

На правах рукописи  
УДК 621.438

**МОРОЗЕНКО Мария Ивановна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТУ С  
ВПРЫСКОМ ПАРА И ВОДОГРЕЙНЫМ КОТЛОМ**

**Специальность 05.04.12 –Турбомашины и комбинированные  
турбоустановки**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**



2002

Tym;

Актуальность работы. Совершенствование тепловых двигателей идет по пути увеличения КПД и коэффициента использования тепла топлива. На современном этапе развития энергетики все большее внимание уделяется внедрению энергосберегающих технологий, повышению эффективности преобразования содержащейся в топливе энергии в электричество и тепло.

В сложившихся экономических условиях требуется определенное изменение в стратегии развития отечественной теплоэнергетики. В этой связи необходимо отметить преимущество комбинированного производства электроэнергии и тепла, дающего большую экономию топлива в сравнении с раздельным производством требуемых видов энергий. А при современном уровне производства каждый грамм снижения удельного расхода топлива на отпущенный киловатт-час эквивалентен годовой экономии 1млн.т. топлива в условном исчислении. В последние годы газотурбинные установки с впрыском пара получают все более широкое применение как энергетические установки малой и средней мощности во многих странах мира. Исследование контактных ГТУ ведётся в следующих направлениях: анализ различных режимов работы и проектирование установок изначально контактного типа с разработкой соответствующих математических моделей. Качественный скачок может быть достигнут в результате использования ГТУ с впрыском пара в качестве когенерационных установок, что позволяет, в свою очередь, не только увеличить удельную мощность и КПД, улучшить экологическую обстановку, но и увеличить общий коэффициент использования тепла топлива. Поэтому созданная в работе методика расчета комбинированной ГТУ с впрыском пара, позволяющая проводить термодинамический анализ и значительно повысить эффективность ГТУ, является актуальной.

Цель работы – разработка математической модели и исследование эффективности контактной ГТУ с утилизацией выхлопа. Для достижения поставленной цели ставились и решались следующие задачи:

1. Разработать математическую модель расчета удельных параметров цикла комбинированной ГТУ с впрыском пара и утилизационным водогрейным котлом (УВК) с реализацией на ПЭВМ.
2. Разработать математическую модель УВК конденсационного типа.
3. Исследовать характеристики комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК конденсационного типа. Провести сравнительный анализ ГТУ-ТЭЦ и комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК.

Научную новизну работы представляют:

1. Математическая модель расчета удельных параметров цикла когенерационной ГТУ с впрыском пара.

2. Рекомендации по расчету коэффициента теплоотдачи в теплообменных аппаратах в цикле комбинированной ГТУ для интегральной оценки теплофизических и массогабаритных характеристик.
3. Математическая модель утилизационного водогрейного котла конденсационного типа.
4. Термодинамическое исследование характеристик ГТУ с впрыском пара и УВК.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

1. Разработан и реализован комплекс программ на ПЭВМ для расчета удельных параметров ГТУ с впрыском пара и УВК конденсационного типа.
  2. Выполнен сравнительный анализ характеристик ГТУ с впрыском пара и УВК с традиционными ГТУ-ТЭЦ. Показано, что выбор параметров цикла комбинированной ГТУ зависит от ее назначения – одноцелевое использование, комбинированная выработка различных видов энергии, преобладание потребностей в покрытии электрической и тепловой нагрузок.
  3. Проведен анализ эффективной работы контактной ГТУ в составе когенерационной установки. Проанализировано влияние стандартных параметров цикла на совместную выработку тепла и электроэнергии.
- Проведены сравнительные расчеты существующих зарубежных и отечественных двигателей различной мощности в составе комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XII Школе – семинаре молодых ученых под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках”, Москва, 1999 г.; на XI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции “Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели”, Москва, 2000 г.; на Всероссийском научно-техническом семинаре имени профессора В.В. Уварова; на Всероссийских научно – технических конференциях по “Созданию прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка”, Калуга, 1996 – 2000 г., на 1-ой Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию, Калуга, 2000 г. По теме диссертации опубликовано 3 статьи, тезисы 7-ми докладов.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 161 машинописный лист, включая 59 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 109 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, определены цели работы, представлена структура диссертации.

В первой главе приведен анализ схем когенерационных установок с ГТУ, который показал:

1. Комбинированная установка с использованием ГТ и УВК (или ПГ) является наиболее простым методом повышения технико - экономических показателей ГТУ. Такие установки позволяют получать тепловую мощность от 26.9 МВт до 670 ГВт (в зависимости от базового двигателя) с коэффициентом использования тепла топлива 0,60 – 0,85 соответственно. Эффективный КПД ГТУ-ТЭЦ может достигать 37-40%.
2. Газотурбинные установки с впрыском пара обеспечивают высокую эффективность использования топлива и могут конкурировать с различными типами установок, а именно ПГУ, ГТУ-ТЭЦ, ПГУ-ТЭЦ. Газотурбинные установки с впрыском пара имеют лучшие характеристики по сравнению с традиционными ПГУ и ПГУ-ТЭЦ: более высокую удельную мощность, которая в высокотемпературных ГТУ с впрыском пара может достигать 1МДж/кг и выше; простоту оборудования; меньшие капитальные затраты; меньшее загрязнение окружающей среды. Газотурбинные установки с впрыском пара находят применение в качестве комбинированных установок с высоким КПД выработки электроэнергии  $\eta_e=40-56\%$  и высоким коэффициентом использования тепла топлива (около 90%). Однако, основной недостаток контактных ГТУ – необходимость обеспечения качества воды, которая теряется с отработавшими газами. Это определяет целесообразность использования теплоты конденсации водяного пара из парогазовой смеси (ПГС), покидающей установку и возвращение конденсата.
3. К исследованию предлагается ГТУ с впрыском пара и утилизационным водогрейным котлом с использованием высокопотенциального тепла для генерации пара в котле - утилизаторе, а низкопотенциального тепла - для получения горячей воды. Охлаждение ПГС в парогенераторе до 150-100<sup>0</sup>С, а в УВК до 30-40 <sup>0</sup>С, позволяет использовать скрытую теплоту конденсации, которая и является основной теплотой УВК. В утилизационном теплообменнике конденсационного типа можно получить количество теплоты, не меньшее, чем в варианте ГТУ-ТЭЦ при существенно более узком диапазоне температур и при росте КПД ГТУ.

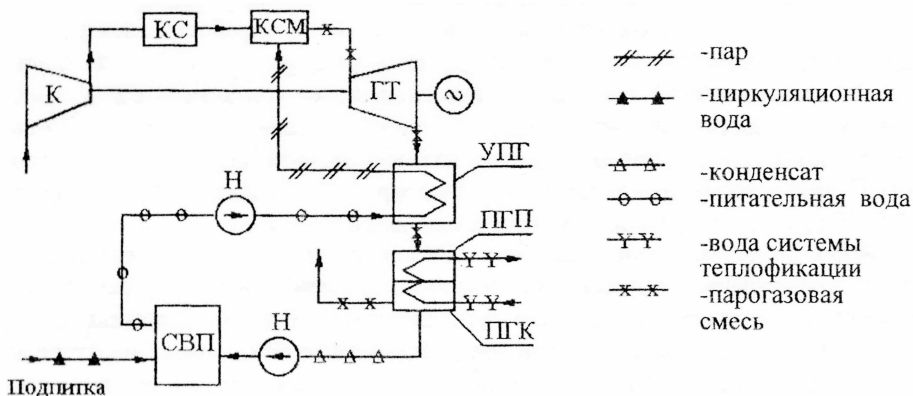
Во второй главе разработана математическая модель ГТУ с впрыском пара и водогрейным котлом (рис.1).

Проведен анализ имеющихся методов расчета контактных и когенерационных установок.

Проведен анализ метода построения термодинамической диаграммы теплового баланса для определения характеристик контактных и когенерационных ГТУ; рассмотрен метод упрощенного термодинамического анализа Л.В. Арсеньева и В.Г. Тырышкина с разделением общего процесса, совершаемого смесью газа и пара в контактной ГТУ на отдельные процессы, определяемые каждым из компонентов рабочего тела; рассмотрен метод расчета комбинированной установки с ГТ и газовым водогрейным котлом с использованием трех базовых режимов (теплообменника, дожигания, сжигания).

Проведена модернизация ранее разработанного энтальпийно – смесового метода расчета и составлена модифицированная методика расчета удельных параметров цикла с целью учета влажности воздуха на входе, типа топлива (жидкое, газообразное), изменения температурного режима на выходе.

Суть энтальпийно - смесового метода заключается в том, что рабочее тело цикла рассматривается как смесь газов, массовый состав которой задан.



*Рис. 1. Схема ГТУ с впрыском пара и водогрейным котлом  
К-компрессор; КС-камера сгорания; КСМ-камера смешения; ГТ-газовая турбина; Н-насос; УПГ-утилизирующий парогенератор; ПГП-парогазовый подогреватель; ПГК-парогазовый конденсатор; СВП-система водоподготовки.*

Зная зависимость термодинамических параметров молярных газов от температуры, можно определить эти же параметры для смеси газов по методу аддитивности. Газовая постоянная:

$$R = 8.3145 \cdot \Sigma (m_i / \mu_i),$$

где  $m_i$ ,  $\mu_i$  - массовая составляющая и молекулярный вес смеси газов.

Энтальпия газа:  $i = \Sigma (i_i(t) \cdot m_i)$ , где  $i_i$  - энтальпия молярного газа при  $t$ , К.

Задав массовый состав атмосферного воздуха с учетом влажности воздуха на входе ( $d_0 = f(\varphi)$ ), можно рассчитать массовый состав продуктов сгорания (в зависимости от вида используемого топлива) и массовый состав парогазовой смеси на входе в турбину (в зависимости от количества впрыскиваемого пара).

Удельная работа компрессора:

$$H_k = i(T_2^*, m_k) - i(T_1^*, m_k);$$

$$T_2^* = T_1^* \cdot \pi_{\kappa}^{(m / \eta_{\text{кпол}})}; \quad C_{pk} = H_k / (T_2^* - T_1^*)$$

Такой подход позволяет моделировать различные атмосферные условия, обеспечивает гибкость в выборе рабочего тела.

Турбина рассчитывается аналогично.

$$H_t = i(T_3^*, m_t) - i(T_4^*, m_t); \quad T_4^* = T_3^* \cdot \pi_{\tau}^{(m \cdot \eta_{\text{тпол}})}; \quad C_{pt} = H_t / (T_3^* - T_4^*);$$

Параметры камеры сгорания и утилизационного парогенератора определяются из уравнений теплового баланса. Основные результаты анализа получены в расчете на единицу массы воздуха, поступающего в компрессор, то есть проведен расчет удельных параметров цикла ГТУ с впрыском пара и ВК.

Показатели контактной ГТУ существенно зависят от введенного пароводяного рабочего тела, масса которого характеризуется удельным расходом пара  $d = G_p / G_r$ . Расход пароводяного рабочего тела образуется из пара, выработанного котлом-утилизатором, из водяных паров продуктов сгорания и влагосодержания атмосферного воздуха.

Относительно высокий уровень температуры уходящих газов позволяет получить насыщенный или перегретый пар без сжигания дополнительного количества топлива. Удельный расход пара в утилизационном парогенераторе определяется уравнением теплового баланса:

$$d = \frac{k_{cm} [i_r(T_4) - i_r(T_5)] \cdot \eta_{\text{пг}}}{i_{\text{п}}(P_{\text{п}}, T_{\text{п}}) - i_{\text{в}}(P_{\text{п}}, T_{\text{в}})}.$$

$K_{cm} = (1+d)(1+g_r)(1-g_{ox}-g_{yr})$ ;  $i_r(T_4)$  - энтальпия парогазовой смеси на выходе из ГТ;  $i_r(T_5)$  - энтальпия ПГС на выходе из УПГ;  $i_{\text{п}}(P_{\text{п}}, T_{\text{п}})$  - энтальпия вводимого в газовый тракт пара;  $i_{\text{в}}(P_{\text{п}}, T_{\text{в}})$  - энтальпия питательной воды;  $\eta_{\text{пг}}$  - КПД УПГ. Найденное значение  $d$  сравнивается с первоначально принятым и уточняется методом последовательных приближений. При расхождении расчет

повторяется, пока  $|d_{i+1} - d_i|$  не станет менее желаемой величины. Параметры камеры смешения определяются из уравнений закона сохранения массы, закона сохранения энергии, уравнения количества движения. Параметры утилизационного водогрейного котла конденсационного типа определяются уравнением теплового баланса.

$$Q_{УВК} = G_{см} \cdot C_{р см} \cdot (t'_{см} - t''_{см}) + G_{см} \cdot C_{р см к} \cdot (t''_{см} - t'''_{см}) + \Delta G_{вл} \cdot r$$

Разработанная математическая модель позволяет определять удельные характеристики комбинированной ГТУ с впрыском пара, однако не дает возможности определять массогабаритные характеристики УВК конденсационного типа и проводить дальнейший анализ.

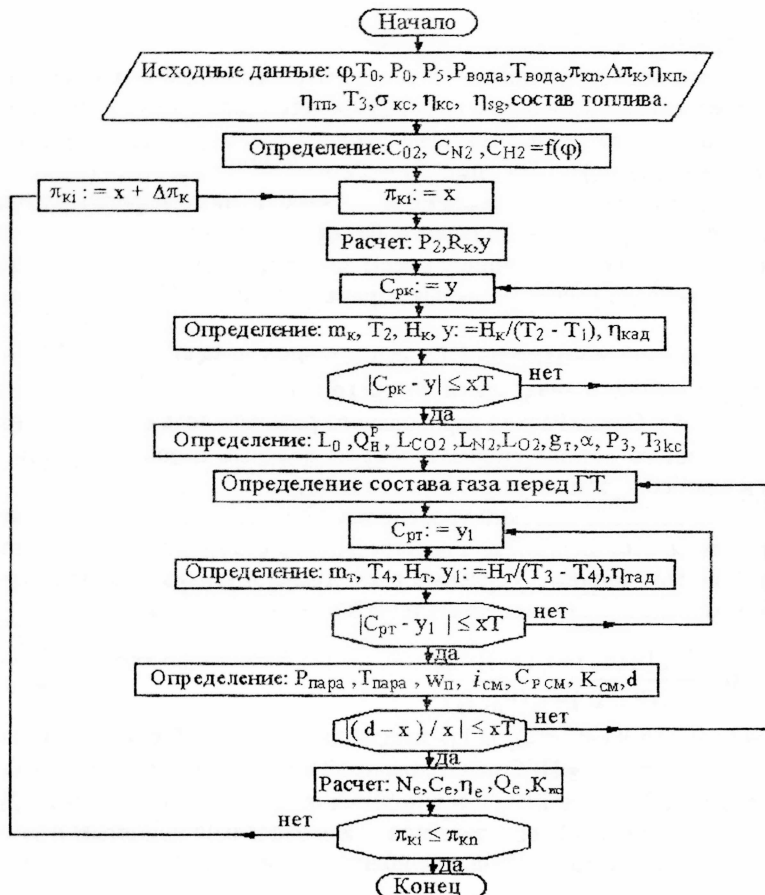


Рис. 2. Блок-схема расчета удельных параметров ГТУ с впрыском пара и УВК

В третьей главе с целью определения массогабаритных характеристик и проведения расчетов на стадии технических проектов разработана математическая модель расчета УВК конденсационного типа, для создания которой проведен анализ экспериментальных и теоретических исследований по теплоотдаче, начиная от сухого воздуха до конденсации чистого пара.

Основной сложностью расчета УВК является определение коэффициента теплоотдачи из-за сложности самого процесса конденсации пара из парогазовой смеси и противоречивости экспериментальных данных данного класса явлений. Конденсация паров воды из парогазовой смеси существенно влияет на коэффициент теплоотдачи вследствие усложнения теплообмена в двухкомпонентных средах (газ, пар). Причем содержание пара в парогазовой смеси меняется от малой величины (порядка 1% в системах кондиционирования воздуха) до бесконечно большой величины (конденсаторы паровых турбин). В схемах ГТУ контактного типа, работающих в режиме когенерации, содержание пара в ПГС меняется от 0,02 (экологический впрыск) до 0,3 и более (энергетический впрыск).

Проведен анализ теоретических исследований процесса конденсации пара из парогазовой смеси, основанных на: пленочной конденсации пара; методах расчета пограничного слоя, разработанных А.И. Леонтьевым и С.С. Кутателадзе; аналогии процессов тепло и массообмена; теории подобия, используемой в методике обобщения Л.Д. Бермана. Анализ методов расчета показал, что теоретическое решение задачи конденсации пара из ПГС с применением ЭВМ требует много машинного времени при составлении и отладке программы. Используемые в настоящее время инженерные методы расчета включают в себя неизвестные величины: параметры конденсатной плёнки на границе раздела фаз. Расчет теплообмена при применении этих соотношений возможен только методом последовательных приближений с применением таблиц термодинамических свойств или графическим методом.

Проведен анализ экспериментальных данных по исследованию теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси. Анализировались экспериментальные данные по системам кондиционирования воздуха с влажностью ( $d = 0 - 0,1$ ); экспериментальные данные по исследованию процессов сушки в теплообменных аппаратах (ТА) ( $d = 0,03 - 0,1$ ), экспериментальные данные по конденсации пара из ПГС при поперечном обтекании вертикального трубного пучка ( $d = 0,1 - 0,6$ ); экспериментальные данные конденсации паровоздушной смеси, поперечно обтекающей горизонтальный трубный пучок ( $d = 5 - 100$ ).

Известные в настоящее время методы расчета параметров теплоотдачи,

полученные в результате экспериментальных исследований, приводят к значительным количественным расхождениям (рис.3,4) и не всегда надежны. Достаточно точно можно определить параметры теплоотдачи либо сухого воздуха, либо чистого пара.

$$\alpha_{см}, (\text{Вт/ м}^2 \cdot \text{град})$$

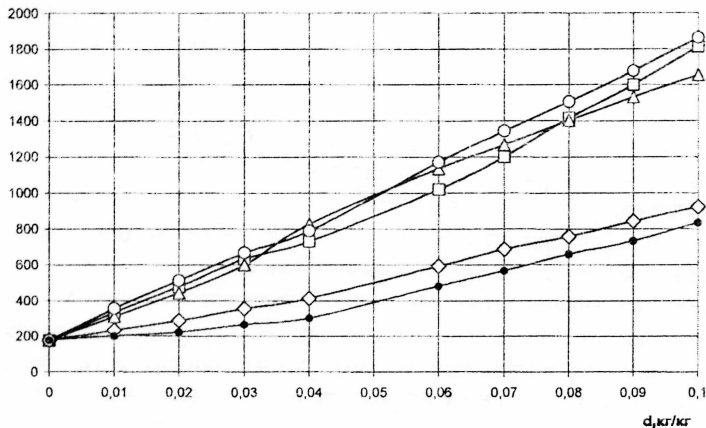


Рис.3. Сопоставление экспериментальных данных в интервале  $d = 0 - 0,1$   
 $\alpha_{см}, (\text{Вт/ м}^2 \cdot \text{град})$

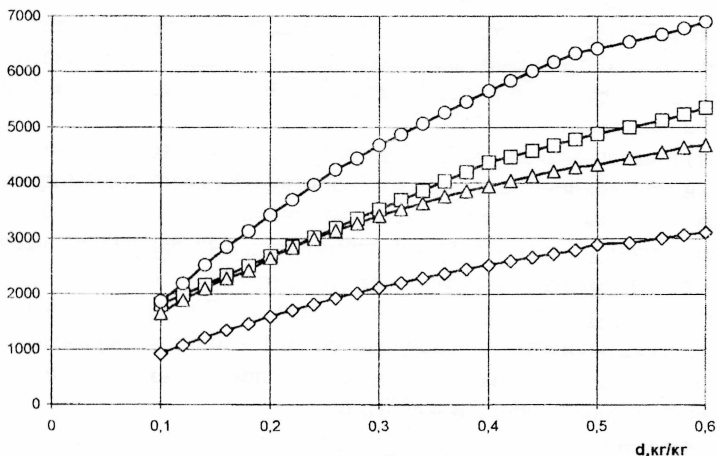


Рис.4. Сопоставление экспериментальных данных в интервале  $d = 0,1 - 0,6$

Проведено обобщение имеющихся экспериментальных данных по теплоотдаче конденсирующейся ПГС и получена графическая зависимость изменения критерия  $\overline{Nu} = Nu_{cm}/Nu_r = f(d)$  в широком диапазоне изменения влагосодержания (рис 5, 6).

В результате обработки опубликованных экспериментальных данных по исследованию теплоотдачи при конденсации пара из ПГС, получены аппроксимационные зависимости, которые рекомендуются для определения коэффициентов теплоотдачи в широком диапазоне изменения влагосодержания:

$$\begin{aligned} d &= 0 - 0,1 \\ \frac{Nu_{cm}}{Nu_r} &= 0,01 \cdot \sqrt{2,3186 \cdot 10^7 d^2 + 10000} \cdot \left[ 0,215 \cdot \ln\left(\frac{Re_{cm}}{13}\right) - 0,485 \right] \quad (1) \\ d &= 0,1 - 0,6 \\ \frac{Nu_{cm}}{Nu_r} &= \frac{0,01}{16,281 \cdot 10^{-5} / d + 301,38 \cdot 10^{-6}} \cdot \left[ 0,215 \cdot \ln\left(\frac{Re_{cm}}{13}\right) - 0,485 \right] \\ d &= 0,6 - 100 \\ \frac{Nu_{cm}}{Nu_r} &= (9,84 \cdot \ln(100 \cdot d) + \frac{4,61}{d} - 30,1) \cdot \left[ 226,193 \cdot 10^{-6} \left(\frac{Re_{cm}}{10}\right) + 0,7727 \right] \end{aligned}$$

На основе полученных аппроксимационных зависимостей (1) и анализа существующих методик разработана и реализована на ПЭВМ методика расчета утилизационного водогрейного котла конденсационного типа.

Полученные аппроксимационные расчетные зависимости позволяют определять коэффициент теплоотдачи при расчете теплообменных аппаратов в цикле комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК для интегральной оценки тепловых и массогабаритных параметров установок данного типа.

Утилизационный теплоутилизатор состоит из парогазового подогревателя (ППП), в котором происходит охлаждение ПГС от исходной температуры до состояния насыщения и парогазового конденсатора (ПГК), в котором происходит процесс конденсации пара из ПГС и выделяется значительное количество теплоты.

Особенности расчета – ТА имеет два вида поверхностей: конвективную (оребрённую) и конденсационную (гладкотрубчатую). Исходными данными расчета УВК являются данные предварительного расчета удельных параметров цикла контактной ГТУ: расход ПГС –  $G_{cm}$  (кг/с), удельный расход пара –  $d$ , температура ПГС на входе и выходе УВК –  $T'_{cm}$ ,  $T'''_{cm}$  (К); давление ПГС на входе в УВК –  $P_{cm}$  (Па); температура нагреваемой воды на входе –  $T'_в$  (К); относительные потери по газу –  $\Delta P_r$ .

$Nu_{cm}/Nu_r$

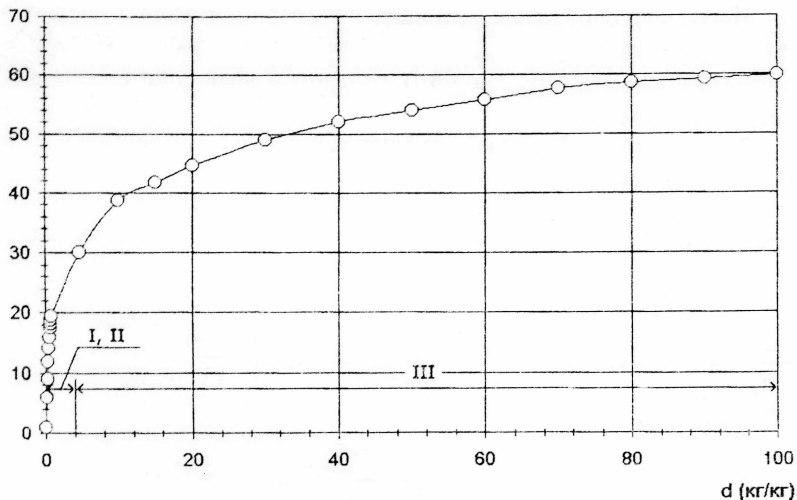


Рис 5. Экспериментальная зависимость для определения параметров теплоотдачи конденсирующейся ПГС в диапазоне  $d = G_r/G_{cm} = 0 - 100$

$Nu_{cm}/Nu_r$

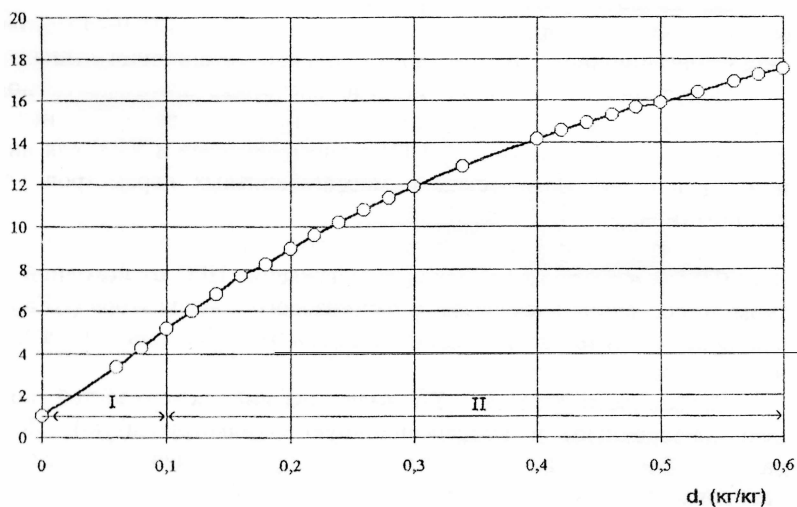


Рис 6. Экспериментальная зависимость для определения параметров теплоотдачи конденсирующейся ПГС в диапазоне  $d = G_r/G_{cm} = 0 - 0,6$

В четвертой главе исследовано влияние основных параметров ГТУ с впрыском пара и УВК на совместную выработку тепла и электроэнергии.

Исследовано влияние температуры газов перед турбиной и степени повышения давления цикла на характеристики комбинированной ГТУ с впрыском пара.

Температура газов перед турбиной однозначно влияет и на удельную мощность, и на КПД ГТУ с впрыском пара. С её возрастанием оба показателя комбинированной ГТУ повышаются. Более сложное влияние на КПД и  $N_e$  оказывает степень повышения давления цикла (рис. 7).

Получены зависимости, позволяющие определять оптимальные значения степени повышения давления комбинированной ГТУ с впрыском пара для получения максимальной удельной мощности и КПД цикла.

$$\pi_{\text{опт}}^{N_e} = \left( \frac{(1+d) \cdot k_{\text{ox}} \cdot \tau \cdot \eta_t \cdot \eta_k (C_{p_{\text{cm}}} / C_{p_{\text{вз}}})}{(\sigma_{\text{вх}} \cdot \sigma_{\text{кк}} \cdot \sigma_{\text{кв}} \cdot \sigma_{\text{убк}})^{m_{\text{cm}}}} \right)^{\frac{K}{2(K-1)}} \quad (2)$$

$$\pi_{\text{опт}}^{\eta} = \left[ \frac{a_1 v^{-m_{\text{cm}}} \pm \sqrt{a_1^2 v^{-2 \cdot m_{\text{cm}}} - a_1 v^{-m_{\text{cm}}} [a_1 - (\tau_1 - 1) \cdot \eta_k] \cdot [1 + (\tau_1 - 1) \cdot \eta_k]}}{a_1 - (\tau_1 - 1) \cdot \eta_k} \right]^{\frac{K}{K-1}}$$

$$a_1 = (1+d) \cdot k_{\text{ox}} \cdot \tau \cdot \eta_t \cdot \eta_k \frac{C_{p_{\text{cm}}}}{C_{p_{\text{вз}}}}, \quad \tau_1 = \tau \cdot \frac{C_{p_{\text{cm}}}}{C_{p_{\text{вз}}}}$$

Характеристики комбинированной ГТУ, особенно её термодинамическая эффективность, существенно зависят от параметров впрыскиваемого пара.

Экономичность ГТУ с впрыском пара и ВК существенно выше обычной ГТУ, причем с повышением энтальпии вводимого пара КПД контактной установки возрастает. Расход впрыскиваемого пара оказывает наиболее сильное влияние на основные показатели комбинированной ГТУ.

Для количественной оценки термодинамических параметров комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК получены зависимости изменения  $N_e$ ,  $Q_e$ , КПД,  $\alpha$ ,  $K_{\text{ис}}$  от удельного расхода впрыскиваемого пара при  $T_3=1300 \text{ K}$ ,  $\pi_k=10$  (рис. 8).

Высокие значения удельного расхода пара приводят к неуклонному повышению КПД комбинированной ГТУ, при этом каждый процент введённого в газовый тракт пара при  $\pi_k=10$ , понижает расход топлива около одного процента. Для сравнения термодинамических и мощностных характеристик комбинированной ГТУ с впрыском пара и традиционной ГТУ, представлены полученные на основе разработанных моделей обобщенные

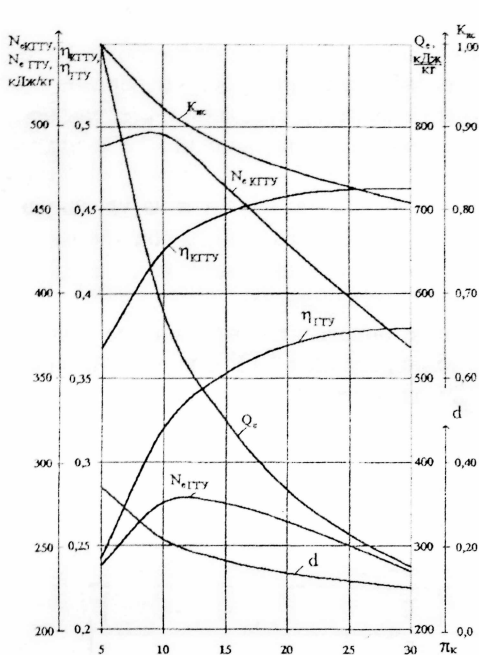


Рис. 7. Характеристики КГТУ при  $T_3=1300\text{ K}$ ;  $T_{yx}=393\text{ K}$

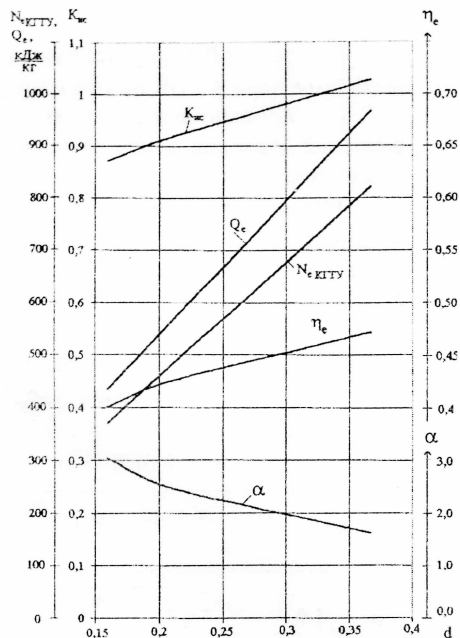


Рис. 8. Влияние расхода пара на характеристики КГТУ при  $\pi_k=10$ ;  $T_3=1500\text{ K}$

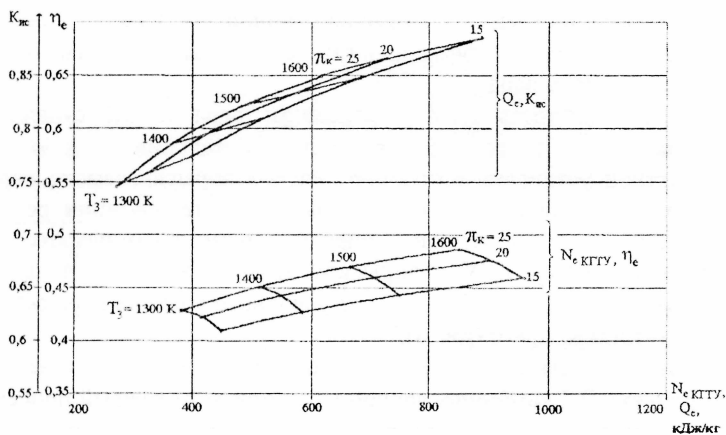


Рис. 9. Обобщенные характеристики ГТУ с впрыском пара и УВК

термодинамические характеристики (рис.9). Из сравнения обобщенных характеристик двух циклов следует, что ГТУ с впрыском пара и УВК термодинамически более совершенна.

Исследовано влияние удельного расхода впрыскиваемого пара на характеристики УВК конденсационного типа (рис.10, 11). Показано, что при увеличении удельного расхода пара в контактной ГТУ возрастает удельная тепловая мощность УВК и повышается температура насыщения ПГС. Расход нагреваемой воды при заданном перепаде температур определяется плотностью конденсации и температурой насыщения ПГС.

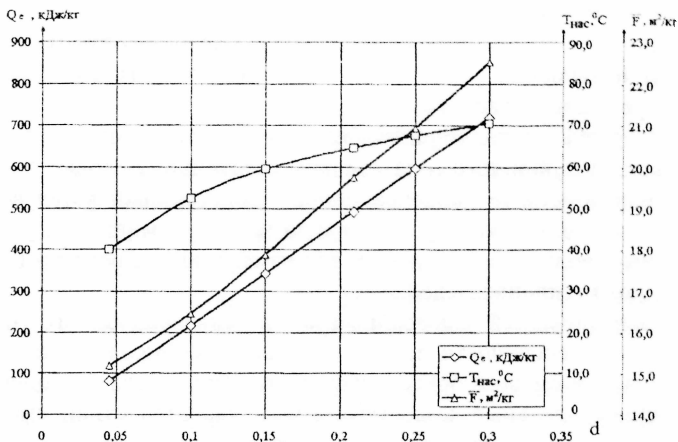


Рис.10. Влияние расхода пара на температуру насыщения, удельную тепловую мощность и поверхность нагрева

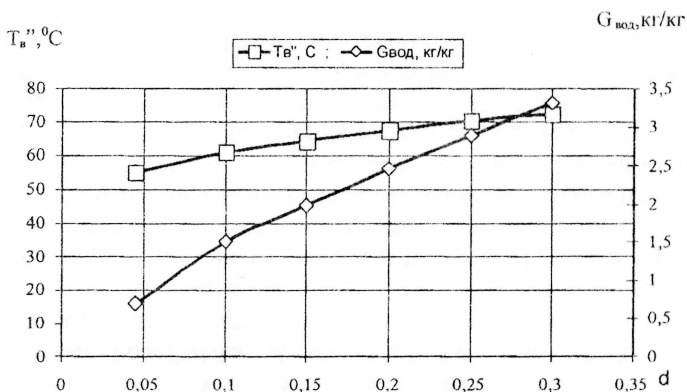


Рис.11. Влияние расхода пара на температуру воды на выходе УВК и её расход

Максимальная температура нагреваемой воды в УВК конденсационного типа определяется температурным напором, расходом воды и температурой насыщения ПГС, находящейся в функциональной зависимости от удельного расхода пара.

Показано, что в УВК с ростом удельного расхода пара одновременно возрастают максимальная температура нагреваемой воды и её расход.

Показано, что в случае применения комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК возможна более глубокая утилизация тепла уходящих газов при существенно более узком диапазоне температур и при росте КПД ГТУ.

Проведен анализ режимов работы, массогабаритных характеристик, степени повышения утилизации тепла уходящих газов комбинированной ГТУ с традиционными ГТУ-ТЭЦ.

Из сравнения характеристик газового и утилизационного водогрейного котла конденсационного типа сделаны следующие выводы:

1. Утилизационный конденсационный водогрейный котел в сравнении с газовым имеет большую удельную тепловую мощность и расход нагреваемой воды при том же уровне изменения температур горячего и холодного теплоносителей.
2. Утилизационный водогрейный котел конденсационного типа из-за высокой интенсивности процессов тепломассобмена при конденсации парогазовой смеси и более высоких коэффициентов теплопередачи имеет лучшие удельные массогабаритные характеристики практически во всем рассматриваемом диапазоне изменения температур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана и реализована математическая модель и программа расчета параметров комбинированной ГТУ с впрыском пара и утилизационным водогрейным котлом конденсационного типа с учетом влажности воздуха на входе, типа топлива, изменения температурного режима на выходе и параметров рабочего тела вдоль газового тракта.
2. Расчет коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси по различным методикам приводит к значительным расхождениям.

Показано, что наиболее точно коэффициент теплоотдачи определяется для предельных значений влажности парогазовой смеси: сухого воздуха или чистого пара и предложен метод обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче конденсирующейся ПГС через параметр  $\bar{Nu} = Nu_{cm}/Nu_r$ .

3. Опубликованные результаты исследований процесса теплоотдачи при конденсации парогазовой смеси обработаны в виде  $\bar{Nu} = Nu_{cm}/Nu_r = f(d)$ , что существенно упрощает инженерные расчеты, не снижая их точности. На основе обобщения опубликованных экспериментальных данных получены расчетные зависимости  $\bar{Nu} = Nu_{cm}/Nu_r = f(d, Re)$  в широком диапазоне изменения влагосодержания  $d = G_{п}/G_r = 0 - 100$ .
4. Для проведения сравнительного анализа и определения массогабаритных характеристик разработана и реализована математическая модель и программа расчета параметров утилизационного водогрейного котла конденсационного типа с использованием полученной аппроксимационной зависимости  $\bar{Nu} = Nu_{cm}/Nu_r$ .
5. На основании разработанной математической модели когенерационной ГТУ проведено исследование влияния параметров ГТУ с впрыском пара ( $\pi_k, T_3$ ) на эффективность установки ( $N_e, КПД, d, K_{ис}$ ).
6. Получены зависимости, позволяющие определять оптимальные значения степени повышения давления цикла комбинированных ГТУ с впрыском пара, для получения максимального значения термодинамической эффективности и удельной электрической мощности. Получены обобщенные термодинамические характеристики ГТУ с впрыском пара и водогрейным котлом.
7. Исследовано влияние удельного расхода впрыскиваемого пара на массогабаритные характеристики УВК конденсационного типа в сравнении с газовым котлом.
8. Показано, что в случае применения комбинированной ГТУ с впрыском пара и УВК возможна более глубокая утилизация тепла уходящих газов при существенно более узком диапазоне температур и при росте КПД и  $N_e$  с увеличением коэффициента использования тепла топлива до 90% и более. Более низкий температурный режим в УВК конденсационного типа позволит использовать менее дорогие материалы для изготовления теплообменника и увеличить ресурс работы.
9. Приведены результаты расчета газотурбинной установки с впрыском пара когенерационного типа на базе отечественных и зарубежных двигателей различной мощности.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Особенности термодинамического анализа контактных ГТУ когенерационного типа / И.Н. Волков, М.И. Морозенко, А.В. Землянский, Э.А. Манушин // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XII Школы-семинара молодых ученых и

- специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева.-М., 1999.- С.73 – 75.
2. Землянский А.В., Морозенко М.И., Григорьев В.Г. Исследование комбинированной ГПУ с впрыском пара // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели.: Тез. докл. XI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. -М., 2000.-С.32-34.
  3. Морозенко М.И., Землянский А.В. Влияние удельного расхода пара на характеристики когенерационных контактных ГТУ // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана.-1999.- № 576.-С. 94-100.
  4. Землянский А.В., Морозенко М.И., Григорьев В.Г. Расчетная модель утилизационного водогрейного котла конденсационного типа // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана.-1999.- № 576.-С. 101-109.
  5. Морозенко М.И., Землянский А.В. Математическая модель конденсационного теплоутилизатора // Тез. докл. 1-ой Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию.-М., 2000.-С.195-196.
  6. Морозенко М.И., Землянский А.В., Григорьев В.Г. Термодинамическое исследование контактных ГТУ когенерационного типа // Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка: Труды Всероссийской научно - технической конференции.- Калуга, 1999.- С.70-71.
  7. Морозенко М.И., Землянский А.В., Волков И.Н. Исследование влияния параметров цикла контактных ГТУ на выработку теплоты и энергии //Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка: Труды Всероссийской научно-технической конференции.- Калуга, 1998.- С.131.
  8. Морозенко М.И., Землянский А.В., Григорьев В.Г. Особенности расчета теплообменных аппаратов при работе на парогазовой смеси // Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка: Труды Всероссийской научно - технической конференции.- Калуга, 1998.- С. 130.
  9. Морозенко М.И. Математическая модель процесса теплообмена конденсирующихся потоков // Тез. докл. 1-ой Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию.-М., 2000.-С.195-196.
  10. Морозенко М.И., Землянский А.В., Григорьев В.Г. Исследование характеристик комбинированной ГПУ с впрыском пара // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Труды Всероссийской научно - технической конференции.-М., 2000.-С.64.