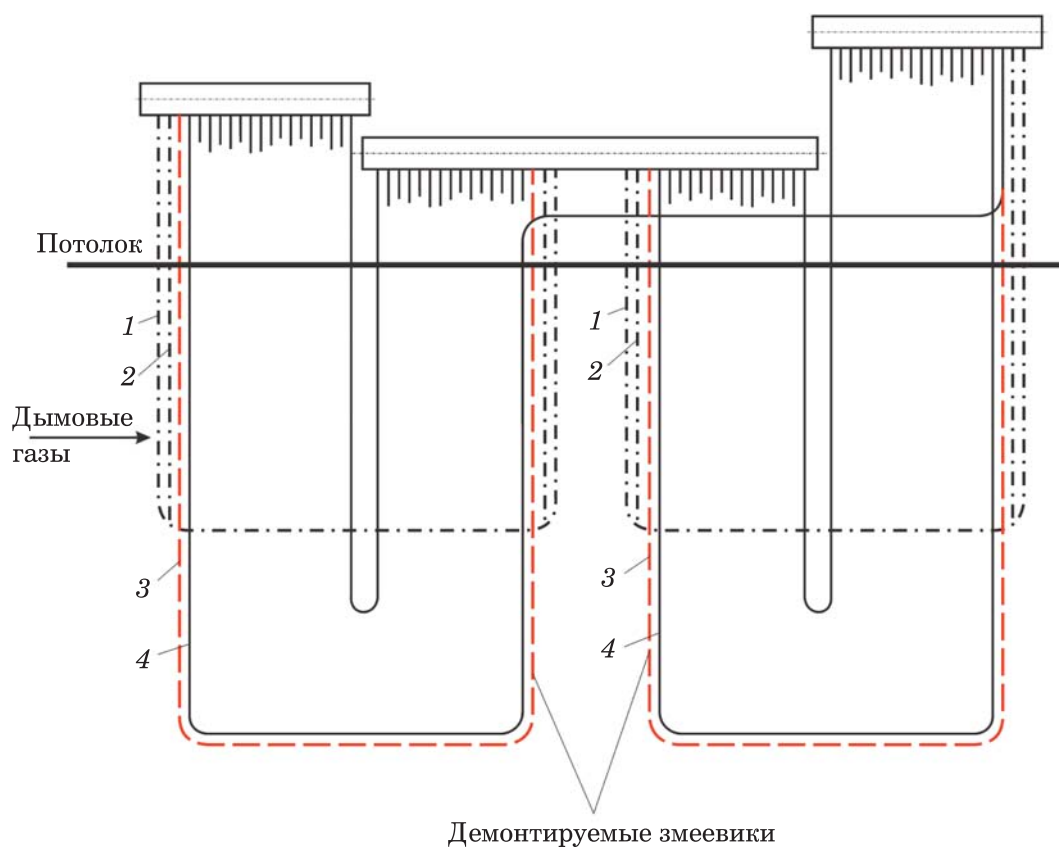


Рис. 4. Реконструкция ширмового пароперегревателя

тывается по 20 ширм: 10 крайних и 10 средних.

Пройдя средние ширмы, пар поступает в панели настенного пароперегревателя поворотной камеры, проходит их прямотоком и попадает в конвективную часть, включающую две ступени: КПП1 и выходную КПП2. Они шахматные, прямоточные. Между ступенями установлен третий впрыскивающий пароохладитель. Схема пароперегревателя котла ТГМ-96Б показана на рис. 3.

В связи с участвовавшими повреждениями лобовых змеевиков ширм первого ряда была выполнена реконструкция ширм (рис. 4). Суть реконструкции заключается в удалении третьего змеевика в обоих рядах ширм и подключении четвертого змеевика ширм первого ряда к задним коллекторам ширм второго ряда — на место демонтированного третьего змеевика. В связи с этим для повышения надежности пароперегревателя номинальная температура перегретого пара была снижена до 550 °С.

За начальную точку, с которой производились сравнения, были приняты такие значения режимных параметров работы котла, при которых при сжигании чистого метана получались номинальные значения паропроизводительности, температуры и давления перегретого пара, указанные в [12]. На рис. 5 и 6 приведены газовоздушный и пароводяной тракты расчетной модели котла ТГМ-96Б.

На первом этапе при выполнении расчетов оценивалось влияние концентрации водорода в ВСГ на следующие режимные параметры работы котла:

- расходы топлива, воздуха и продуктов сгорания;
- паропроизводительность;
- температура и давление перегретого пара;
- КПД котла;

- температура продуктов сгорания в различных сечениях газового тракта котла.

На рис. 7 показаны зависимости расходов топлива, воздуха и продуктов сгорания от содержания водорода в ВСГ. Видно, что объемный расход топлива при 100 % водорода в 3,3 раза больше, чем при 100 % метана. Понятно, что существующие горелки не рассчитаны на работу в таком режиме, но на данном этапе исследований было принято допущение, что они обеспечат требуемые расходы. Расход

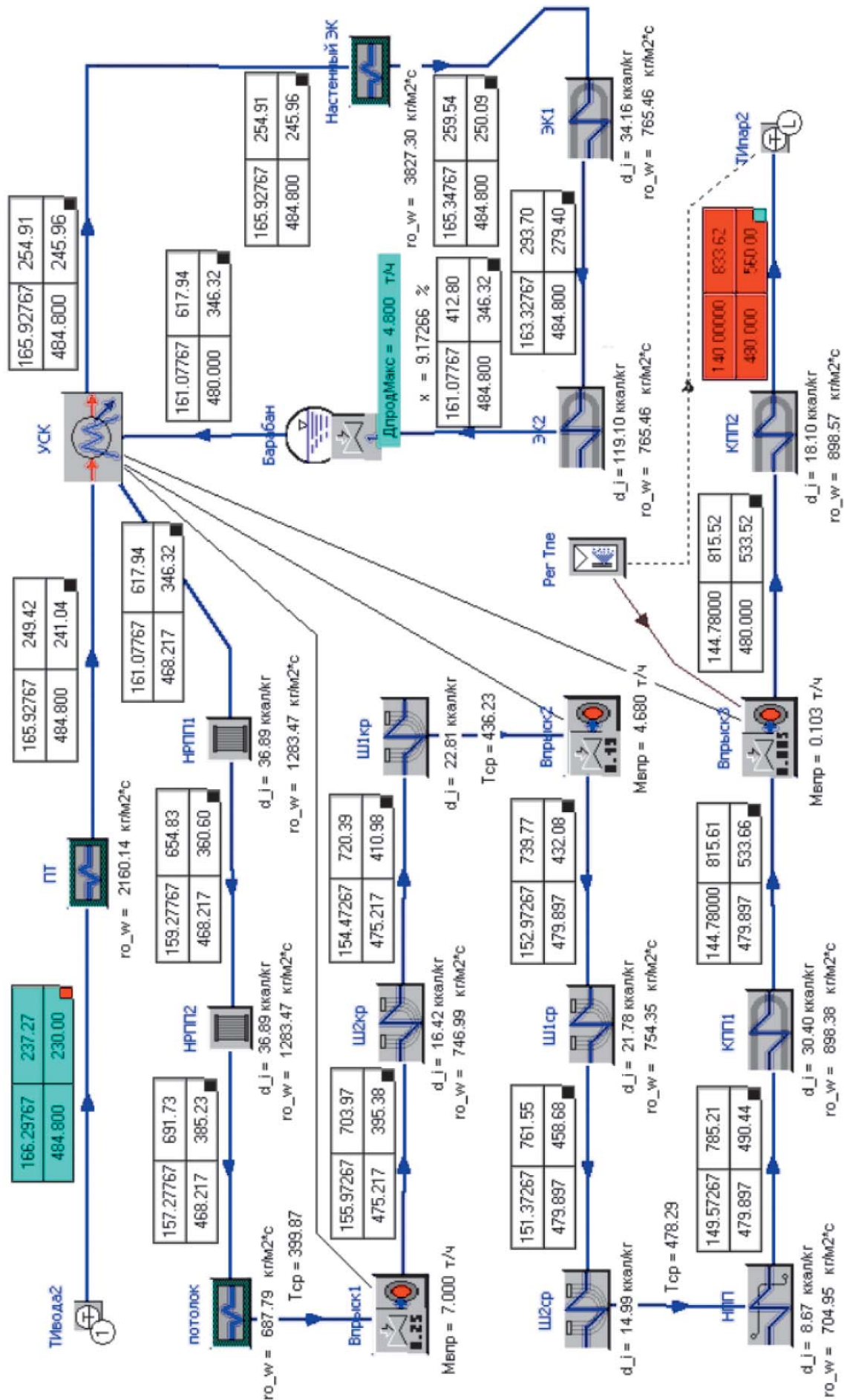
воздуха при этом составит 83 %, а расход продуктов сгорания — 89 % от соответствующих расходов при сжигании чистого метана.

Необходимо отметить, что изменение состава топлива приведет не только к изменению расхода продуктов сгорания, но и к изменению их состава (рис. 8). Такие изменения окажут влияние на работу котла. Во-первых, изменится количество трехатомных газов CO_2 и H_2O в продуктах сгорания, что повлияет на излучательную способность факела в топочной камере (степень черноты топочной камеры увеличится с 0,59 при 100 % метана до 0,66 при 100 % водорода) и приведет к изменению температур по газовому тракту котла. Во-вторых, снижение объема продуктов сгорания уменьшит конвективную составляющую, что снизит тепловосприятие конвективных поверхностей. Это особенно важно для котлов, у которых значительная часть теплоты, получаемая пароперегревателем, приходится на конвективные ступени. У котла ТГМ-96Б пароперегреватель имеет значительную радиационную составляющую — фронтальный экран котла включен как первая ступень пароперегревателя (НРПП). Распределение теплоты между экранами топочной камеры и конвективными поверхностями нагрева приведено на рис. 9.

За счет изменения состава продуктов сгорания адиабатная температура при сжигании 100 % водорода возрастает почти на 200 °С по сравнению со сжиганием 100 % метана (см. рис. 10).

В то же время температура на выходе из топочной камеры снижается на 34 °С за счет увеличения излучательной способности факела. В связи с этим практически по всему тракту котла температура продуктов сгорания при наличии водорода в ВСГ будет меньше, чем при сжигании метана. И только за воздухоподогревателем за счет снижения объема воздуха, поступающего в котел, наблюдается незначительное повышение, которое даже при сжигании 100 % водорода не превысит 1 °С (см. рис. 11). Отклонение температур по тракту котла по отношению к содержанию 100% метана показано на рис. 12.

Несмотря на незначительное увеличение температуры продуктов сгорания за котлом при увеличении доли водорода в ВСГ КПД котла увеличивался — прирост составил 0,7 % при сжигании 100 % водорода (см. рис. 13). Это

Рис. 6. Пароводяной тракт расчетной модели ТГМ-96Б, работающего на чистом СН₄

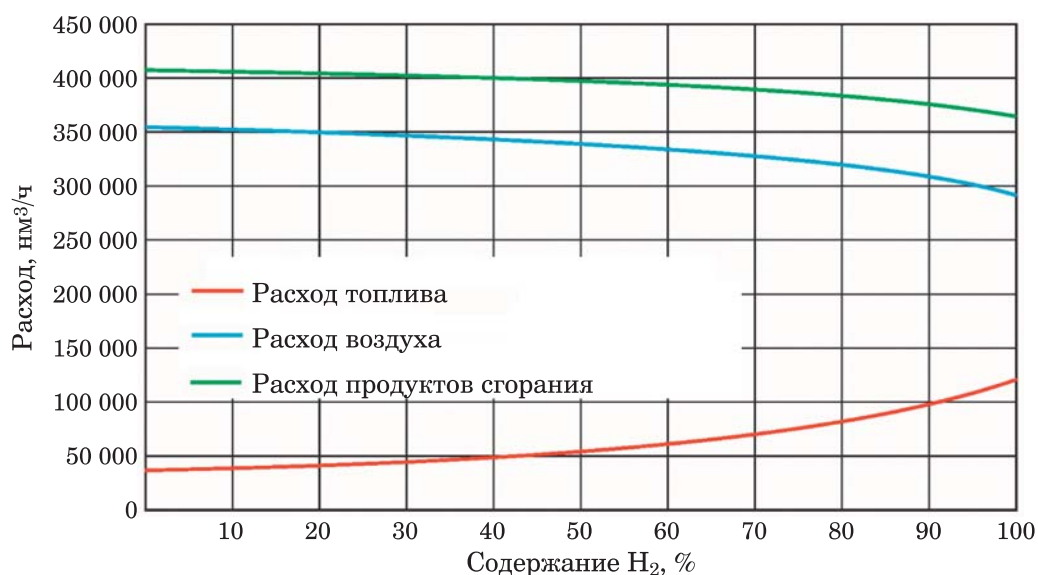


Рис. 7. Зависимости расходов ТГМ-96Б от содержания H₂ в ВСГ

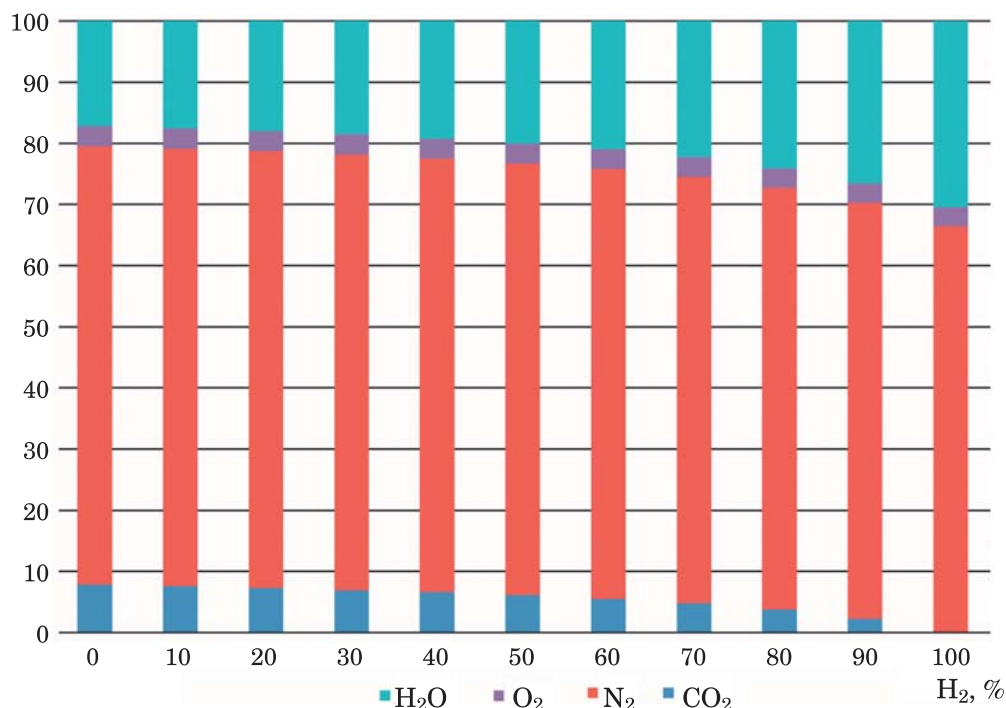


Рис. 8. Изменение состава продуктов сгорания от содержания водорода в составе ВСГ (метано-водородной смеси) по объему

объясняется снижением объема продуктов сгорания за котлом на 10,4 % при 100 % водорода при практически одинаковой их теплоемкости.

Таким образом, можно констатировать, что сжигание ВСГ с большим содержанием водорода в котле ТГМ-96Б на номинальной нагрузке не ухудшит его технико-экономические параметры: КПД котла незначительно возрастет,

а надежность ширмового и конвективного пароперегревателя не ухудшится, так как температура продуктов сгорания перед ними с ростом содержания водорода будет снижаться (см. рис. 9).

На втором этапе исследовалась работа котла ТГМ-96Б на пониженных нагрузках. При сжигании природного газа котел должен раз-

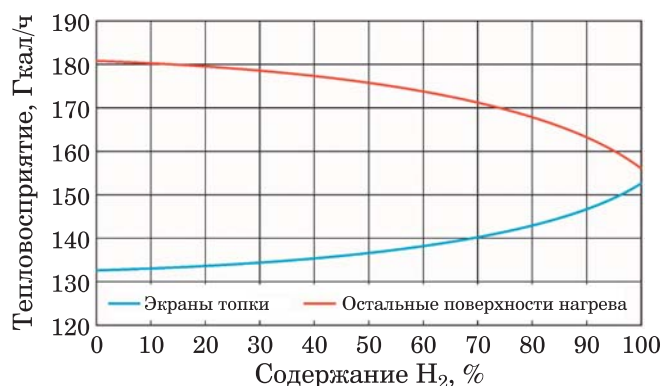


Рис. 9. Тепловосприятие экранов топки и остальных поверхностей нагрева от состава ВСГ

гружаться до 30 % номинальной нагрузки. При снижении нагрузки расход на впрыски уменьшается, так как расход продуктов сгорания становится меньше и тепловосприятие конвективных ступеней пароперегревателя уменьшается. При увеличении доли водорода в ВСГ происходит снижение как объема продуктов сгорания, так и их температуры перед конвективными ступенями (см. рис. 5 и 9).

Как показали расчетные исследования, без регулирования за счет изменения избытка воздуха (во всех расчетах принималось значение коэффициента избытка воздуха на выходе из топки 1,066) номинальная температура пере-

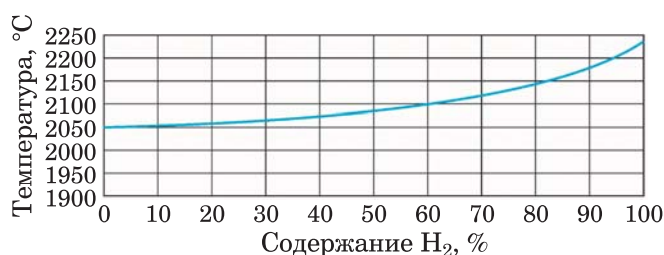


Рис. 10. Изменение адиабатной температуры от состава ВСГ

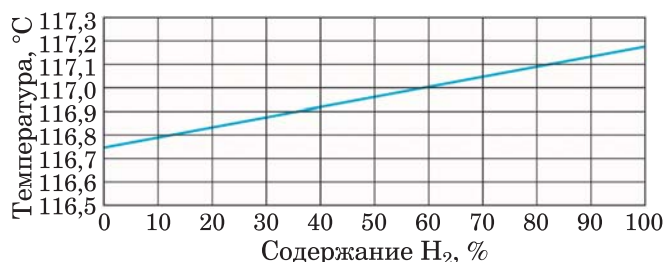


Рис. 11. Изменение температуры продуктов сгорания за котлом от состава ВСГ

гретого пара 560 °C согласно [12] и 550 °C после снижения в связи с реконструкцией с учетом допустимых отклонений +5 °C и -10 °C, обеспечивалась практически во всем диапазоне содержания водорода в ВСГ при нагрузках от 50 % и выше (табл. 2).

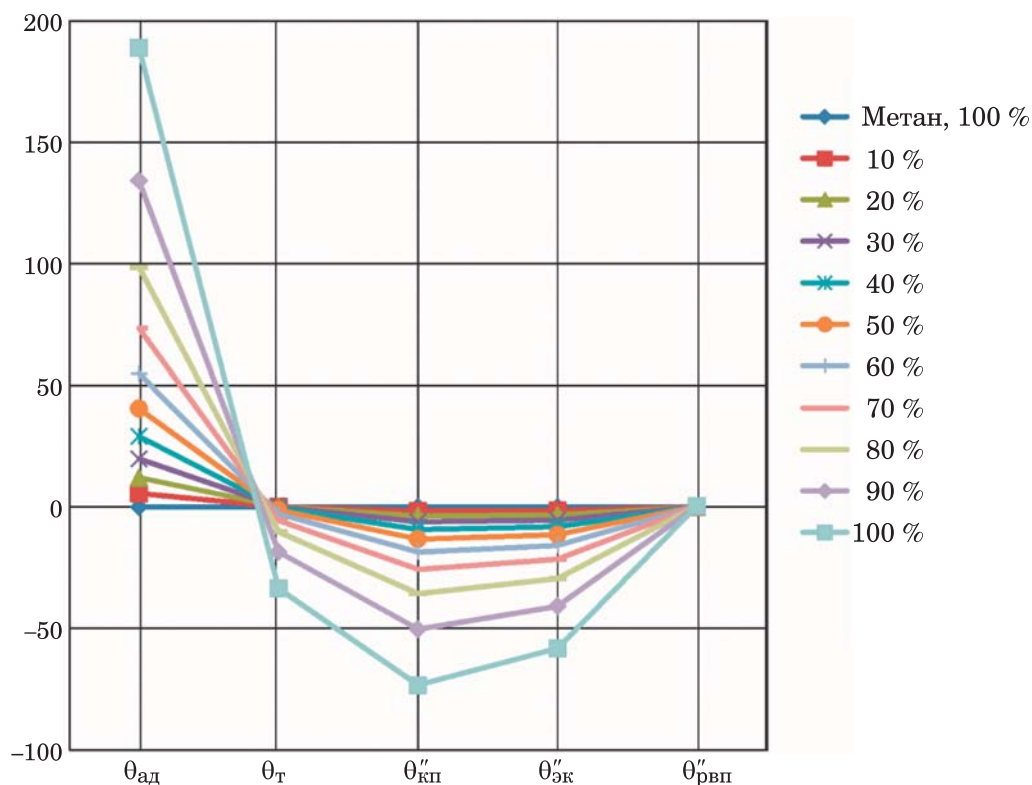


Рис. 12. Отклонение температуры продуктов сгорания по тракту котла ТГМ-96Б от состава ВСГ

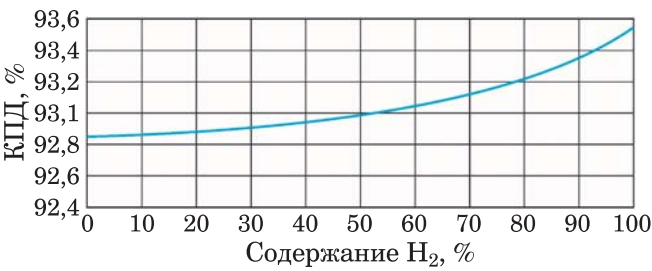


Рис. 13. Зависимость КПД ТГМ-96Б от содержания H₂ в топливе

Затем на основании экспериментальных данных по работе котла при 96,7, 61,9, 49,8 и 43,6 % нагрузки были рассчитаны коэффициенты избытка воздуха для остальных нагрузок. Результаты расчетных исследований представлены в табл. 3. Как видно из полученных результатов, изменение избытков воздуха несколько расширило диапазон нагрузок, при которых температура перегретого пара находится в допустимом диапазоне.

Так как котел ТГМ-96Б имеет большую пароперегревательную поверхность в топке котла, т.е. характеристики пароперегревателя ближе к нейтральному, то можно ожидать, что для других котлов диапазон нагрузок окажется существенно уже. В данном случае под нейтральным пароперегревателем понимается та-

кой пароперегреватель, который при изменении нагрузки котла обеспечивает постоянную температуру перегрева пара без изменения состояния регуляторов (для данного котла впрыскивающих парохладителей).

Выводы

- 1. КПД котла с ростом содержания H₂ возрастает в основном за счет снижения объема дымовых газов. Дополнительно можно рекомендовать установку за котлом конденсационного теплоутилизатора, который обеспечит не только снижение выбросов водяных паров в атмосферу, но и значительное увеличение КПД котла.
- 2. На пониженных нагрузках на котле ТГМ-96Б, несмотря на большую долю радиационной составляющей в перегреве пара за счет НРПП на фронтальной стене, не удастся обеспечить требуемую температуру перегрева пара.
- 3. При доле H₂ в ВСГ 20 % расход объемный расход топлива возрастает на 16 %. В связи с этим при доле H₂ в ВСГ более 20 % может потребоваться модернизация или замена горелок в силу их ограниченной пропускной способности.

Таблица 2

Температура перегретого пара при различных нагрузках котла ТГМ-96Б и содержании H₂ в ВСГ при неизменном избытке воздуха

Водород, %	Нагрузка, %							
	100	90	80	70	60	50	40	30
0	560	560	560	560	558,8	548,66	531,3	503,13
10					558,88	548,56	531	502,68
20					558,92	548,4	530,62	502,12
30					558,91	548,15	530,12	501,42
40					558,82	547,78	529,47	500,54
50					558,61	547,24	528,59	499,41
60					558,21	546,44	527,4	497,95
70					557,49	545,23	525,73	496
80					556,25	543,37	523,33	493,29
90					554,04	540,39	519,72	489,38
100				559,48	549,96	535,38	514,05	483,45

Таблица 3

Температура перегретого пара при различных нагрузках котла ТГМ-96Б и содержании Н₂ в ВСГ при меняющемся избытке воздуха

Водо- род, %	Нагрузка, %											
	100	96,7	90	80	70	61,9	60	50	49,8	43,6	40	30
0	560				560	558,83	558,05	551,84	551,65	543,13	536,71	510,8
10						558,88	558,1	551,82	551,62	542,99	536,5	510,41
20						558,89	558,1	551,75	551,55	542,79	536,22	509,91
30						558,86	558,05	551,61	551,41	542,5	535,83	509,27
40						558,74	557,92	551,37	551,16	542,08	535,3	508,46
50						558,5	557,66	550,97	550,76	541,47	534,56	507,41
60						558,06	557,19	550,36	550,14	540,58	533,52	506,02
70						557,29	556,4	549,38	549,16	539,27	532,02	504,13
80						555,99	555,05	547,81	547,58	537,3	529,83	501,49
90						553,7	552,71	545,19	544,95	534,16	526,48	497,65
100					557,25	549,53	548,48	540,57	540,32	528,95	521,01	491,71
alfa	1,0341	1,035	1,0351	1,035	1,036	1,036	1,049	1,123	1,124	1,132	1,137	1,15

Список литературы

1. Leigh Collins. Why hydrogen-fired power plants 'will play a major role in the energy transition' / Leigh Collins // [Электронный ресурс] / Recharge. 2021. URL: <https://www.recharge-news.com/energy-transition/why-hydrogen-fired-power-plants-will-play-a-major-role-in-the-energy-transition/2-1-1045768> (дата обращения: 23.09.2023).
2. Naoki Watanabe. Japan's MHPS wins US order for hydrogen-fired thermal power system / Naoki Watanabe // [Электронный ресурс] / Nikkei Asia. 2020. URL: <https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Japan-s-MHPS-wins-US-order-for-hydrogen-fired-thermal-power-system> (дата обращения: 23.09.2023).
3. Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-р. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации // Собрание законодательства РФ. — 16.08.2021. — № 33. — Ст. 6124
4. Ионкин, И. Л. Применение конденсационных теплоутилизаторов на объектах теплоэнергетики / И. Л. Ионкин, П. В. Росляков, Б. Луниг // Теплоэнергетика. — 2018. — № 10. — С. 5 – 20.
5. Енякин, Ю. П. Разработка и внедрение автоматизированных горелочных устройств для сжигания нестандартных видов жидкого и газообразного топлива и крупномасштабной распределенной системы управления котлами / Ю. П. Енякин, М. Б. Шехтман, А. И. Прошин, Ю. М. Усман, И. М. Цесарев, И. К. Плаксин, В. А. Верещетин // Энергосбережение и водоподготовка. — 2006. — № 4. — С. 35 – 37.
6. Росляков, П. В. Оценки возможностей снижения выбросов парниковых газов при сжигании топлив в котлах ТЭС и котельных / П. В. Росляков, Б. А. Рыбаков, М. А. Савитенко, И. Л. Ионкин, Б. Луниг // Теплоэнергетика. — 2022. — № 9. — С. 1 – 10.
7. Мельников, Д. А. Расчетная модель котла ТП-101 в программе Boiler Designer. Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования / Д. А. Мельников, В. А. Верещетин, А. Н. Тугов, В. Т. Сидоркин // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Boiler Designer 2014». — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2014.
8. Плешанов, К. А. Исследование пуска котла Пк-85 Новогорьковской ТЭЦ: Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования / К. А. Плешанов, В. Ю. Латиш, В. П. Князьков // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Boiler Designer 2014». — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2014. С. 33 – 39.
9. Изюмов, М. А. Проведение согласованных тепловых расчетов котла и систем пылеприготовления на базе адекватных расчетных моделей / М. А. Изюмов, В. М. Супранов // Труды XVIII междунар. науч.-техн. конф. «Информационные средства и технологии». Т. 3. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — С. 166 – 173.
10. Супранов, В. М. Расчетное определение минимальной эксплуатационной нагрузки для

- котла ТГМ-96 / В. М. Супранов, М. А. Изюмов // Труды XXI Международной науч.-технич. конференции «Информационные средства и технологии». Т. 1. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. — С. 171 – 178.
11. **Котлы большой мощности (Каталог-справочник).** — М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970.
 12. **Паровые котлы большой мощности (Каталог-справочник).** — Л.: НПО ЦКТИ, 1982.
- ### References
1. **Leigh Collins.** Why hydrogen-fired power plants ‘will play a major role in the energy transition’, [Electronic resource]. — URL: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/why-hydrogen-fired-power-plants-will-play-a-major-role-in-the-energy-transition/2-1-1045768> (accessed: 23.09.2023).
 2. **Naoki Watanabe.** Japan’s MHPS wins US order for hydrogen-fired thermal power system, [Electronic resource]. — URL: <https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Japan-s-MHPS-wins-US-order-for-hydrogen-fired-thermal-power-system> (accessed: 23.09.2023).
 3. **Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 05.08.2021 № 2162-r. Kontseptsiya razvitiya vodorodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii** (Order of the Government of the Russian Federation dated 05.08.2021 No. 2162-r. Concept of development of hydrogen energy in the Russian Federation), Collection of legislation of the Russian Federation, 18.06.2021, No. 33, p. 6124.
 4. **Ionkin I. L., Roslyakov P. V., Luning B.** *Teploenergetika* (Teploenergetika), 2018, No. 10, pp. 5 – 20.
 5. **Enyakin Yu. P., Shekhtman M. B., Proshin A. I., Usman Yu. M., Tsesarev I. M., Plaksin I. K., Vereshchetin V. A.** *Energosberezhenie i vodopodgotovka* (Energysaving and watertreatment), 2006, No. 4, pp. 35 – 37.
 6. **Roslyakov P. V., Rybakov B. A., Savitenko M. A., Ionkin I. L., Luning B.** *Teploenergetika* (Teploenergetika), 2022, No. 9, pp. 1 – 10.
 7. **Melnikov D. A., Vereshchetin V. A., Tugov A. N., Sidorkin V. T.** *Raschetnaya model' kotla TP-101 v programme Boiler Designer. Paket prikladnykh programm dlya rascheta teploenergeticheskogo oborudovaniya* (Calculation model of the TP-101 boiler in the Boiler Designer program. Package of applied programs for calculating thermal power equipment), Tr. Intl. scientific-practical conference «Boiler Designer 2014», Moscow, TORUS PRESS, 2014.
 8. **Pleshanov K. A., Latish V. Yu., Knyazkov V. P.** *Issledovanie pushka kotla Pk-85 Novogor'kovskoi TETs: Paket prikladnykh programm dlya rascheta teploenergeticheskogo oborudovaniya* (Study of the launch of the Pk-85 boiler at the Novogorkovskaya CHPP: Package of applied programs for calculating thermal power equipment), Tr. Intl. scientific-practical conference «Boiler Designer 2014», Moscow, TORUS PRESS, 2014, pp. 33 – 39.
 9. **Izyumov M. A., Supranov V. M.** *Trudy XVIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Informatsionnye sredstva i tekhnologii»* (Proceedings of the XVIII International scientific-technical conference «Information tools and technologies»), Vol. 3, Moscow, Publ. MPEI, 2010, pp. 166 – 173.
 10. **Supranov V. M., Izyumov M. A.** *Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konferentsii «Informatsionnye sredstva i tekhnologii»* (Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference «Information Tools and Technologies»), Vol. 1, Moscow, Publ. MPEI, 2013, pp. 171 – 178.
 11. **Kotly bol'shoi moshchnosti** (High-power boilers), Catalog-reference book, Moscow, NIINFORMTYA-ZHMASH, 1970.
 12. **Parovye kotly bol'shoi moshchnosti** (High-power steam boilers), Catalog-reference book, Leningrad, NPO TsKTI, 1982.

ionkinIL@mpei.ru

Estimation of the possibility of combustion of hydrogen-containing gases in utility boilers

Ionkin I. L., Urvachev O. A., Alekseev S. S.

The possibility of combustion of hydrogen-containing gases in utility boilers of power plants is considered. Variant calculations were carried out using a mathematical model of a TGM-96B boiler, created in the Boiler Designer software package, including conditions of reduced loads. Changes in operation parameters as a function of hydrogen content in the methane-hydrogen gas mixture are considered and analyzed.

Keywords: methane-hydrogen gas mixture, utility boiler, combustion of hydrogen-containing gases, mathematical modelling, Boiler Designer software package.

Альтернативные источники энергии

DOI: 10.34831/EP.2023.99.85.006

Экспериментальное исследование параметров вихревой ветротепловой энергоустановки с ротором Н-Дарье

Шишкин Н. Д., доктор техн. наук, Ильин Р. А., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
Отдел энергетических проблем ФИЦ СНЦ РАН, Саратов

Исследуются процессы и параметры лабораторной вихревой ветротепловой энергоустановки. На этой установке моделируются процессы в комбинированных вихревых солнечно-ветровых энергоустановках. Описаны конструкция и методика проведения экспериментов. В экспериментальной трубе наблюдается вихревое течение с большой окружной горизонтальной скоростью и незначительной скоростью подъемного течения. Получена зависимость средней температуры потока в вихревой трубе от скорости воздушного потока. Определена зависимость частоты вращения ротора Н-Дарье от скорости горизонтального воздушного потока и интенсивности теплового вертикального потока. Оценены мощность и энергетическая эффективность ротора Н-Дарье в вихревой энергоустановке.

Ключевые слова: вихревая энергетика, вихревая ветротепловая энергоустановка, вихревая солнечно-ветровая энергоустановка, ротор Н-Дарье – Савониуса, вихревой поток, мощность, энергоэффективность.

В последние годы достаточно активно развивается вихревая энергетика как одно из перспективных направлений использования возобновляемых источников энергии. Создаются и совершенствуются различного рода вихревые ветроэнергетические установки (ВВЭУ) [1 – 4].



Рис. 1. Экспериментальная электростанция «Торнадо-2С» в Шелекском ветровом коридоре (Казахстан)

Были разработаны и комбинированные вихревые ветроэнергоустановки, в которых подъемный поток в вихревой трубе осуществляется за счет дополнительных источников тепла [5, 6]. Например, в Шелекском солнечно-ветровом «коридоре» Алматинской области была изготовлена и испытана зимой 2014 г. экспериментальная вихревая солнечно-ветровая установка (СВУ) — электростанция «Торнадо-2С» мощностью до 10 кВт [6]. При суточных емкостях теплоаккумулятора 150 кВт·ч, электроаккумулятора 62 кВт·ч годовая выработка электроэнергии составила до 50 МВт·ч. Общий ее вид показан на рис. 1.

На основе рассмотренных в качестве аналогов ВВЭУ и СВУ «Торнадо» авторами в 2022 г. была разработана усовершенствованная конструкция конвективно-вихревой солнечно-ветровой энергоустановки КВСВЭУ [7]. В ней применена цилиндрическая вихревая труба, а ветроколесо пропеллерного типа заменено усовершенствованным ротором Н-Дарье.

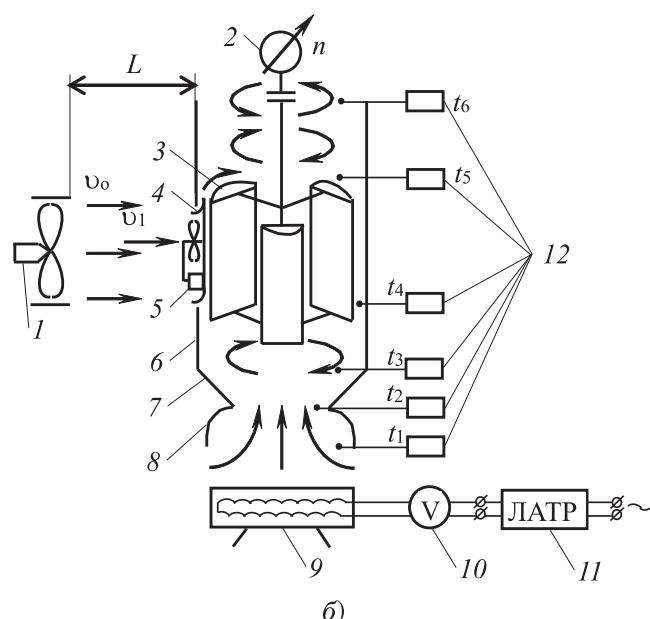
Целью данной работы является экспериментальное исследование параметров КВСВЭУ с роторами Н-Дарье.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований в 2023 г. авторами была разработана



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид лабораторной вихревой ветротепловой установки с ротором Н-Дарье и плоским теплоэлектронагревателем:

а — общий вид установки; б — измерительная схема установки: 1 — вентилятор; 2 — частотомер; 3 — ротор Н-Дарье; 4 — завихритель; 5 — анемометр; 6 — вихревая труба; 7 — диффузор; 8 — конфузор; 9 — теплоэлектронагреватель; 10 — вольтметр; 11 — лабораторный автотрансформатор; 12 — электронные термометры

оригинальная лабораторная вихревая ветротепловая энергоустановка (ВВТЭУ) с ротором Н-Дарье. В этой установке ветер имитировался потоком воздуха от мощного промышленного вентилятора, а солнечный водонагреватель — плоским теплоэлектронагревателем (ТЭН).

Внешний вид лабораторной вихревой ветротепловой установки с ротором Н-Дарье и плоским теплоэлектронагревателем показан

на рис. 2, а, а на рис. 2, б — измерительная схема установки.

Установка состоит из полусферического конфузора диаметром 280 мм и цилиндрической вихревой трубы диаметром 350 мм, высотой 500 мм с квадратным окном 320×320 мм для воздушного потока с завихрителями. В цилиндрической вихревой трубе располагается усовершенствованный ротор Н-Дарье диаметром 320 мм, высотой 300 мм с закрылками с треугольными элементами [8]. Под вихревой трубой располагается плоский ТЭН, в качестве которого используется электроплитка с диаметром нагревательного элемента в форме диска диаметром 190 мм.

Воздушный поток со скоростью v_0 создавался промышленным вентилятором в кожухе, скорость этого потока v_L на расстоянии $L = 0,5 - 3,0$ м определялась цифровым анемометром 5, а температуры — цифровыми термометрами 12, датчики которых помещались в соответствующее место в корпусе вихревой трубы 6. Несколько завихрителей 4 были установлены в боковом окне и отклоняли воздушный поток, создавая в корпусе вихревой трубы 6 круговое движение воздуха по часовой стрелке, позволяя всем трем лопастям крылового профиля ротора Н-Дарье постоянно находиться в воздушном потоке и заставляя его вращаться по направлению против хода часовой стрелки. Частота этого вращения измерялась периодически присоединяемым к его валу через муфту механическим частотомером 2. Мощность теплового потока от ТЭН 9 для создания подогретого воздушного потока регулировалась лабораторным автотрансформатором ЛАТР 11 с использованием вольтметра 10.

Обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов

Мощность теплового потока определялась по формуле

$$Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^2, \quad (1)$$

где $Q_n = 1000$ Вт — номинальная мощность электроплитки; $U_n = 220$ В — номинальное напряжение в электросети.

В серии проведенных экспериментов с помощью ЛАТР поддерживалась тепловая мощность $Q = 200$ Вт при напряжении $U = 155$ В.

Прежде всего был проведен ряд экспериментов по исследованию зависимости скорости воздушного потока от расстояния до вентилятора (рис. 3). Как видно, скорость воздушного потока при изменении расстояния от 0,5 до 3 м (т.е. в 6 раз) изменяется от 7 м/с до 1,9 м/с (т.е. в 3,7 раза). В ходе экспериментов было зафиксировано круговое движение вращающегося маятника по ходу часовой стрелки, в качестве которого использовался легкий теннисный шарик (см. рис. 2, а). С увеличением скорости окружающего течения в трубе u_o , практически равной скорости горизонтального воздушного потока от вентилятора в окне вихревой трубы v_L (т.е. при $u_o = v_L$) увеличивается и окружная скорость маятника u_m . Вертикальная скорость восходящего потока v_b над ТЭН была приближенно определена по формуле для вытяжных вентиляционных труб за счет разности плотностей наружного воздуха ρ_n и воздуха внутри трубы ρ_T :

$$v_b = \sqrt{\frac{2qH_T(\rho - \rho_T)}{\rho_T}}, \quad (2)$$

где q — ускорение силы тяжести; H_T — высота трубы.

Расчеты по формуле (2) в условиях проведенных экспериментов показали, что скорость в трубе не превышает 0,4 м/с, что существенно (в 5 – 18 раз) ниже скоростей v и u_o в диапазоне от 1,9 до 7,0 м/с. Следовательно, как и предполагалось, в экспериментальной трубе наблюдается вихревое течение с большой окружной горизонтальной скоростью и незначительной скоростью подъемного течения, как и в природных торнадо.

Средняя температура в трубе определялась на основе усреднения значений температуры в вихревой трубе t_T по данным электронных термометров 12 $t_1 - t_6$. Зависимость средней температуры вихревого потока в вихревой трубе t_T от скорости воздушного потока v показана на рис. 4.

Как видно, в рассматриваемом диапазоне горизонтальная скорость воздушного потока v_L слабо влияет на среднюю температуру потока в вихревой трубе t_T , от которой зависит вертикальная скорость восходящего потока v_b , и может быть описана эмпирической зависимостью

$$t_T = 30 - 1,11(v - 2,5). \quad (3)$$

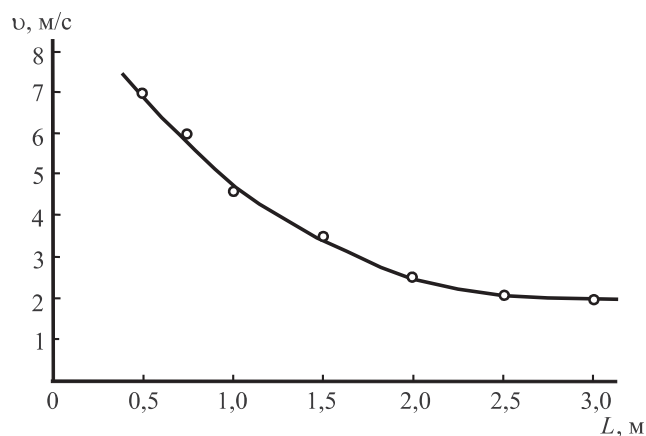


Рис. 3. Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до вентилятора

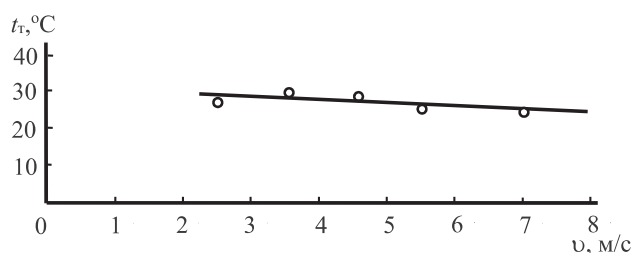


Рис. 4. Зависимость средней температуры вихревого потока в вихревой трубе t_T от скорости воздушного потока v

Снижение средней температуры вихревого потока в вихревой трубе t_T в зависимости от горизонтальной скорости воздушного потока v_L объясняется интенсификацией теплообмена и повышением теплопотерь в вихревой трубе.

Был также выполнен ряд экспериментов по определению частоты вращения ротора Н-Дарье в зависимости от скорости воздушного потока, изменяемой за счет перемещения вентилятора относительно вихревой трубы. Средняя скорость воздушного потока v_L в каждом из сечений на расстоянии L от вентилятора определялась на основе осреднения скоростей потока в 9 точках с помощью цифрового анемометра 5 с погрешностью не более 0,1 м/с. Для сопоставления результатов с ранее полученными при исследовании ротора Н-Дарье [8] были построены: график зависимости частоты вращения ротора Н-Дарье от скорости воздушного потока $n_1 = f(v_L)$, график зависимости частоты вращения ротора Н-Дарье от частоты воздушного потока в вихревой трубе $n_2 = f(v_L)$ и график зависимости частоты вращения ротора Н-Дарье от скорости воздушного потока в вих-

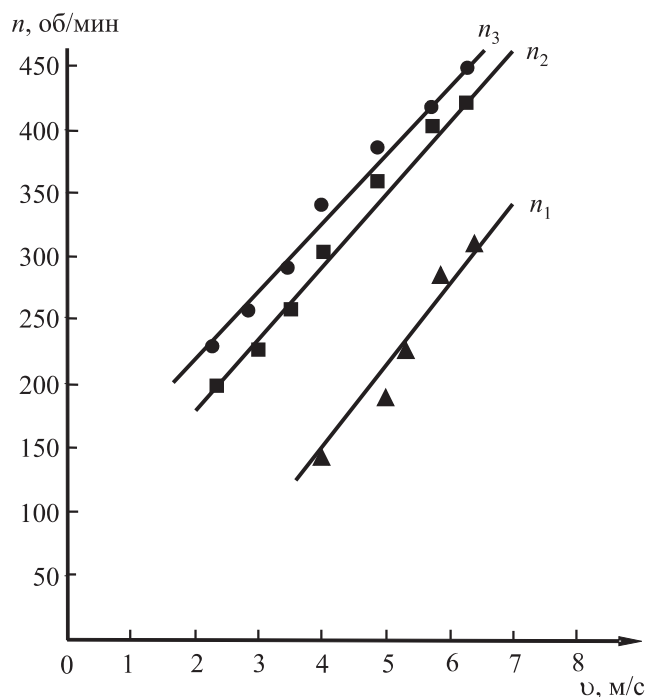


Рис. 5. Графики зависимости частоты вращения ротора Н-Дарье:

$n_1 = f(v_L)$ от скорости воздушного потока; $n_2 = f(v_L)$ от скорости воздушного потока в вихревой трубе; $n_3 = f(v_L)$ от скорости воздушного потока с подогревом

ревой трубе с подогревом $n_3 = f(v_L)$, приведенные на рис. 5.

Как видно из рис. 5, при повышении скорости воздушного потока от 4,1 до 5,9 м/с частота вращения ротора Н-Дарье при ортогональном ветровом потоке увеличилась с 40 до 300 об/мин. При повышении окружной скорости воздушного потока в вихревой трубе, практически равной скорости воздушного потока снаружи, в диапазоне скоростей от 2,5 до 5,9 м/с частота вращения ротора Н-Дарье увеличилась с 200 до 380 об/мин, а при тех же условиях с дополнительным подогревом потока снизу частота вращения ротора Н-Дарье увеличилась с 240 до 430 об/мин. Следует отметить, что вращение ротора Н-Дарье началось лишь при скорости 4,1 м/с, а в круговом потоке в вихревой трубе — с 2,5 м/с. В диапазоне скорости воздушного потока от 4,1 до 5,9 м/с частота вращения ротора Н-Дарье в вихревой трубе будет в 1,4 – 2,4 раза больше, а частота вращения ротора Н-Дарье в вихревой трубе с подогревом будет в 1,5 – 2,5 раза больше, чем для ротора Н-Дарье в горизонтальном воздушном потоке.

Таким образом, наиболее эффективно использование ротора Н-Дарье в вихревой трубе при малых скоростях. Это объясняется тем, что в трубе возникает вихревой почти круговой поток воздуха, в котором все лопасти ротора Н-Дарье все время находятся в воздушном набегающем потоке. Поэтому для раскрутки ротора Н-Дарье не требуется ротор Савониуса, который в этом случае только препятствует вращению ротора Н-Дарье в том же направлении (против хода часовой стрелки), как это было использовано в комбинированном роторе Н-Дарье-Савониуса [9].

Так как мощность ротора Н-Дарье, как было показано в работе [10] практически пропорциональна частоте вращения ротора в кубе $N \sim n^3$, то мощность ротора Н-Дарье в ВВТЭУ, а, следовательно, и в КВСВЭУ будет в 3,4 – 15,6 раза, т.е. на порядок больше, чем мощность ротора Н-Дарье в свободном потоке. Коэффициент мощности (энергетический КПД) усовершенствованного авторами ротора Н-Дарье, применяемого в КВСВЭУ, будет равен 0,70, т.е. в 1,6 раза больше, чем пропеллерного ветродвигателя с КПД $C_p = 0,45$ в СВУ «Торнадо».

Применение КВСВЭУ

КВСВЭУ смогут найти достаточно широкое применение для автономного энергоснабжения различных объектов, удаленных от централизованных систем электро- и теплоснабжения. Для теплоснабжения наиболее эффективным представляется применение КВСВЭУ с теплонасосными установками.

Полученные результаты будут использоваться в дальнейших исследованиях по детальному изучению КПД КВСВЭУ в зависимости от основных геометрических параметров установки и физических условий проведения экспериментов (температуры, скорости и др.). Результаты исследований будут применены при проектировании, сооружении и эксплуатации КВСВЭУ.

Заключение

Таким образом, на основе проведенных работ и исследований получены результаты, могут быть сделаны следующие выводы.

1. В разработанной конструкции КВСВЭУ на основе цилиндрической вихревой трубы с завихрителями, усовершенствованного ротора Н-Дарье и солнечной водонагревательной

установки использовался усовершенствованный ротор Н-Дарье, ветер имитировался потоком воздуха от вентилятора, а солнечный водонагреватель — плоским ТЭН.

2. Скорость в вихревой трубе не превышала 0,4 м/с, что в 5 – 18 раз ниже скорости воздушного потока и окружной скорости воздуха в вихревой трубе, т.е. наблюдается вихревое течение с большой окружной горизонтальной и незначительной скоростью подъемного течения, как и в природных торнадо.

3. Горизонтальная скорость воздушного потока слабо влияет на среднюю температуру вихревого потока, от которой зависит вертикальная скорость восходящего потока, незначительное снижение температуры (с 30 до 20 °С) в вихревой трубе от горизонтальной скорости воздушного потока объясняется интенсификацией теплообмена и повышением теплопотерь в вихревой трубе.

4. Вращение ротора Н-Дарье в горизонтальном потоке начиналось лишь при скорости 4,1 м/с, а в круговом потоке в вихревой трубе — с 2,5 м/с. В диапазоне скорости воздушного потока от 4,1 до 5,9 м/с частота вращения ротора Н-Дарье в вихревой трубе будет в 1,4 – 2,4 раза больше, а частота вращения ротора Н-Дарье в вихревой трубе с подогревом будет в 1,5 – 2,5 раза больше, чем для ротора Н-Дарье в горизонтальном воздушном потоке.

5. Мощность ротора Н-Дарье практически пропорциональна частоте вращения ротора в кубе ($N \sim n^3$), поэтому в КВСВЭУ она будет на порядок больше, чем в свободном потоке, а энергетический КПД усовершенствованного авторами ротора Н-Дарье в КВСВЭУ, равный 0,70, в 1,6 раза больше, чем пропеллерного ветродвигателя с КПД 0,45 в СВУ «Торнадо».

Список литературы

1. Серебряков, Р. А. Вихревая ветроэнергетическая установка / Р. А. Серебряков, В. В. Бирюк // Ракетно-космическая техника. — Сер. XII. — 2000. — С. 48 – 73.
2. Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. В. Г. Родионов. — М.: ЭНАС, 2010. — 352 с.
3. Бирюк, В. В. Вихревая энергетика / В. В. Бирюк, С. Б. Горяинов, Д. А. Угланов // Сборник научных статей. Современная наука. — 2011. — № 2 (7). — С. 220 – 225.
4. Ильин, Р. А. Разработка ветроэнергетической установки для размещения на дымовые трубы энергообъектов морской инфраструктуры / Р. А. Ильин, Н. Д. Шишкин // Вест-

ник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 62 – 68.

5. Бирюк, В. В. Вихревая газозетроэнергоустановка для электроснабжения компрессорных станций / В. В. Бирюк, И. А. Зубрилин, А. С. Красноручский // Вестник СГАУ. — 2001. — Вып. 5. — С. 29 – 35.
6. Надилов, Н. К. Концентрация солнечно-ветровой энергии атмосферы и создание электростанции типа «Торнадо» / Н. К. Надилов, В. М. Низовкин // Нефть и газ. — 2015. — № 1 (85). — С. 107 – 119.
7. Shishkin, N. D. Vortex wind power plant / N. D. Shishkin, R. A. Ilyin // AIP Conference Proceedings 2762, 020021 (2022); Published Online: 27 December 2022. DOI: 10.1063/5.0128722.
8. Shishkin, N. D. Experimental determination of the energy efficiency of rotors of vertical-axis wind turbines for autonomous power supply on land and at sea / N. D. Shishkin, R. A. Ilyin // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) (Saint-Petersburg, November 19 – 20, 2018). MATEC Web of Conferences. — Vol. 245. — P. 06016. DOI: 10.1051/mateconf/201824506016.
9. Shishkin, N. D. The energy efficiency research of combined H-Darier-Savonius rotors for autonomous power supply of objects on land and at sea / N. D. Shishkin, R. A. Ilyin // Journal of Physics: Conference Series Volume 1652 15th International Scientific and Technical Conference (PESPC) 2020 6 – 9 October 2020 / Saratov. Russian Federation [Электронный ресурс]. — URL: https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1652/1/01_2028.
10. Данилевич, Я. Б. Автономная интегрированная ветроэнергоустановка с использованием наноструктурированных материалов для хранения и преобразования электрической энергии / Я. Б. Данилевич, В. Н. Антипов, И. Ю. Кручинина, Ю. Ф. Хозилов, А. В. Иванова, Б. Н. Миронов // Альтернативная энергетика и экология. — 2009. — № 4. — С. 81 – 89.

References

1. Serebryakov R. A., Biryuk V. V. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* (Rocket and space technology), Series XII, 2000, pp. 48 – 73.
2. Rodionov V. G. *Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego* (Energy: problems of the present and opportunities of the future), Moscow, ENAS, 2010, 352 p.
3. Biryuk V. V., Goryainov S. B., Uglanov D. A. *Sbornik nauchnykh statei. Sovremennaya nauka* (Collection of scientific articles. Modern science), 2011, No. 2 (7), pp. 220 – 225.
4. Ilyin R. A., Shishkin N. D. *Vestnik Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* (Vestnik of

- Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies), 2020, No. 2, pp. 62 – 68.
5. **Biryuk V. V., Zubrilin I. A., Krasnorutsky A. S.** *Vestnik SGAU* (Vestnik SSAU), 2001, No. 5, pp. 29 – 35.
 6. **Nadirov N. K., Nizovkin V. M.** *Neft' i gaz* (Oil and gas), 2015, No. 1 (85), pp. 107 – 119.
 7. **Shishkin N. D., Ilyin R. A.** Vortex wind power plant, AIP Conference Proceedings 2762, 020021 (2022), Published Online, December 27, 2022, [Electronic resource]. DOI: 10.1063/5.0128722.
 8. **Shishkin N. D., Ilyin R. A.** Experimental determination of the energy efficiency of rotors of vertical-axis wind turbines for autonomous power supply on land and at sea, International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) (Saint-Petersburg, November 19 – 20, 2018), MATEC Web of Conferences, Vol. 245, p. 06016. DOI: 10.1051/mateconf/201824506016.
 9. **Shishkin N. D., Ilyin R. A.** The energy efficiency research of combined H-Darier-Savonius rotors for autonomous power supply of objects on land and at sea, Journal of Physics: Conference Series Vol. 1652 15th International Scientific and Technical Conference (PESPC) 2020 6 – 9 October 2020 / Saratov, Russian Federation, [Electronic resource]. — URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1652/1/012028>.
 10. **Danilevich Ya. B., Antipov V. N., Kruchinina I. Yu., Khozikov Yu. F., Ivanova A. V., Mironov B. N.** *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* (International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology), 2009, No. 4, pp. 81 – 89.

kaften.astu@mail.ru

Experimental study of the parameters of a vortex wind-thermal power plant with the H-Darrieus rotor

Shishkin N. D., Ilyin R. A.

The operation processes and parameters of a laboratory vortex wind-thermal power plant are considered. Processes occurred in a combined vortex solar-wind power plant are also modeled on this laboratory installation. The design and methodology of the experiments are described. In the experimental pipe, a vortex flow is observed with a large circumferential horizontal and low upward flow velocity. The dependence of the average flow temperature in the vortex tube on the air flow velocity is obtained. The dependence of the H-Darrieus rotor rotation frequency on the velocity of the horizontal air flow and the intensity of the thermal vertical flow is determined. The power and energy efficiency of the H-Darrieus rotor in a vortex power plant are estimated.

Keywords: vortex power industry, vortex wind-thermal power plant, vortex solar-wind power plant, N-Darrieus-Savonius rotor, vortex flow, power, energy efficiency.

Алфавитный указатель статей, опубликованных в 2023 г.

Проекты и исследования

Агабабов В. С., Филиппов В. А., Корягин А. В. Основы методики определения эффективности технологии взаимовостребованных установок	10	2
Агеев В. А., Душутин К. А., Репьев Д. С., Казаков Д. В. Исследование надежности электрических сетей с применением статистических данных	3	2
Андреева Е. Г., Захарова Н. В., Татевосян А. А. Оптимизационные задачи и алгоритм проектирования конструкций тихоходных синхронных машин с постоянными магнитами	7	2
Анучин А. С., Жарков А. А., Лашкевич М. М., Кулик Е. С., Али Ю., Столяров Е. О. Регулирование токов с приблизительно постоянными потерями в асинхронном тяговом приводе с расщеплёнными обмотками	3	30
Белогловский А. А., Гуцан В. А., Белоусов С. В., Галимова А. В., Бухтилова М. А., Лебедева Н. А., Жуликов С. С. Об уточнении критерия оптимизации систем электродов для регулирования электрических полей в газовой изоляции высокого напряжения	6	2
Булгакова Е. С., Зверинцев Н. С., Кувалдин А. Б., Федин М. А. Разработка инженерной методики расчета многослойного индуктора с внешним охлаждением	6	15
Бураков И. А., Никитина И. С., Дудолин А. А., Аунг Х. Н., Ёе В. А., Аунг К. М., Бураков А. Ю. О преимуществах применения процессов обогащения с использованием высокоминерализованных водных растворов в системе ТЭС	2	32
Бухмиров В. В., Гнездов Е. Н., Ракутина Д. В., Гусенкова Н. П., Сулейманов М. Г. Метод расчета термообработки абразивной садки в электрической печи сопротивления	1	18
Ведешенков Н. А. К вопросу об аномальных срабатываниях автоматических выключателей с терромагнитными расцепителями	2	18
Волокитин О. Г., Мингажева Ю. Г. Характеристики электродных систем в технологии обработки золотосодержащей пульпы наносекундными электромагнитными импульсами	8	35
Гапонова Д. А., Кожеченко А. С., Родякина Р. В., Гончаров А. Л., Силиверстов В. И., Щербаков А. В. Система коррекции положения точки ввода проволоки в ванну жидкого металла как средство повышения показателей эффективности процесса аддитивного формообразования металлических изделий	11	41
Гапо Е. Г., Чехранова О. А. Оценка динамики и изменения пропорций топливно-энергетического баланса РФ	4	2
Глазов В. С., Кобзева А. А. Эффективность теплообменной поверхности, профилированной прямоугольными ребрами	4	21
Горелов М. В., Гаряев А. Б., Савченкова Н. М., Юркина М. Ю. Сравнение энергетических и эксплуатационных показателей центральных кондиционеров с различными аппаратами увлажнения воздуха	4	30
Данилов Н. В., Цырук С. А., Шарафеддин К. Ф., Тимонин А. С. Использование нового дифференциального алгоритма работы пускового органа автоматики БАПР с целью сокращения времени локализации аварийной ситуации	3	9
Демин Ю. К., Демина Х. Н., Нечаев С. А. Использование низкотемпературного потенциала окружающей среды при производстве продуктов разделения воздуха	11	36
Дубинин В. С., Титов Н. А., Крупский В. П. МикроТЭЦ сельского дома, работающая на отходах древесины	7	30
Жуйков А. В. Возможность применения твердотопливных смесей на основе бурого угля марки ЗБ и древесных отходов в теплоэнергетике	7	37

Захаров Ю. Ю., Лепешкин А. Р. Исследование передачи электроэнергии потребителю малой мощности по коаксиальной воздушной линии повышенной частоты	1	2
Зязев М. Е., Коняев А. Ю. Линейные индукционные машины с модульным исполнением индукторов для промышленных технологий	2	2
Ильиных М. В., Телегин А. В. Российские и мировые стандарты по организации режима заземления нейтрали распределительных сетей и защите от дуговых перенапряжений	11	12
Ионкин И. Л., Урвачев О. А., Алексеев С. С. Оценка возможности сжигания водородосодержащих газов в энергетических котлах	12	33
Карабарин Д. И., Омуралиев Б. А., Шляпников Д. С., Мезенцева В. С. Повышение эффективности производства энергии на Красноярской ТЭЦ-2 за счет утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих газов от котла БКЗ-420-140	1	32
Кондратьев Н. В., Виниченко В. С., Прокопьева С. В., Фролов Д. В. Применение воздушной турбохолодильной машины для повышения эффективности работы газотурбинных установок	8	28
Кондрашов С. С., Федин М. А., Кувалдин А. Б., Лепешкин А. Р., Жмурко И. Е. Исследование процессов индукционного нагрева стальной заготовки с оплавлением коррозионностойкого покрытия с учетом двух точек Кюри	3	45
Кудинов А. А., Зиганшина С. К., Хусаинов К. Р. Двукратный промежуточный перегрев водяного пара в одноконтурном котле-утилизаторе парогазовой установки	12	19
Лобов Б. Н., Медведев В. В., Чамлай С. В. О влиянии соотношений геометрических параметров электромагнита броневых типа с внутренним воротничком на развиваемые им электромагнитные усилия	1	24
Лукин С. В., Шестаков Н. И., Сурикова А. Н. Определение технико-экономических параметров многоступенчатых блоков разделения нефтешламов	10	18
Макаров А. Н., Крупнов А. В., Соколов А. Ю. Взаимосвязь электрического режима и теплообмена в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах с учетом высоты шлака и запыленности атмосферы	2	9
Мальш М. Е., Матюнина Ю. В. Оценка эффективности переноса нагрузки предприятия на ночные часы с использованием кластерного анализа	3	38
Морсин И. А., Шведов Г. В. Формирование электрических нагрузок на шинах вводного распределительного устройства современных многоквартирных домов	7	22
Мыцык Г. С., Мье Мин Тант. О структурно-алгоритмическом синтезе однофазных многоуровневых инверторов напряжения с амплитудно-широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения	3	17
Надтока И. И., Звозникова И. А., Васильев Г. П., Бурмистров А. А., Туруткин С. Ю., Обыденко И. И. Анализ основных закономерностей в электропотреблении жилой части многоквартирных домов в Московском регионе	11	21
Новичков С. В., Карпов М. А., Перегудов С. В. Энергетические характеристики и экономические показатели бестопливной воздушно-аккумулирующей установки с аккумулятором постоянного объема	5	10
Новичков С. В., Карпов М. А., Перегудов С. С. Сравнительная технико-экономическая эффективность бестопливной ВАУ и ВАГТУ с использованием топлива	8	2
Петров М. Б., Кожов К. Б., Мезенцев П. Е. Выбор приоритетных источников энергоснабжения арктического побережья европейской России	4	10
Поляков М. В., Попов С. К. Повышение эффективности использования природного газа в газотурбинных установках посредством термохимической рекуперации	2	23
Попов А. И. Анализ возможной причины ложных срабатываний защиты от замыканий на землю мощного потребителя на основе математической модели	8	19

Попов С. К., Валинеева А. А., Сериков Э. А. Модель тепломассопереноса при пиролизе углеродсодержащей частицы в газовом потоке	5	2
Птицына Е. В., Птицын Д. В., Кувалдин А. Б. Методика экспериментального определения энергетических характеристик излучателей при питании током сложной формы	4	16
Ремизова Т. С., Кошелев Д. Б. Vehicle-to-Grid как инструмент обеспечения гибкости спроса на электрическую энергию	1	12
Синельников Д. С. Технология электрического воспламенения пылеугольного топлива и перспективы ее использования	6	8
Смирнов С. Е., Пуцылов И. А., Бешкарев М. А., Зацепин А. А. Влияние различных факторов на параметры литий-ионных аккумуляторов	5	35
Соснина Е. Н., Кралин А. А., Крюков Е. В., Бедретдинов Р. Ш. Оптимизация схемы тиристорного регулятора напряжения для сети 6–20 кВ	11	2
Строгонов К. В., Петелин А. Л., Терехова А. Ю., Львов Д. Д., Мурашов В. А., Борисов А. А. Жидкофазное восстановление железных руд углеродводородной смесью и водородом	8	43
Суслов В. А. Метод управления режимами работы выпарных аппаратов по показаниям кажущегося уровня заполнения их кипяtilьных труб	12	28
Татаринцев В. А. Пути повышения экономичности конденсаторов паротурбинных установок	1	40
Умурзаков Д. Д., Смотров Н. Н., Гван Чун Чо, Жуков В. В. Оценка возможности срабатывания защит подстанций от несимметричных режимов при неполнофазном включении фидера	8	11
Усачев А. П., Рулев А. В., Коробченко Д. А. Разработка алгоритма определения интенсивности теплообмена в трубных испарительных и конденсаторных теплообменниках тепловых насосов, работающих на зеотропных смесях	5	26
Федин М. А., Качалина Е. В., Молостова А. В., Федина С. А., Василенко А. И., Зотов М. Л., Демидов Ю. А. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов	12	2
Федин М. А., Кувалдин А. Б., Лепешкин А. Р., Кондрашов С. С., Федина С. А., Жмурко И. Е., Данченко А. В., Ильинская О. И. Разработка индукционной установки для получения защитных покрытий и исследование их свойств	5	19
Федин М. А., Кувалдин А. Б., Лепешкин А. Р., Кондрашов С. С., Федина С. А., Жмурко И. Е., Ильинская О. И., Чэнь Б. Выбор параметров индукционного нагрева для оплавления нанесенных защитных покрытий стальных деталей	7	13
Шелгинский Е. А., Яворовский Ю. В., Шелгинский А. Я. Использование органического цикла Ренкина в производстве неконцентрированной азотной кислоты	12	10
Шомов П. А. Повышение энергетической эффективности магистральных газопроводов за счет изменения режимных и конструктивных параметров	11	28
Шульган В. И., Гнатюк В. И., Харитонов М. С., Кивчун О. Р. Исследование проблемы нечувствительности защит к однофазным коротким замыканиям в воздушных сетях наружного освещения	10	10

Качество электроэнергии

Вагин Г. Я., Куликов А. Л., Севостьянов А. А., Юртаев С. Н. Об адекватности управления системой промышленного электроснабжения в условиях искажения качества электрической энергии	2	38
Дюдяков А. А., Янченко С. А. Снижение эффективности работы гибридного фильтра в реальных электрических сетях	4	40
Жуйков А. В., Фролов М. В., Матвеев Д. А., Никулов И. И. О возможностях применения трансформаторов напряжения для регистрации переходных процессов и контроля качества электроэнергии	10	45

Кузнецов А. В., Чикин В. В. Новый технический параметр для определения значений правовых управляющих факторов в модели управления качеством электроэнергии	11	49
Наумов И. В., Федоринова Э. С., Якупова М. А. Минимизация последствий искажения качества электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении	3	52
Степанов О. А., Чекардовский М. Н., Хмара Г. А., Махмутова В. Р. Исследование влияния накопителей электрической энергии на параметры качества переходных процессов в гибридных энергосистемах с ветроэлектрическими установками	10	25
Сычев Ю. А., Костин В. Н., Сериков В. А., Зимин Р. Ю., Аладьин М. Е. Анализ эффективности работы параллельного активного фильтра в промышленной системе электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах	6	21
Ширковец А. И. Гармонические искажения сигналов тока и напряжения при замыканиях на землю в электрической сети 6 – 10 кВ	10	34
Янченко С. А., Рыжкова Е. Н., Цырук С. А. Программный инструмент анализа случайных уровней показателей качества электроэнергии бытовых электросетей	5	46

Компенсация реактивной мощности

Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Черненко А. Н., Бычков А. В., Федяй О. В. Компенсация вариаций реактивной мощности намагничивания силового трансформатора при геомагнитных возмущениях	7	44
--	---	----

Электробезопасность

Тимонин А. С., Цырук С. А., Шарафеддин К. Ф. Исследование эффективности защиты систем электроснабжения с системой заземления TN-C-S с помощью вводного разнономинального коммутационного аппарата	2	47
--	---	----

Альтернативные источники энергии

Ани А. А., Дудолин А. А. Исследование гибридной газотурбинной установки с солнечными коллекторами для условий Республики Бангладеш	6	56
Мыцык Г. С., Мье Мин Тант. Трёхфазный инвертор напряжения повышенной мощности для солнечной фотоэлектрической станции	6	43
Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Экспериментальное исследование параметров вихревой ветротепловой энергоустановки с ротором Н-Дарье	12	45

Охрана окружающей среды

Зверева Э. Р., Ахметова И. Г., Дремичева Е. С., Назаров А. И., Ильин Н. П., Эминов А. А., Зверев Л. О. Сокращение выбросов парниковых газов тепловых электростанций	1	45
Разаков М. А. Мониторинг температуры воздуха в грабельном отделении городской канализационной насосной станции	1	52
Петин С. Н., Борисов А. А., Голдобин Д. Д., Королев В. С., Бурмакина А. В. Разработка способа производства водорода на базе газовых отходов конвертерного производства стали	6	32
Гаряев А. Б., Юркина М. Ю., Матухнов Т. А., Матухнова О. Д. Моделирование образования отложений солей в трубопроводах систем теплоснабжения	8	50

Общая и прикладная ценология

Кивчун О. Р. Режимное нормирование электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа	4	48
--	---	----

**Институту энергоэффективности и водородных технологий
(ранее ПТЭФ) «НИУ «МЭИ» — 70 лет!**

Гаши Е. Г., Попов С. К., Щербатов И. А. Эволюция приоритетов повышения эффективности промышленной и коммунальной теплоэнергетики РФ	9	2
Клименко А. В., Терёшин А. Г., Прун О. Е. Пути снижения выбросов парниковых газов в черной металлургии России	9	8
Картавцев С. В., Нешпоренко Е. Г., Матвеев С. В. Методология интенсивного энергосбережения. Опыт использования и результаты	9	20
Бернадинер И. М. Высокотемпературное обезвреживание отходов: история и перспективы	9	27
Петин С. Н., Кислицын М. А., Голдобин Д. Д., Лугвищук Д. С. Разработка способа производства водорода на базе водородсодержащего газа нефтеперерабатывающих установок	9	33
Ситас В. И., Козлов С. А., Ярунин С. Н. Хемотермическая система энергоснабжения промышленного узла от атомной энерготехнологической станции	9	44
Киселева А. И., Фокин А. М. Ключевые резервы энергосбережения в промышленных и коммунальных энерготехнологических системах	9	50
Бибко Д. А., Кондрахов В. А. Влияние климатического фактора и реализации программы энергосбережения на энергосистемы крупных городов на примере Москвы	9	55
Гурген Гургенович Ольховский (к 90-летию со дня рождения)	2	56
Яковлев Игорь Васильевич (к 70-летию со дня рождения)	4	59
Системы контроля для объектов энергетики — практические решения	9	61

CONTENTS

PROJECTS AND RESEARCH

- Fedin M. A., Kachalina E. V., Molostova A. V., Fedina S. A., Vasilenko A. I., Zotov M. L., Demidov Yu. A.** Development of a mathematical model of the electromagnetic field and equivalent circuit for Skin Effect Pipeline Heating System. 2
- Shelginskii E. A., Yavorovskii Yu. V., Shelginskii A. Ya.** The use of Organic Rankine Cycle in the production of non-concentrated nitric acid 10
- Kudinov A. A., Ziganshina S. K., Khusainov K. R.** Double resuperheat of the water steam in a single-circuit heat recovery boiler of a combined cycle plant 19

- Suslov V. A.** A method for controlling operation modes of evaporators by the indications of the apparent level of filling their boiling tubes 28

- Ionkin I. L., Urvachev O. A., Alekseev S. S.** Estimation of the possibility of combustion of hydrogen-containing gases in utility boilers 33

ALTERNATIVE POWER SOURCES

- Shishkin N. D., Ilyin R. A.** Experimental study of the parameters of a vortex wind-thermal power plant with the H-Darrieus rotor 45

- Subject index of the articles published in 2023 51

Продолжается подписка на наш журнал на 2024 г.
Оформить подписку можно через подписные агентства
(подписной индекс 70734) или через редакцию.
Возможна подписка на электронную версию журнала.

Главный редактор **С. А. ЦЫРУК**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

М. Г. Баширов, И. В. Белоусенко,
В. В. Вахнина, А. В. Волков, Е. Г. Гашо, В. И. Гнатюк, И. Д. Грачев,
Н. Ф. Джагаров (Болгария), **В. В. Ивакин** (научный редактор), **Е. Н. Касьянова** (ответственный секретарь),
Ю. В. Матюнина, И. И. Надтока, Л. А. Новелла (зам. гл. редактора),
Г. Б. Онищенко, А. Н. Пехота (Республика Беларусь),
С. К. Попов (зам. гл. редактора по теплоэнергетике),
Е. Н. Рыжкова (зам. гл. редактора по электроэнергетике), **Ю. А. Сычев, В. Э. Фризен,**
К. Ф. Шарафеддин (Ливан), **А. В. Щербаков, С. А. Янченко**

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных в журнале «Промышленная энергетика»,
допускаются только с разрешения редакции

Адрес редакции: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8.

Телефоны: (495) 234-74-49, 234-74-18.

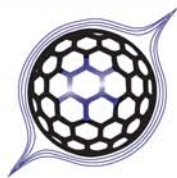
Http://www.promen.energy-journals.ru E-mail: prom_energy@rambler.ru

Сдано в набор 01.12.2023. Подписано в печать 15.12.2023. Дата выхода в свет 18.12.2023. Формат 60 × 84 1/8. Печ. л. 3,5.
Тираж 2500 экз. Заказ БЛ-1295. Цена — свободная.

Адрес для переписки: АО НТФ «Энергопрогресс»: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8

Оригинал-макет выполнен в издательстве «ФОЛИУМ»

127411, Москва, Дмитровское ш., 157, тел.: (499) 258-08-28. E-mail: info@folium.ru



научно-техническая фирма
Энергопрогресс
www.energy-journals.ru

129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8
Тел./факс: +7 (495) 911-2696, 911-7430
Банковские реквизиты:
ИНН 7705784276, КПП 770201001,
ПАО Сбербанк г. Москва, БИК 044525225,
к/с 30101810400000000225, р/с 40702810438120110669

АО «НТФ «Энергопрогресс» осуществляет подписку на следующие издания на I полугодие 2024 года. Подписаться можно непосредственно через редакцию с любого номера журнала и на любой период по редакционным ценам с учётом почтовых расходов и НДС

ЭНЕРГЕТИК ISSN 0013-7278

Выходит с июня 1928 года 12 раз в год. Цена за номер – **2475 руб.**
www.energetik.energy-journals.ru
Подписные индексы: **71108** (pressa-rf.ru); **П1330** (podpiska.pochta.ru).



Приложения к журналу «ЭНЕРГЕТИК»



БИБЛИОТЕЧКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ISSN 2949-5989

Выходит с июня 1998 года 12 раз в год.
Цена за номер – **1584 руб.**
Подписные индексы: **88983** (pressa-rf.ru);
П7490 (podpiska.pochta.ru).



ЭНЕРГЕТИКА ЗА РУБЕЖОМ

Выходит с июня 2000 года 6 раз в год.
Цена за номер – **1221 руб.**
Подписные индексы: **87261** (pressa-rf.ru);
П7491 (podpiska.pochta.ru).



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ ISSN 0201-4564

Выходит с 1930 года 12 раз в год. Цена за номер – **2629 руб.**
www.elst.energy-journals.ru
Подписные индексы: **71104** (pressa-rf.ru); **П1353** (podpiska.pochta.ru).

Приложение к журналу «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ ISSN 0421-188X

Выходит с января 1956 года 6 раз в год. Цена за номер – **1309 руб.**
Подписные индексы: **88015** (pressa-rf.ru); **П7489** (podpiska.pochta.ru).

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ISSN 0016-9714

Выходит с 1930 года 12 раз в год. Цена за номер – **2288 руб.**
www.gts.energy-journals.ru
Подписные индексы: **70224** (pressa-rf.ru); **П1354** (podpiska.pochta.ru).



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА ISSN 0033-1155

Выходит с августа 1944 года 12 раз в год. Цена за номер – **2618 руб.**
www.promen.energy-journals.ru
Подписные индексы: **70734** (pressa-rf.ru); **П1356** (podpiska.pochta.ru).

ВЕСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ ISSN 2218-5496

Выходит с сентября 2002 года 6 раз в год. Цена за номер – **2629 руб.**
www.vesti.energy-journals.ru
Подписные индексы: **87667** (pressa-rf.ru); **П1357** (podpiska.pochta.ru).

