

Авторефер.
К 59

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант А. И. КОЗОРЕЗ

**Исследование переменных режимов
углекислотных энергетических
установок**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса — 1969

СМ

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

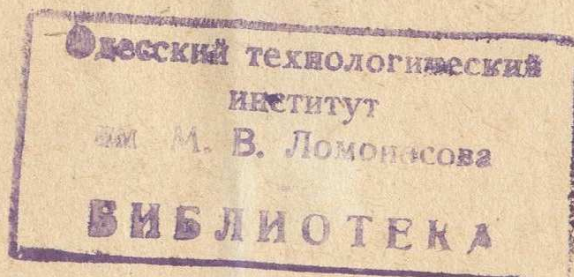
Аспирант А. И. КОЗОРЕЗ

Исследование переменных режимов
углекислотных энергетических
установок

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Переучет 1984

V 0001639



Одесса — 1969

Работа выполнена в проблемной лаборатории при кафедре инженерной теплофизики Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор **Гохштейн Д. П.**,
кандидат технических наук, доцент **Дехтярев В. Л.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Зысин В. А.**,
кандидат технических наук, доцент **Аксельбанд А. М.**

Ведущая организация — Центральный котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова.

Автореферат разослан „_____“ _____ 1969 г.

Защита диссертации состоится „28“ марта 1969 г.
на заседании Ученого совета Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах присылать по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт им. М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

Л. А. Запорожец.

Одним из возможных путей повышения экономичности тепловых электростанций является использование в энергетике низкокипящих веществ, в частности, углекислоты. Ряд особенностей этого рабочего тела — большое противодавление в цикле и малые теплоперепады в турбинах — позволяют создать компактные одновальные блоки большой единичной мощности (1000 ÷ 2000 Мвт и более), имеющие высокий к. п. д.

Для выяснения перспективности применения углекислого газа в энергетике ряд научно-исследовательских организаций и энергомашиностроительных заводов проводят соответствующие разработки, в том числе и работы по созданию опытно-промышленной углекислотной энергетической установки (ОП УКЭУ) мощностью 50 Мвт. Ранее выполненные исследования и проработки показали преимущество углекислотных энергетических установок (УКЭУ) на номинальном режиме. Однако исследования переменных режимов не проводились, а особенности рабочего тела и схем УКЭУ не позволяют применить существующие способы регулирования. Для внедрения УКЭУ важно: во-первых, чтобы установка была работоспособна при переменных режимах, во-вторых, чтобы на этих режимах у нее обеспечивалось минимальное снижение к. п. д. В условиях строительства опытно-промышленной установки исследование ее переменных режимов крайне необходимо. Настоящая работа посвящена этим вопросам.

Диссертация состоит из пяти глав, в которых изучены характеристики различных схем УКЭУ на номинальном и переменном режимах работы, разработан графо-аналитический метод расчета переменных режимов, выяснены преимущества и недостатки рассмотренных схем. В результате анализа, переменного и номинального режимов при помощи энтропийного метода намечены пути дальнейшего совершенствования УКЭУ, разработаны оптимальные схемы установок большой мощности, опытно-промышленной установки, имеющих высокий к. п. д. на номинальном и переменном режимах.

Глава I — ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА НИЗКОКИПЯЩИХ ВЕЩЕСТВАХ И ИХ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ

Существующие энергетические установки наряду с преимуществами, обусловившими распространённость их в настоящее

время, имеют существенные недостатки: в цикле ПТУ ограничены возможности развития регенерации, в цикле ГТУ велика работа сжатия в газовой фазе и велика температура отвода тепла.

В 1941 г. Д. П. Гохштейн предложил цикл на низкокипящих веществах, в частности на углекислоте, в котором в некоторой степени объединяются преимущества циклов ПТУ и ГТУ: малая работа сжатия, совершаемая в жидкой фазе, минимальная температура отвода тепла и неограниченная возможность развития регенерации с повышением начальной температуры. В последующем этот цикл был усовершенствован введением дополнительного сжатия рабочего тела в газовой фазе. Усовершенствование основного цикла повысило к. п. д. углекислотной установки на 17—20% и сделало ее конкурентоспособной с самыми экономичными существующими установками. При начальной температуре 565°C к. п. д. УКЭУ несколько превышает к. п. д. ПТУ. С ростом начальной температуры преимущества УКЭУ значительно возрастают по сравнению с существующими установками. Выполненные научно-исследовательскими организациями и заводами эскизные проекты показали, что все турбомашинные УКЭУ конструктивно выполнимы при современном уровне техники, получаются чрезвычайно компактными, имеют высокий к. п. д.

Особая необходимость в исследовании переменных режимов появляется при создании установок, работающих на новых рабочих телах или по принципиально новым схемам, так как в этих случаях не всегда могут быть применены известные способы регулирования. В пароводяных установках термодинамические параметры цикла при частичных нагрузках не меняются, в ЗГТУ во всех точках цикла давления меняются в одинаковой степени, в открытых ГТУ противодавление неизменно, а изменяется только начальное давление. В отличие от существующих установок в УКЭУ на этих режимах фиксировано промежуточное давление сжатия, а начальное и конечное давления изменяются.

При больших объемных расходах CO_2 , малых теплорезервах в турбинах и больших перепадах в ступенях сопловое регулирование в УКЭУ конструктивно трудно выполнить. Его применение приведет к значительному снижению к. п. д. турбин на расчетном и переменном режимах, а также к другим затруднениям. Отвод тепла при конденсации CO_2 с фиксированным давлением не позволяет регулировать мощность установки только выпуском рабочего тела из цикла при соответствующем изменении расхода топлива, подобно замкнутым ГТУ.

Особые условия работы элементов УКЭУ ограничивают применение в них способов регулирования открытых ГТУ.

Жесткая связь между давлением нагнетания компрессора и давлением конденсации в схеме рис. 1 приводит к резкому уменьшению объемного расхода на входе в компрессор при понижении его оборотов или при повышении давления в конденсаторе. В этих условиях режим работы компрессора приближается к помпажу. Параллельная работа насоса и компрессора в других схемах создает неустойчивую работу этих агрегатов при переменном режиме из-за отличия их характеристик. Таким образом, для организации переменных режимов УКЭУ требуются решения другого характера, учитывающие новые условия в установке. В этих условиях изучение статических переменных режимов целесообразно отделить от динамики регулирования. Если в установке обеспечиваются требуемые по условиям эксплуатации статические режимы, то тогда можно приступить к решению задачи по обеспечению нужного качества переходного процесса. На качество переходного процесса можно влиять в широких пределах соответствующим подбором средств автоматического регулирования. В работе исследованы статические переменные режимы.

Расчет параметров установки при переменном режиме обычно сводится к совместному решению системы уравнений, характеризующих работу всех ее составных элементов. Связь между отдельными параметрами в элементе устанавливается либо детальным расчетом, либо по заранее найденным характеристикам, которые обычно представляются в виде графиков. Непосредственное решение системы уравнений оказывается весьма затруднительным и практически задача решается методом последовательных приближений. Последовательность расчета переменных режимов ПВУ построена на специфических особенностях этих установок и не может быть применена для расчета УКЭУ. Методы расчета переменных режимов ГТУ в основном могут быть применимы для расчета УКЭУ, но требуют корректировки с учетом отклонений свойств CO_2 от свойств идеального газа.

Упрощающими зависимостями для расчета регенераторов ГТУ при исследовании УКЭУ воспользоваться нельзя из-за отклонения в области регенеративного подогрева свойств CO_2 от свойств идеального газа. Из известных методов единственно пригодным для расчета УКЭУ можно признать метод линеаризованных дифференциальных уравнений. Однако, исследование такой сложной установки как УКЭУ (рис. 1) в широком диапазоне изменения режимов требует многочисленных последовательных расчетов с малыми отклонениями режимов. Расчет по этому методу дает только конечные результаты и затрудняет исследование особенностей переменных режимов.

При аналитическом методе расчета на переменный режим УКЭУ необходимо предварительно задаваться рядом исходных параметров, которые затем получаются в результате расчета. Чтобы их значения совпали, требуется очень большое количество приближений. В результате расчеты оказываются практически невыполнимыми. Потребовалась разработка нового метода расчета установки на переменный режим.

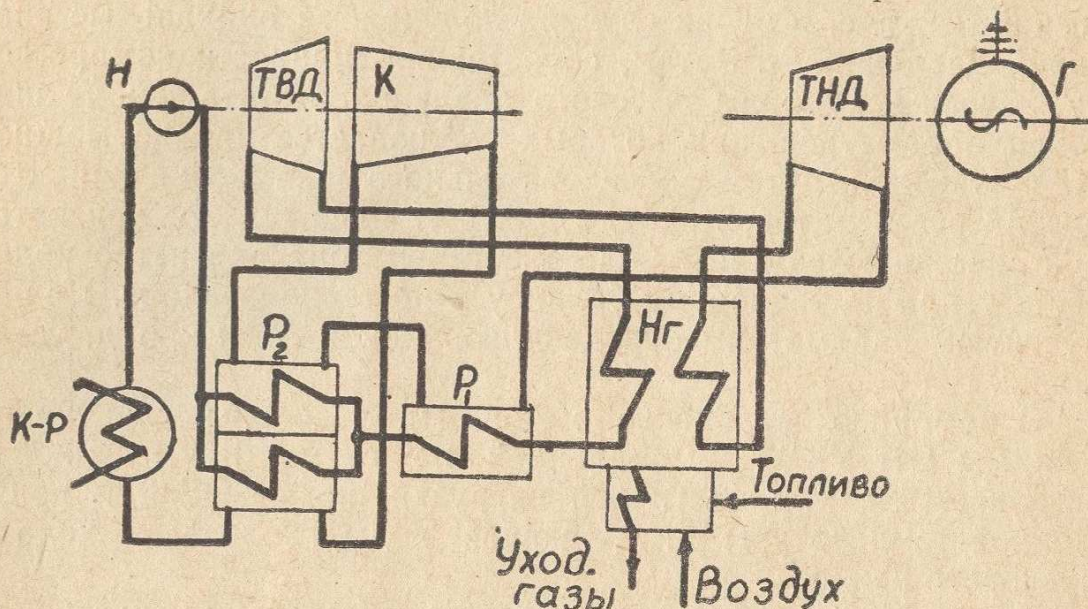


Рис. 1. Схема углекислотной энергетической установки мощностью 50 Мвт:

Н — насос; К — компрессор; ТВД, ТНД — турбины; Г — генератор; Нг — нагреватель (котел); P_1 — основной регенератор; P_2 — комбинированный регенератор; К-р — конденсатор.

Для расчета переменного режима УКЭУ и анализа его особенностей разработан графо-аналитический метод. Расчет по этому методу производится путем графического решения системы зависимостей, описывающих работу элементов установки и состояние рабочего тела на нерасчетном режиме. Решение производится путем последовательного совмещения характеристик агрегатов и тракта (расходные характеристики турбомашин, зависимость сопротивления тракта от расхода CO_2 и т. д.). При пользовании этим методом важно удачно выбрать оси координат графиков. Выбор величин, которые должны быть отложены по осям координат, определяется способом регулирования установки. Но, как правило, этими величинами должен быть параметр, характеризующий выбранный способ обеспечения режима (например, начальная температура для варианта обеспечения режима понижением начальной температуры) и величина, при помощи которой проверяется соответствующий баланс в установке (например, мощность при проверке баланса мощностей в установке или агрегате). В опытно-промышленной установке (рис. 1) пара-

метры при частичной нагрузке по данному методу определялись следующим образом. Первоначально, при принятом весовом расходе в цикле, расчетом участков «насос-турбины» и «конденсатор-компрессор» определялись число оборотов вала насоса n_n , температура перед компрессором t_1 и начальная температура цикла t_8 (для варианта обеспечения режима понижением температуры t_8), при которых процессы цикла замыкаются, т. е. в обоих случаях получаются одинаковые значения давления P_1 . Затем, сопоставляя мощности компрессора, насоса и турбины высокого давления, выбирались те значения параметров, при которых соблюдается баланс мощностей. Наконец, путем последовательного построения характеристик регенераторов определялась температура t_1 , при которой соблюдаются для каждого регенератора равенство количеств тепла по тепловому балансу и по теплопередаче. По полученным параметрам определялись мощность и к. п. д. установки.

С помощью указанного метода исследованы следующие режимы ОП УКЭУ, выполненной по схеме, примененной в эскизном проекте: частичной нагрузки, повышенной и пониженной температуры охлаждающей воды, холостого хода и пускового режима.

Рассмотрим следующие способы обеспечения частичной нагрузки:

1. Поворотом направляющих лопаток, первой ступени турбин.
2. Дросселированием потока за турбиной высокого давления.
3. Понижением начальной температуры перед ТВД.
4. Рециркуляцией углекислоты в компрессоре.
5. Байпасированием турбины высокого давления.
6. Байпасированием турбины низкого давления.

Из всех рассмотренных способов самым неэкономичным оказалось байпасирование ТНД (6). Это объясняется тем, что при этом способе наряду с введением дополнительных потерь от дросселирования для предотвращения повышения оборотов вала ТВД (из-за роста ее мощности) необходимо снижать начальную температуру в установке. Наилучшие результаты по к. п. д. показал поворот направляющих лопаток (1). При всех рассмотренных способах регулирования частичная нагрузка обеспечивалась уменьшением расхода рабочего тела через турбины с понижением давления перед ними. Начальное давление уменьшалось понижением оборотов насоса.

По устойчивости работы компрессора наиболее надежными оказались способы (4, 6), так как у них при снижении мощности весовые расходы через компрессор меняются не-

значительно. При остальных способах регулирования, из-за значительного уменьшения объемного расхода с понижением оборотов, компрессор попадает в помпаж.

Установлено, что каждый из рассмотренных способов регулирования не может одновременно обеспечить и высокую экономичность, и надежную работу. Как у пароводяной установки в УКЭУ с повышением температуры охлаждающей воды в соответствии с изменением теплообмена в конденсаторе повышается температура конденсации CO_2 , при этом в УКЭУ мощность и к. п. д. снижаются больше, чем у ПВУ.

В двухвальных установках мощность снижается в большей мере, чем у одновальных, так как баланс мощности в двухвальной установке в этом случае достигается при пониженном числе оборотов. При этом, вследствие роста уровня давлений и уменьшения расхода, режим работы компрессора приближается к зоне помпажа.

При понижении температуры охлаждающей воды мощность установки возрастает, а к. п. д. остается неизменным. Росту к. п. д. в этом случае препятствует ухудшение комбинированной регенерации из-за снижения степени повышения давления в компрессоре. Снижение мощности установки при повышении температуры охлаждающей воды можно уменьшить включением промежуточной компрессорной ступени для повышения давления в конденсаторе. Включение компрессорной ступени позволяет сохранить параметры во всех точках схемы (кроме конденсатора) близкими к расчетным и, таким образом, обеспечить устойчивую работу компрессора и минимальное снижение мощности и к. п. д. установки. В эксплуатации температура охлаждающей воды может достичь значений, при которых температура CO_2 на входе в насос превысит критическую температуру $31,01^\circ\text{C}$ и давление отвода тепла превысит критическое давление 73,8 бар. Несмотря на это, теплофизические свойства CO_2 на входе в насос будут близки к свойствам жидкой CO_2 , так как точка, соответствующая параметрам состояния CO_2 перед насосом, будет находиться на диаграмме $T-S$ значительно левее критической точки, вследствие переохлаждения CO_2 при сверхкритическом давлении.

Способы пуска существующих установок не могут быть применены в УКЭУ из-за требуемой огромной мощности пускового двигателя. Был разработан способ пуска УКЭУ, позволяющий применить пусковой двигатель минимальной мощности. Для этого установка перед пуском разделяется на два контура: контур высокого давления «насос—ТВД» и контур низкого давления «компрессор—ТНД» (см. рис. 1). Первый контур заполняется жидкой углекислотой, второй — газообразной при давлении 1 бар. Так как в момент раскручивания

плотность CO_2 в компрессоре в 18 раз меньше, чем на расчетном режиме, то работа сжатия оказывается незначительной. В этом случае для пуска установки мощностью 50 Мвт требуется пусковой двигатель мощностью 500 квт. В ОП УКЭУ можно организовать надежную работу на переменном режиме. Однако экономичность на этих режимах при соответствующих по надежности способах регулирования существенно ниже, чем у ПВУ и ЗГТУ, и близка к экономичности разомкнутых ГТУ.

Г л а в а II — СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ДАЛЬНЕЙШЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНТРОПИЙНОГО МЕТОДА

Для выявления узких мест работы установки на переменном режиме сопоставим при помощи термодинамического анализа работу установки на номинальном и переменном режимах. Из существующих методов термодинамического анализа целесообразно воспользоваться энтропийным методом расчета эксергетических потерь. По энтропийному методу коэффициент термодинамического совершенства установки η равен

$$\eta = 1 - \sum \Omega_i \quad (1)$$

$$\Omega_i = T_0 \frac{\Delta S_i}{BQ_p^n} \quad (2)$$

где T_0 — абсолютная температура окружающей среды, ΔS_i — изменение энтропии i -го узла, BQ_p^n — вводимая в установку исходная организованная энергия. Используя аддитивные свойства эксергетических потерь, можно упростить анализ. Действительно, зная распределение потерь в установке при одних условиях ее работы, путем учета изменения приращения энтропии можно установить распределение и величины потерь в новых условиях работы. Идентичность процессов установки на номинальном и переменном режимах позволяет по изменению потерь судить о работе установки на переменном режиме.

Для расширения возможностей термодинамического анализа выполнены дальнейшие разработки энтропийного метода с получением зависимостей коэффициентов эксергетических потерь Ω_i от исходных показателей установки и ее элементов. В качестве исходных показателей выбраны граничные

температуры цикла (начальная T_3 , окружающей среды T_0), количество промежуточных перегревов z , степени изменения давлений в машинах (турбине — ϵ_T , компрессоре — ϵ_K , насосе — ϵ_H), внутренний к. п. д. турбомашин (турбин — η_T , компрессора — η_K , насоса — η_H), температурные напоры в теплообменниках (регенераторе $\Delta T_{\text{рег}}$, конденсаторе — ΔT_{K-P}), относительное сопротивление по тракту — Δp .

Воспользовавшись формулами для вычисления энтропии и тепла идеальных газов, приращение энтропии и количество тепла в формулах эксергетических потерь выразим через параметры процессов. Погрешности вычисления по этим формулам параметров реального газа компенсируем поправочными коэффициентами, определенными из таблиц состояния реального газа. В этом случае потери Ω_i можно представить в виде произведения трех комплексов: постоянного комплекса C_i для данного термодинамического цикла; переменного комплекса F_i , характеризующего необратимость процесса; комплекса K_i , отражающего дополнительное влияние на потери изменения параметров цикла.

$$\Omega_i = C_i \cdot F_i \cdot K_i. \quad (3)$$

Комплексы C_i и F_i определяются без особого труда, если известна конфигурация цикла и параметры, характеризующие необратимость рассматриваемого процесса. Комплекс K_i является сложной функцией от ϵ_H , ϵ_T и $\frac{W_r}{W_0}$ — отношения водяных эквивалентов греющей и обогреваемой среды в регенераторе. Для упрощения и ускорения расчета эксергетических потерь на ЭВМ вычислены значения комплекса K_i при различных значениях ϵ_H , ϵ_T и $\frac{W_r}{W_0}$. По вычисленным значениям построены графики изменения комплексов K_n , $K_{\text{рег}}$, K_q , входящих в соответствующие потери. Графики пригодны для расчета потерь при других исходных данных, отличающихся от тех, которые приняты при их построении. Для этого определяются модельные значения величин ϵ_H , ϵ_T и $\frac{W_r}{W_0}$. Например, изменение степенного показателя процесса расширения в турбине — m учитывается модельным значением величины ϵ'_T .

$$\epsilon'_T = \epsilon_T^{\frac{m'}{m}}. \quad (4)$$

При помощи графиков удобно определять изменение потерь при изменении параметров цикла, если известны потери при первоначальных параметрах и новые параметры установ-

ки. Исключив из уравнений потерь постоянные и маломеняющиеся величины, получаем удобный способ вычисления изменения потерь при подводе $\Delta\Omega'_n$, регенерации $\Delta\Omega'_{\text{рег}}$, отводе $\Delta\Omega'_{\text{отв}}$, а также процессов сжатия в насосе и компрессоре $\Delta\Omega'_{\text{сж,н}}$ и $\Delta\Omega'_{\text{сж,к}}$, расширения $\Delta\Omega'_p$ и дросселирования $\Delta\Omega'_{\text{др}}$.

$$\Delta\Omega'_n = \Omega_n \left(\frac{K'_n}{K_n} - 1 \right) \frac{(T_o/T_8)'}{T_o/T_8}, \quad (5)$$

$$\Delta\Omega'_{\text{рег}} = \Omega_{\text{рег}} \left(\frac{K'_{\text{рег}} \cdot \Delta T'_{\text{рег}}/T'_8}{K_{\text{рег}} \cdot \Delta T_{\text{рег}}/T_8} - 1 \right) \cdot \frac{(T_o/T_8)'}{T_o/T_8}, \quad (6)$$

$$\Delta\Omega'_{\text{отв}} = \Omega_{\text{отв}} \left(\frac{K_q \cdot \Delta T'_{\text{к-р}}}{K'_q \cdot \Delta T_{\text{к-р}}} - 1 \right) \cdot \frac{T_o \cdot T_8}{(T_o \cdot T_8)'}, \quad (7)$$

$$\Delta\Omega'_p = \Omega_p \left[\frac{K_q (1 - \alpha_\eta \cdot \eta_\tau)' \cdot \ln \varepsilon'_\tau}{K'_q (1 - \alpha_\eta \cdot \eta_\tau) \cdot \ln \varepsilon_\tau} - 1 \right] \cdot \frac{(T_o/T_8)'}{T_o/T_8}, \quad (8)$$

$$\Delta\Omega'_{\text{сж,н}} = \Omega_{\text{сж,н}} \left[\frac{K_q \cdot \ln (T_5/T_5)'}{K'_q \cdot \ln (T_5/T_5')} - 1 \right] \frac{(T_o/T_8)'}{T_o/T_8}, \quad (9)$$

$$\Delta\Omega'_{\text{сж,к}} = \Omega_{\text{сж,к}} \left[\frac{K_q (1/\beta_\eta \cdot \eta_\kappa - 1)' \ln \varepsilon'_\kappa}{K'_q (1/\beta_\eta \cdot \eta_\kappa - 1) \ln \varepsilon_\kappa} - 1 \right] \frac{(T_o/T_8)'}{T_o/T_8}, \quad (10)$$

$$\Delta\Omega'_{\text{др}} = \Omega_{\text{др}} \left(\frac{K_q \cdot \ln \frac{1}{1 - \Delta \bar{P}'}}{K'_q \cdot \ln \frac{1}{1 - \Delta \bar{P}}} - 1 \right) \frac{(T_o/T_8)'}{T_o/T_8}, \quad (11)$$

где T_5 и T_5' — температуры за насосом при действительном и изоэнтропическом сжатии; α_η и β_η — коэффициенты в формулах.

Формулы (5) — (11) и соответствующие им графики удобны для анализа эксергетических потерь в установке. В сочетании с графо-аналитическим методом они позволяют анализировать переменные режимы УКЭУ.

Глава III — ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УГЛЕКИСЛОТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

При помощи энтропийного метода исследованы номинальные режимы УКЭУ, работающих по циклам 1, 2 и 3 (рис. 2).

Определение эксергетических потерь в установке на номинальном режиме необходимо для исследования переменных режимов. Используя аддитивные свойства потерь, по потерям в установке на номинальном режиме простым учетом их приращения определялись потери при переменном режиме. Аналогично эксергетические потери в реальном цикле на номинальном режиме определялись по потерям соответствующего идеального цикла. Так как в УКЭУ при переменном режиме

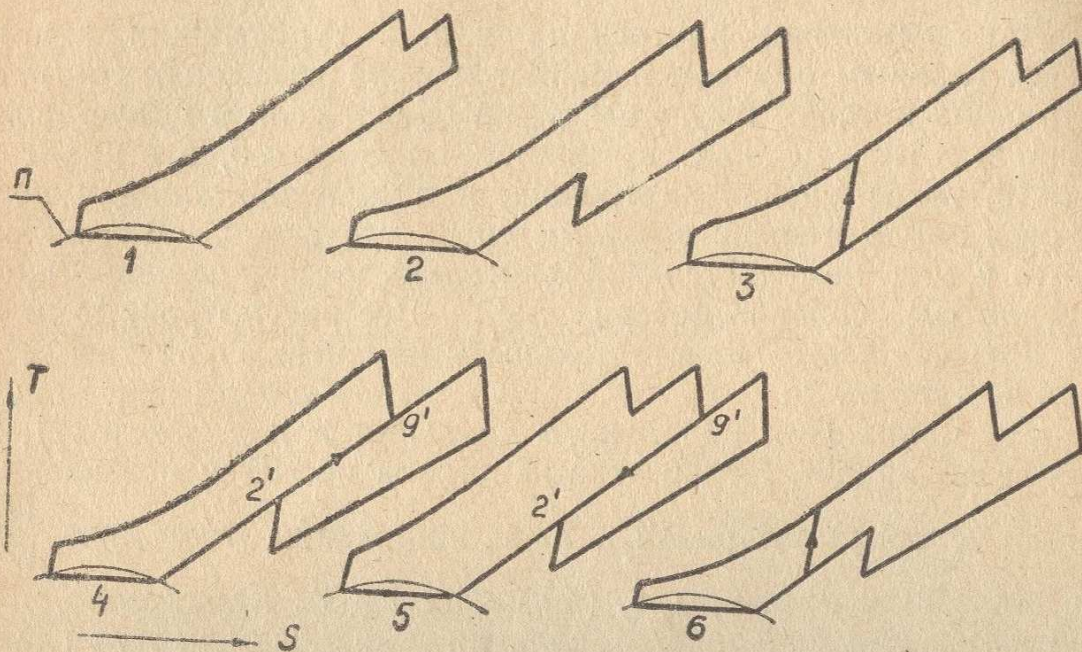


Рис. 2. Циклы в T—S диаграмме углекислотных энергетических установок.

п — пограничная кривая; 2'—9' — линия перепуска.

меняются параметры и к. п. д. машин, исследовано влияние сопротивления тракта, внутренних к. п. д. турбомашин, начального давления и температуры на эксергетические потери и к. п. д. циклов 1, 2 и 3. В оптимальной схеме УКЭУ должны сочетаться оптимальный номинальный режим с минимальным снижением к. п. д. при переменном режиме. Исследовано также влияние удельной поверхности нагрева регенераторов $\frac{F}{N}$, м²/квт, на к. п. д. цикла и выбрана оптимальная величина $\frac{F}{N}$ в зависимости от стоимости топлива. Потери определялись по вышеописанному способу. Рассмотрены циклы без промежуточного перегрева и с одним промежуточным перегревом. В циклах с промежуточным перегревом степени понижения давлений в турбинах и температуры перед ними принимались одинаковыми.

При увеличении сопротивлений по тракту в цикле 2 снижение к. п. д. оказывается меньше, чем в циклах 1 и 3. В данном случае в цикле 2 из-за высокого значения величины ϵ_T к. п. д. снижается в основном из-за роста потери $\Delta\Omega_{др}$. В циклах 1 и 3 при начальном давлении 230 бар и ниже снижение к. п. д. цикла превышает рост потери $\Delta\Omega_{др}$, из-за роста потери $\Delta\Omega_{рег}$. Эти циклы являются более чувствительными к изменению сопротивления тракта, так как у них малая степень понижения давления.

При изменении внутренних к. п. д. турбомашин к. п. д. цикла главным образом изменяется из-за изменения соответствующих потерь $\Delta\Omega_p$, $\Delta\Omega_{сж,н}$, $\Delta\Omega_{сж,к}$, если в цикле величина $\epsilon_T > 10$. Так как в циклах 1 и 3 $\epsilon_T < 5$, а в цикле 2 $\epsilon_T > 10$, то изменение внутренних к. п. д. турбомашин в последнем цикле меньше сказывается на его к. п. д. В циклах 1 и 3 к. п. д. изменяется дополнительно из-за изменения прочих потерь, особенно потери $\Delta\Omega_{рег}$. Все рассмотренные циклы больше всего чувствительны к изменению внутреннего к. п. д. турбин.

При понижении начального давления к. п. д. циклов 1, 2 и 3 резко падает. Недостатками циклов является повышение в этих условиях потери $\Delta\Omega_{рег}$ из-за понижения отношения $\frac{W_r}{W_0}$ (в цикле 2) и величины ϵ_T (в циклах 1 и 3). Характерно, что при изменении начального давления к. п. д. изменяется главным образом из-за изменения потери $\Omega_{рег}$. Поэтому в циклах 1, 2 и 3 оптимальное начальное давление соответствует минимальным значениям потерь $\Omega_{рег}$. Так как в УКЭУ при частичных нагрузках начальное давление снижается, то поиски путей сохранения высокого к. п. д. установки при пониженном начальном давлении помогут создать высокоэкономичную схему в широком диапазоне изменения нагрузок.

Анализ потерь показал, что поиски цикла с высоким к. п. д. при пониженных начальных давлениях следует вести по пути достижения высоких значений $\frac{W_r}{W_0}$ и ϵ_T .

Перед исследованием влияния величины поверхности нагрева регенераторов на к. п. д. цикла была установлена связь между изменением сопротивления регенератора и изменением величины $\frac{F}{N}$, а также связь между сопротивлением греющей и обогреваемой среды регенераторов в циклах 1, 2 и 3. Для этого использовались конструктивные проработки регенераторов, выполненные ОТИ им. М. В. Ломоносова, ХТЗ имени С. М. Кирова и Ленфилиалом института «Оргэнергострой».

Также установлена связь между средним температурным

напором $\Delta t_{\text{ср}}$, непосредственно влияющим на размеры поверхности нагрева регенераторов, и разностью среднетермодинамических температур $\Delta T_{\text{рег}}$, непосредственно влияющей на потерю $\Omega_{\text{рег}}$. Доказано, что в заданных условиях минимальное значение потери $\Omega_{\text{рег}}$ достигается при $\Delta t_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{рег}}$. На примере исследования теплообмена между идеальными газами установлено, что равенство $\Delta t_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{рег}}$ и минимальное значение потери $\Omega_{\text{рег}}$ достигается в том случае, когда

$$\frac{\Delta T_{\text{г}} \cdot T_1''}{\Delta T_{\text{х}} \cdot T_1'} = 1, \quad (12)$$

где $\Delta T_{\text{г}}$ — температурный напор на горячем конце регенератора;

$\Delta T_{\text{х}}$ — на холодном конце регенератора, T_1'' — температура греющего газа на выходе из генератора, T_1' — на входе в регенератор.

Показана пригодность равенства (12) для регенераторов УКЭУ. При изменении $\frac{F}{N}$ к. п. д. циклов 1, 2 и 3 изменяются главным образом из-за изменения потери $\Omega_{\text{рег}}$. При малых величинах $\frac{F}{N}$, порядка 0,1 м²/квт и менее, циклы 1, 2 и 3 имеют близкие по значению к. п. д. При значениях $\frac{F}{N} = 0,4 \div 0,5$ м²/квт циклы 2 и 3 имеют, примерно, одинаковый к. п. д., превышающий на 4% к. п. д. цикла 1. При $\frac{F}{N} > 0,6$ м²/квт к. п. д. цикла 3 вырастает на 2% по сравнению с циклом 2. Это объясняется тем, что при снижении $\frac{F}{N}$ отношение $\frac{\Delta T_{\text{рег}}}{\Delta t_{\text{ср}}}$ уменьшается во всех циклах, но в цикле 1 это снижение больше, что приводит к менее резкому росту потери $\Omega_{\text{рег}}$.

Зависимость к. п. д. цикла от величины $\frac{F}{N}$ использовалась в работе для определения оптимальной величины поверхности нагрева регенераторов на номинальном режиме, которая в цикле 2 при стоимостях топлива 2—10 руб/т.у.т. колеблется в пределах 0,3—0,6 м²/квт. В цикле 3 оптимальная поверхность нагрева регенераторов на 30% больше, чем в цикле 2.

Г л а в а IV — ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ УГЛЕКИСЛОТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Выше было отмечено, что в УКЭУ можно организовать надежный переменный режим. Дальнейшее его исследование

связано с поиском путей улучшения переменных режимов и разработкой оптимального способа регулирования. Для этого в работе предварительно исследованы при помощи графо-аналитического метода в сочетании с энтропийным методом УКЭУ, работающие по известным циклам 1, 2 и 3, на переменный режим и выяснены преимущества и недостатки каждой схемы. При этом были рассмотрены следующие различные схемы взаимного расположения турбомашин:

а) одновальные схемы, в которых все турбомашинны расположены на общем валу;

б) одновальные с выделенным на самостоятельный вал турбонасосом;

в) двухвальные схемы с силовой турбиной низкого давления;

г) двухвальные схемы с силовой турбиной высокого давления.

Рассмотрены режимы частичной нагрузки, повышенной и пониженной температуры охлаждающей воды, пусковые режимы.

Наилучшие показатели на частичной нагрузке имеют одновальные схемы с выделенным турбонасосом, среди которых лучшей является установка, работающая по циклу 1 (схема 1-б). У двухвальных установок на частичной нагрузке лучшие показатели имеет схема 3-в (цикл 3, двухвальная схема с силовой турбиной низкого давления). Общим недостатком остальных схем на частичной нагрузке является резкое падение к. п. д. из-за роста потерь $\Omega_{\text{рег}}$ и $\Omega_{\text{др}}$. Потеря $\Omega_{\text{рег}}$ растет из-за роста отношения $\frac{\Delta T_{\text{рег}}}{\Delta t_{\text{ср}}}$ в условиях понижения величины $\frac{W_{\text{г}}}{W_{\text{о}}}$, а потеря $\Omega_{\text{др}}$ из-за включения в схемах, работающих по циклам 2 и 3, рециркуляции в компрессоре для обеспечения беспомпажной его работы.

При повышении температуры охлаждающей воды во всех рассмотренных схемах снижаются к. п. д. и мощность. В схемах 1-б, 2-б и 3-б имеется возможность сохранить расчетную мощность установки на этом режиме путем повышения оборотов турбонасоса. Минимальное снижение к. п. д. наблюдается в одновальной схеме 1-б и двухвальной схеме 3-в. Однако, в последней очень сильно снижается мощность установки. В остальных схемах на этом режиме дополнительно увеличивается потеря $\Omega_{\text{др}}$ из-за увеличения в циклах 2 и 3 рециркуляции CO_2 в компрессоре. Это необходимо для обеспечения расчетного объемного расхода в компрессоре при повышенных в нем плотностях CO_2 .

Пуск установок, выполненных по схемам 1-б, 2-б, 3-б, 2-в

и 3-в, можно осуществлять двигателем обычной мощности (1—2% от электрической мощности установки).

Минимальное снижение к. п. д. при переменных режимах имеет схема 1-б, которая на номинальном режиме имеет на 17—20% меньший к. п. д., чем схемы 2-б и 3-б. Оптимальные на номинальном режиме схемы 2-б и 3-б имеют значительное снижение к. п. д. при переменном режиме. Поиски оптималь-

Таблица 1

Изменение к. п. д. и эксергетических потерь в УКЭУ при переменном режиме (понижение нагрузки на 30%, изменение температуры охлаждающей воды на -10°C и $+15^{\circ}\text{C}$)

Схемы Режим	1—б			2—б			3—б		
	$\bar{N}=0,7$	-10°C	$+15^{\circ}\text{C}$	$\bar{N}=0,7$	-10°C	$+15^{\circ}\text{C}$	$\bar{N}=0,7$	-10°C	$+15^{\circ}\text{C}$
Потери									
$\Delta\Omega_n$	—	-1,0	+2,0	+0,4	-1,3	+2,0	-0,5	-1,2	+2,1
$\Delta\Omega_{\text{рег}}$	+2,5	—	—	+0,6	—	—	—	—	—
$\Delta\Omega_{\text{отв}}$	—	—	+0,2	—	+1,3	—	+0,4	+1,2	—
$\Delta\Omega_{\text{сж}}$	—	—	—	+0,8	-0,2	+0,3	+1,0	-0,2	+0,6
$\Delta\Omega_p$	—	+0,2	+0,3	—	-0,3	+0,5	—	-0,2	—
$\Delta\Omega_{\text{др}}$	-0,4	—	+0,2	+2,5	-0,2	+5,0	+4,5	-0,2	+3,0
$\Delta\eta = -\Sigma\Delta\Omega_i$	-2,1	+0,8	-2,7	-4,3	+0,7	-7,8	-5,4	+0,6	-5,7

ного способа обеспечения переменных режимов этих схем следует вести в направлении уменьшения роста эксергетических потерь путем поддержания постоянной начальной температуры, снижения потери $\Omega_{\text{рег}}$ за счет обеспечения оптимального значения величины W_r/W_o , снижения потери $\Omega_{\text{др}}$, обеспечения оптимальных расходов рабочего тела через турбомашину, дающих минимальное снижение внутренних к. п. д. Перечисленные оптимальные условия обеспечиваются в разработанных схемах, описанных ниже.

Глава V — СХЕМЫ УКЭУ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ОПТИМАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА НОМИНАЛЬНОМ И ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМАХ

УКЭУ большой мощности целесообразно выполнять по одновальным схемам с выделенным турбонасосом и работу их организовать по циклу 4 (рис. 2) для установки с начальным давлением 200 бар и по циклу 5 для установок с давлением более высоким (около 500 бар) при двукратном промежуточном перегреве, так как эти циклы обеспечивают высокий к. п. д. на номинальном режиме и минимальное снижение к. п. д. при переменном режиме. При начальной температуре 565/565°C, внутренних к. п. д. машин и сопротивлениях по тракту, принятых из эскизного проекта, к. п. д. машзала установки с циклом 4 равен 47%, а с циклом 5—49%. Циклы 4 и 5 позволяют наилучшим образом решить проблему экономичной установки при переменном режиме, так как в них можно применить разработанный оптимальный способ регулирования, обеспечивающий минимальное повышение эксергетических потерь в установке.

По данному способу при понижении нагрузки расход и теплоперепад контура высокого давления (ТВД—насос) уменьшаются, а контура низкого давления (компрессор—ТНД) меняются лишь в небольшой степени за счет изменения перепуска в линии между нагнетанием компрессора и выхлопом ТВД (ТСД). При таком способе регулирования на частичных нагрузках в регенераторе расход греющей среды возрастает по сравнению с обогреваемой, а отношение $\frac{W_r}{W_o}$ при росте теплоемкости обогреваемой среды удается сохранить оптимальным и свести тепловой баланс в регенераторах без значительного повышения $\Delta T_{рег}$ над $\Delta t_{ср}$, следовательно, без значительного повышения потери $\Omega_{рег}$. Кроме того, изменение перепуска на частичной нагрузке и при повышенной температуре охлаждающей воды позволяет сохранить условия работы компрессора близкими к расчетным без применения рециркуляции с дросселированием. Это позволяет обеспечить при переменном режиме минимальное повышение эксергетических потерь в установке по сравнению с номинальным режимом. Циклы 4 и 5 на переменном режиме имеют такое же небольшое снижение к. п. д. как и схема 1-б. Причем на частичной нагрузке в цикле 5 наблюдается еще меньшее снижение к. п. д., такое же как у ПВУ и ЗГТУ.

Установку средней мощности целесообразно выполнять по двухвальной схеме либо схеме с редуктором между валом

ТНД и валом ТВД и компрессора. В этих схемах введение перепуска при переменном режиме от нагнетания компрессора к выхлопу ТВД также позволяет обеспечить высокие показатели на номинальном и переменном режимах.

На номинальном режиме к. п. д. установки, выполненной по одновальной схеме, ниже к. п. д. установки, выполненной по двухвальной схеме, однако надежность ее работы при переменном режиме более высокая. Поэтому первую опытно-промышленную установку целесообразно выполнять по одновальной схеме с перепуском (рис. 3).

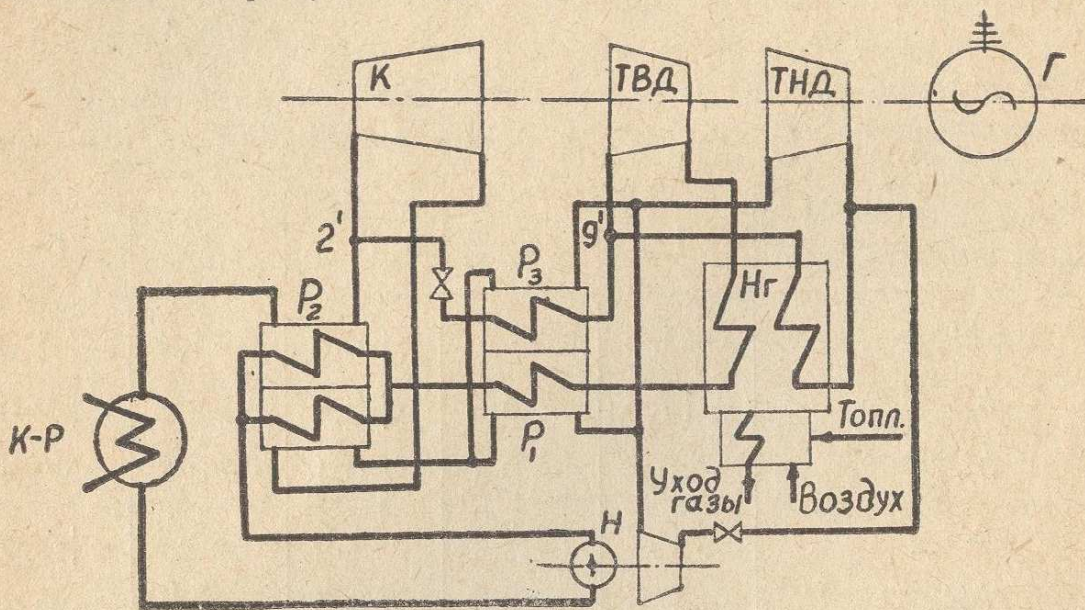


Рис. 3. Схема углекислотной энергетической установки с перепуском. Н, К, ТВД, ТНД, Г, Нг, P_1 , P_2 , К-р, тоже, что на рис. 1; P_3 — регенератор перепуска; 2'—9' — перепуск.

Принципы обеспечения оптимальных переменных режимов имеют аналогию с созданием оптимальных схем УКЭУ с пониженным начальным давлением в цикле. Работу подобных УКЭУ целесообразно организовать по циклу 4 в установках с промежуточным перегревом и циклу 6 в установках без промежуточного перегрева. В этом случае при понижении начального давления до 120 бар удастся сохранить практически почти такое же значение к. п. д. как и в цикле 2 при начальном давлении 200 бар, в то время как во всех известных циклах к. п. д. в этом случае резко снижается. При понижении начального давления в циклах 4 и 6, в противоположность циклам 1, 2 и 3, потеря $\Omega_{\text{пер}}$ мало меняется, так как за счет увеличения расхода в линии перепуска в цикле 4 и сочетания сквозного сжатия с комбинированной регенерацией в цикле 6 удастся компенсировать повышение теплоемкости обогреваемой среды в регенераторах и сохранить близким к оптимальному отношение $\frac{\Delta T_{\text{пер}}}{\Delta t_{\text{сп}}}$.

Для установок с уровнем давлений в первичном нагревателе 30—60 бар целесообразно применить схему УКЭУ с комбинированной регенерацией (подобно схемам рис. 1 и 3), в которой нагреватель установлен после ТВД. Это позволяет при пониженном давлении в нагревателе сохранить преимущества цикла 2 при начальном давлении 200 бар, так как величины ϵ_T и $\frac{W_r}{W_o}$, определяющие потери, в обоих циклах близки по численным значениям. В этом случае установка при

Т а б л и ц а 2

Изменение к. п. д. и эксергетических потерь в циклах при понижении начального давления от 200 бар до 120 бар

Потери \ Циклы	1	2	3	4	6
$\Delta\Omega_n$	-1,5	-	+0,3	-1,4	-1,0
$\Delta\Omega_{рег}$	+12,5	+5,4	+8,1	+2,2	+2,0
$\Delta\Omega_{отв}$	-0,7	-0,1	+0,1	-0,6	-0,3
$\Delta\Omega_{сж}$	+0,2	-	-1,0	-	+0,5
$\Delta\Omega_p$	-0,6	-0,3	-0,5	-0,7	-0,6
$\Delta\Omega_{др}$	+0,6	+0,4	+0,6	+1,7	+0,6
$\Delta\eta = -\Sigma\Delta\Omega_i$	-10,5	-5,4	-7,6	-1,2	-1,2

начальной температуре 675°C и давлении в нагревателе 60 бар имеет к. п. д. 48%. При этом можно создать компактные агрегаты большой единичной мощности, существенно сократить размеры промежуточных теплообменников CO₂, по сравнению с парогенераторами ПВУ.

Во всех схемах удачно решаются вопросы переменного режима, если в них вводить перепуск. При применении разработанного для цикла 2 способа пуска так же удачно решаются вопросы пуска установок двигателем сравнительно небольшой мощности.

В ы в о д ы

1. Принципиальные особенности углекислотного цикла не позволяют применить в УКЭУ способы регулирования существующих установок. Сложные условия обеспечения стати-

ческих переменных режимов затрудняют применение для расчета и анализа УКЭУ известных методов расчета на переменный режим.

2. Для расчета переменных режимов УКЭУ разработан графо-аналитический метод, позволяющий путем совмещения характеристик турбомашин, тракта, теплообменных аппаратов и т. п. рассчитать и проанализировать работу на переменном режиме УКЭУ любой сложности.

3. Выполненный анализ переменных режимов опытно-промышленной установки при различных способах регулирования и анализ других возможных схем УКЭУ показал, что у них можно организовать надежный переменный режим. Однако, ни одна из известных схем не может одновременно обеспечить экономичные номинальный и переменный режимы.

4. При создании оптимальной установки должны быть решены совместно вопросы оптимального номинального режима и переменного режима с минимальным снижением к. п. д. Эта задача может быть решена путем анализа установки графо-аналитическим методом вместе с энтропийным методом термодинамического анализа. С этой целью проведены работы по дальнейшему развитию энтропийного метода с получением зависимостей эксергетических потерь от исходных параметров установки.

5. Анализ изменения эксергетических потерь в установках позволил разработать оптимальные способы обеспечения переменных режимов и оптимальные схемы УКЭУ большой и средней мощности, обеспечивающие высокий к. п. д. на номинальном режиме и минимальное снижение к. п. д. при переменном режиме.

6. Введение перепуска между нагнетанием компрессора и выхлопом ТВД и изменение его при переменном режиме позволяют наилучшим образом организовать экономичные переменные режимы, при которых обеспечивается минимальное повышение эксергетических потерь.

7. Наилучшим решением по обеспечению надежной работы установки при повышенной температуре охлаждающей воды является установка дополнительного компрессора, который включается на этих режимах для повышения давления в конденсаторе при сохранении неизменными параметров остальных агрегатов.

8. Для полной оценки эксплуатационных возможностей УКЭУ выполнены разработки пусковых схем. Разделение цикла на два контура позволило свести к минимуму требуемую мощность пускового двигателя.

9. Если давление в первичном нагревателе ограничено значениями 100 ÷ 140 бар, целесообразно объединение комби-

нированной регенерации и сквозного сжатия. Эта схема позволяет достичь значительно более высокого к. п. д. — 47%.

10. Размещение нагревателя между турбинами высокого и низкого давления позволяет создать УКЭУ с пониженным давлением в первичном нагревателе. Такая установка будет иметь к. п. д. на 16% выше, чем к. п. д. современных станций, работающих на водяном паре того же давления.

11. В целом разработки показывают большую перспективу применения УКЭУ на различных электростанциях благодаря высокому их к. п. д. на номинальном и переменном режимах.

12. В результате настоящей работы в эскизном и техническом проектах были выбраны принципиальная схема, термодинамические параметры и способы обеспечения переменных режимов опытно-промышленной установки. Полученные в работе результаты могут быть использованы также при создании углекислотных установок большой мощности.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Д. П. Гохштейн, В. Л. Дехтярев, А. И. Козорез и др. Углекислотная энергетическая установка средней мощности. Энергомашиностроение, № 11, 1964.

2. А. И. Козорез. Исследование углекислотных энергетических установок на переменный режим. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по термодинамике. Одесса, 1964.

3. А. И. Козорез. Применение графо-аналитического метода для расчета углекислотных энергетических установок на переменный режим. Известия вузов, Энергетика, № 10, 1966.

4. В. Л. Дехтярев, А. И. Козорез, Е. К. Олесевиич. Способ пуска теплосиловой установки на низкокипящих веществах. Авторское свидетельство № 182178, кл. 14 h, 6 от 14.IX.1964 г. Бюллетень изобретений, № 11, 1966.

5. В. Л. Дехтярев, А. И. Козорез. Способ работы теплосиловой установки на низкокипящих веществах. Авторское свидетельство № 205028, кл. 14 h, 6 от 2.VII.1965 г. Бюллетень изобретений, № 23, 1967.

6. В. Л. Дехтярев, А. И. Козорез. Переменные режимы углекислотной энергетической установки. Энергомашиностроение № 5, 1968.

7. Д. П. Гохштейн, В. Л. Дехтярев, А. И. Козорез. Термодинамический анализ и усовершенствование циклов углекислотных энергетических установок. Тезисы доклада на Всесоюзной конференции по термодинамике. Ленинград, 1968.

8. В. Л. Дехтярев, И. С. Миронов, В. А. Долгозвяг, А. И. Козорез. О динамике регулирования мощ-

ности углекислотной энергетической установки. Известия вузов. Энергетика, № 9, 1968.

9. П. Н. Платонов, В. Л. Дехтярев, И. С. Миронов, А. И. Козорез и др. Система автоматического управления энергетической установкой на низкокипящем веществе и исследование способов оптимального управления с учетом изменения свойств объекта. Тезисы докладов на IV Всесоюзном совещании по технической кибернетике. Тбилиси, 1968.

10. Тезисы докладов на XXVI—XXVIII научных конференциях Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова, Одесса, 1964—1966 г.

В журнале Brennstoff—Wärme—Kraft, № 2, 1967 г. опубликован расширенный реферат статьи (Л. 1).

Библиографический список литературы
в журнале "Энергетика" № 9, 1968 г.
Исследования в области автоматического управления
энергетической установкой на низкокипящем веществе