

6
А-62

+

И.Л. МОСТИНСКИЙ

ИОНИЗИРУЮЩАЯ ПРИСАДКА В
МГД УСТАНОВКАХ ОТКРЫТОГО ЦИКЛА,
РАБОТАЮЩИХ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

АВТОРЕФЕРАТ

ИВТ АН СССР

МОСКВА—1971

АКАДЕМИИ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР АН СССР
На правах рукописи

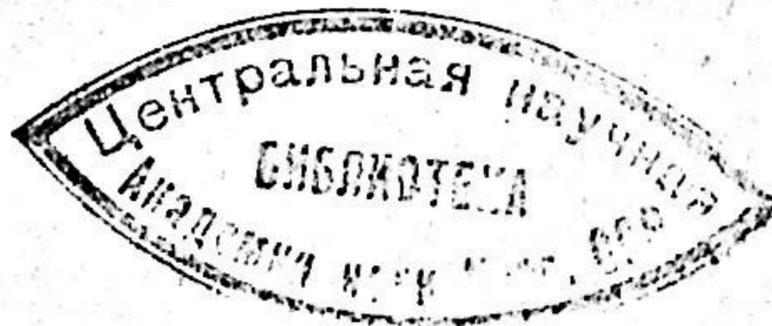
И. Л. МОСТИНСКИЙ

ИОНИЗИРУЮЩАЯ ПРИСАДКА В ИГД УСТАНОВКАХ
ОТКРЫТОГО ЦИПЛА, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИРОДНОМ
ГАЗЕ.

/Об.277 - Преобразование видов энергии/

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

МОСКВА, 1971



621.362
AG2

Работа выполнена в Институте высоких температур
Академии Наук СССР.

Научный консультант - академик М.А. Стирикович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук ДОРОШУК В.Е.

доктор физико-математических наук НЕДОСПАСОВ А.В.

член-корреспондент АН ЭССР

доктор технических наук ЭЛИК И.П.

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Институт
технической теплофизики АН УССР. /г. Киев/.

Автореферат разослан "13" декабря 1971 г.

Защита диссертации состоится " в феврале 1972 г.
на заседании Учёного Совета Института высоких температур
АН СССР.

Ваши отзывы просим направлять по адресу:

г. Москва, Е-250, Красноказарменная ул., 17^а, ИВТ АН СССР.

Дата защиты будет объявлена в газете.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Учёный секретарь Совета

кандидат технических наук


/Н.И. Горбунова/

Наблюдающееся бурное развитие промышленности требует еще более быстрого развития энергетики, и, как следствие этого, за последние 10 лет выработка электроэнергии в мире возросла вдвое. Основным источником энергии является органическое топливо: уголь, нефть, газ, за счет сжигания которого вырабатывается 70% всей электроэнергии. Эффективность же использования топлива невелика: к.п.д. лучших современных электростанций не превышает 40-42%. К тому же во многих промышленных районах своего топлива нет или запасы /и добыча/ его ограничены, и топливо приходится привозить или транспортировать по трубопроводам за сотни, тысячи километров, поэтому оно дорого и дефицитно.

В этих условиях большого экономического эффекта можно ожидать от использования для выработки электроэнергии магнетогидродинамических генераторов /МГД/. Проведенные технико-экономические расчеты показали, что уже в ближайшие годы электростанции с МГД-генераторами могут иметь к.п.д. на уровне 50-55%, что сделает их экономичнее обычных конденсационных ТЭС в районах со стоимостью твердого топлива выше 10 руб/тут и газообразного - выше 15 руб/тут.

Для энергетических МГД-генераторов необходима низкотемпературная плазма с электропроводностью 10-100 мОм/м. Однако собственная термическая ионизация продуктов сгорания даже при температуре 3500-4000°К создает электропроводность в доли мОм/м. Поэтому для практической реализации идеи с МГД необходимо поднять электропроводность рабочего газа на 2-3 порядка, что в настоящее время достигается с помощью ионизирующей присадки,

т.е. путем ввода легкоионизирующихся веществ.

Таковыми веществами являются щелочные металлы, из которых наиболее перспективным для МГД открытого цикла является калий /цезий и рубидий дороги и дефицитны/. При работе МГЭС на топливе, не содержащем серы /в частности, на природном газе/, калий вводится в цикл и выводится из него в виде карбоната K_2CO_3 .

Применение этого вещества в качестве ионизирующейся присадки требует решения целого комплекса задач. Это обеспечение ионизации присадки и равномерного смешения ее с продуктами сгорания перед МГД-генератором, изучение физико-химических превращений присадки и отложений ее на теплообменных поверхностях, разработка мер борьбы с этими отложениями, обеспечение практически полного /до 99%/ улавливания введенной присадки и ее регенерация для повторного использования в МГД-цикле.

Пуск в 1964 году экспериментальной комплексной МГД-установки У-02 позволил выявлять на ней специфичные физико-химические процессы, исследовать их и решать технологические вопросы, возникающие на пути создания энергетических МГД-установок. Параллельно с этими исследованиями велись опыты и теоретические изыскания в Отделе массообмена ИВТ АН СССР. В итоге удалось получить довольно четкую картину поведения ионизирующейся присадки в МГД-установках открытого цикла, работающих на не содержащем серы газообразном топливе, и разработать рекомендации по методам ее ввода, вывода и регенерации.

Результаты этих исследований, которые проводились под научным руководством и при непосредственном участии автора, легли в основу предлагаемой диссертационной работы.

Глава I. Ввод ионизирующейся присадки

Карбонат калия — белый кристаллический порошок, неспучий и очень гигроскопичный. Он легко поглощает влагу из воздуха и слеживается. Попытки ввода его в поток продуктов сгорания в сухом виде, предпринятые на У-02, не дали желательного результата: порошок подавался неравномерно, образовывал своды. Подобный результат был получен и Гадде в Италии. И хотя работы в этом направлении продолжаются, до сих пор ни у нас, ни за рубежом не найдено удовлетворительного технологического решения равномерного ввода мелкодисперсного K_2CO_3 .

Задача значительно упрощается, если вводить K_2CO_3 в виде водного раствора. Хорошая растворимость карбоната калия в воде /при $t = 20^\circ C$ 110 г K_2CO_3 на 100 г воды/ позволяет получать и хранить 50% раствор, ввод которого в камеру сгорания получил широкое применение в экспериментах с МГД-генераторами. Система ввода 50%-ного раствора K_2CO_3 является основной и на экспериментальной МГД-установке У-02. Она проработала несколько тысяч часов, показав большую надежность и простоту в эксплуатации.

Недостатком, свойственным вводу присадки в виде водного раствора карбоната калия, является дополнительное снижение температуры из-за ввода балластной воды и, следовательно, уменьшение получаемой электропроводности продуктов сгорания. Проведенные на ЭВМ расчеты позволили определить это снижение, а затем произвести оптимизацию расхода ионизирующейся присадки, вводимой в сухом виде и в виде водного раствора K_2CO_3 50 и 67%-ной концентрации. Оптимизация была проведена по двум критериям: по максимуму электропроводности на входе в МГД-генератор

и по максимуму удельной мощности МГД-генератора.

При оптимизации по электропроводности учитывалось снижение температуры за счет ввода присадки /и воды при использовании раствора/, а также изменение химического состава продуктов сгорания и сечения столкновения электронов с молекулами. Для этой цели использовалась эмпирическая формула, полученная нами путем обобщения как расчетных /Вей и др./, так и экспериментальных данных по электропроводности продуктов сгорания с присадкой калия:

$$\sigma = 130 \frac{z_k^{0.5} (1 - 0.4 \alpha \tau \tau_0 20 \tau_{H_2O}) (T/2400)^{32 - 16,5 T/2400}}{[1 + z_k (Q_k/Q_{nc} - 1)] \cdot P^{1 - 7 \cdot 10^{-4} (T - 2400)}} \quad / I /$$

где σ - электропроводность, мо/м; z_k и z_{H_2O} - мольные концентрации калия и воды в продуктах сгорания, Q_k и Q_{nc} - сечения столкновения электронов с атомами калия и молекулами продуктов сгорания; T и P - температура и давление продуктов сгорания, соответственно $^{\circ}K$ и $кгс/см^2$.

Активно поглощающий электроны ион OH^- появляется в результате диссоциации H_2O лишь при высоких температурах. Его концентрация является функцией содержания H_2O в продуктах сгорания, температуры и давления, и учет ее формулой /I/ ведется через эти параметр.

Расчеты электропроводности были проведены на ЭВМ "Наира" в следующем диапазоне изменения параметров: исходная /до ввода присадки/ температура продуктов сгорания $2400-3200^{\circ}K$, давление $1-10 кгс/см^2$, топливо-природный газ /для определенности 100%-ный CH_4 /, объемное количество кислорода в окислителе $0,21-0,50$, объемная концентрация присадки /по калию/ $0,002-0,05$.

Полученные зависимости электропроводности σ от концен-

трации присадки z_k выражаются кривыми, имеющими максимум. При малых количествах введенной присадки / $z_k \leq 0,002$ / такие сопутствующие ее вводу эффекты, как снижение температуры и изменение химического состава газов, невелики и электропроводность продуктов сгорания практически не зависит от того, в каком виде вводится присадка. Поэтому здесь значения σ , отвечающие вводу K_2CO_3 в сухом виде и в виде водных растворов, близки.

С увеличением z_k начинает сказываться снижение температуры, тем большее, чем меньше концентрация вводимого раствора. В результате рост σ замедляется, и по достижении некоторого значения z_k начинается снижение электропроводности. В случае ввода присадки в виде 50%-ного раствора максимум σ отвечает $z_k = 0,006-0,013$. При повышении концентрации раствора до 67% K_2CO_3 максимум σ возрастает на 10-20%, а при вводе сухого K_2CO_3 - еще на 10-20%. При этом оптимальная величина z_k также увеличивается, но более резко: при переходе к 67% раствору - примерно в 1,5 раза, а к сухому K_2CO_3 - в 2,5-3 раза. Следует однако заметить, что это возрастание z_k^{opt} сопровождается изменением формы максимума - он становится все более пологим, что позволяет без заметного уменьшения σ /на 5-10%/ уменьшить рабочую концентрацию присадки до уровня $0,01-0,015$.

Анализ проведенных расчетов показал, что оптимальное значение z_k практически не зависит от давления и увеличивается с ростом начальной температуры продуктов сгорания и концентрации кислорода в окислителе.

Более строгой является оптимизация расхода присадки с привлечением технико-экономических критериев, учитывающих капитальные и текущие затраты по всем элементам энергетической установки

с МГД-генератором.

Первым приближением к решению такой задачи явилось исследование, проведенное нами совместно с СЭИ СО АН СССР. Рассматривалась модель высокотемпературной части энергетической МГД-установки, на характеристики которой расход присадки оказывает существенное влияние; сюда относятся камера сгорания, сопло, МГД-генератор, диффузор. В качестве критерия оптимизации расхода присадки использовались два показателя средней удельной выработки электрической энергии в МГД-генераторе: по объему канала $N_{\text{эВ}}^{\text{ср}}$ и по расходу рабочего газа $N_{\text{гГ}}^{\text{ср}}$, являющиеся комплексными характеристиками МГД-генератора, определяющими его качество в отношении эффективности процесса преобразования энергии, объема канала, размеров магнитной системы. Рассматривались МГД-генераторы с фиксированной электрической мощностью 100, 500 и 1000 Мвт, работающие на продуктах сгорания метана в воздухе при разной степени обогащения его кислородом и разной температуре подогрева. Присадкой служит калий, который вводится в виде сухого K_2CO_3 или его водных растворов. Параметры рабочего газа на выходе из МГД-канала фиксировались двумя значениями электропроводности: $\sigma_{O_2} = 2,5$ и $5,0$ мо/м. Расчеты, выполненные на ЭВМ "БЭСМ-4", показали, что зависимости $N_{\text{эВ}}^{\text{ср}} = f(\tau_k)$ и $N_{\text{гГ}}^{\text{ср}} = f(\tau_k)$ по своему характеру напоминают зависимость $\sigma = f(\tau_k)$, однако значения оптимальных расходов присадки $\tau_k^{\text{опт}}$ не одинаковы: при оптимизации по $N_{\text{эВ}}^{\text{ср}}$ они близки к $\tau_k^{\text{опт}}$, отвечающим максимуму электропроводности, при оптимизации по $N_{\text{гГ}}^{\text{ср}}$ величины $\tau_k^{\text{опт}}$ примерно в 2 раза больше. Однако плавное приближение к максимуму $N_{\text{эВ}}^{\text{ср}}$ с ростом τ_k и пологое опускание кривой $N_{\text{гГ}}^{\text{ср}}$ позволяют выбрать величину

эту τ_k , при которой оба значения удельной мощности будут недалеко от своего максимального значения. Так при вводе сухого K_2CO_3 эта величина τ_k лежит в интервале 0,01-0,015, а при вводе его 50%-ного раствора - вблизи 0,007.

С увеличением степени обогащения воздуха кислородом величина $\tau_k^{\text{опт}}$ возрастает. Изменение же подогрева воздуха или конечной электропроводности газов изменяет лишь величину $N_{\text{эВ}}^{\text{ср}}$, а значение $\tau_k^{\text{опт}}$ остается постоянным. Не изменяется оно и при изменении мощности МГД-генератора.

При определении оптимальных расходов присадки отмечалось, что применение для ее ввода водных растворов K_2CO_3 ведет к снижению электропроводности продуктов сгорания и удельной мощности МГД-генератора, причем это снижение тем больше, чем меньше концентрация вводимого раствора. Однако существенные технологические преимущества ввода раствора K_2CO_3 по сравнению с вводом этого же вещества в виде мелкодисперсного порошка заставляют искать пути уменьшения термодинамического несовершенства этого метода. Основное направление поисков очевидно - это повышение концентрации раствора. Имеющиеся данные о растворимости K_2CO_3 в воде подтверждают реальность этого пути и говорят о возможности получения при высоких температурах весьма концентрированных растворов /до 75 вес.% K_2CO_3 /.

Изучению фазовых равновесий в системе $K_2CO_3-H_2O$ при высоких параметрах была посвящена совместная работа ИВТ и ИОИХ АН СССР. В толстостенном автоклаве из коррозионноустойчивой стали Х18Н25С была исследована растворимость K_2CO_3 в диапазоне температур от 250 до 450°C и измерено давление пара над насыщенными и ненасыщенными растворами при весовых концентрациях до 80%.

Наивысшая концентрация раствора, достигнутая в этой работе, - 81 вес.% K_2CO_3 /при $p=12\text{ кгс/см}^2$ и $t=450^\circ\text{C}$ /. Однако так как линейная экстраполяция данных по растворимости K_2CO_3 в воде довольно точно приводит к точке плавления чистого карбоната калия, делается вывод о вероятном увеличении растворимости K_2CO_3 при дальнейшем повышении температуры и о возможности непрерывного перехода от водных растворов K_2CO_3 к расплаву.

В химической и других отраслях промышленности растворы высокой концентрации получают путем испарения растворителя в выпарных станциях. Для электростанций с МГД-генераторами экономически и технологически будет оправдано лишь такое выпарное оборудование, которое впишется в тепловую схему станции. Так представляется целесообразным упаривать водные растворы присадки в прямоточном парогенерирующем контуре с сепаратором. Парогенерирующие трубы можно расположить в газовом тракте МГД-установки за МГД-каналом в зоне температур продуктов сгорания $1100-1200^\circ\text{K}$. В эти трубы насосом высокого давления подается подготовленный раствор ~ 40%-ной концентрации из системы регенерации присадки и упаривается до заданной концентрации. В сепараторе высококонцентрированный раствор отделяется от пара и через форсунки подается в камеру сгорания МГДУ. Полученный пар высоких параметров следует использовать в паровом цикле станции.

Преимуществом такого прямоточного выпарного аппарата является его относительная компактность и возможность повышения параметров для получения растворов K_2CO_3 заданной концентрации. Однако реализация предлагаемой схемы требует данных о температурном режиме парогенерирующих труб, а также о чистоте получаемого пара.

Поскольку в литературе такие данные отсутствуют, для их получения нами была создана экспериментальная установка, и на ней проведены опыты в интересующем практику диапазоне параметров раствора. Установка работала по следующей схеме. Водный раствор K_2CO_3 с концентрацией 10-50% из расходной емкости насосом подавался в экспериментальный участок, представляющий собой две последовательно соединенные горизонтальные трубы диаметром 10×2 мм из стали Х18Н10Т. Длина каждой трубы /между токоподводящими шинами/ - 1200 мм. Обогрев труб - прямой, за счет их собственного омического сопротивления.

Образующаяся в экспериментальном участке парожидкостная смесь поступала в вертикальный сепаратор, где происходило разделение паровой и жидкой фаз. Полученный высококонцентрированный раствор направлялся к форсунке, а пар из верхней части сепаратора - в конденсатор. Распыливание раствора в бак атмосферного давления осуществлялось с помощью конического сопла $\phi 0,3$ мм.

Температура раствора и наружной поверхности парогенерирующих труб измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар, выведенных на потенциометр Р2/1. Давление измерялось образцовыми манометрами. Тепловой поток для каждой трубы рассчитывался по измененному току и напряжению.

Предварительные опыты с кипящей дистиллированной водой позволяли проверить правильность показаний термопар и получить данные по теплоотдаче к воде, которые, как оказалось, хорошо согласуются с данными других исследователей.

Опыты с водными растворами K_2CO_3 проводились при давлениях 10, 50, 100 и 150 кгс/см^2 , массовых скоростях 150-200 $\text{кг/м}^2\text{сек}$, тепловых потоках 70-150 кВт/м^2 в диапазоне изменения концентраций

от 20 до 75 вес. %.

При расчете локального значения коэффициента теплоотдачи к кипящему в трубе водному раствору K_2CO_3 учитывалось упаривание раствора, т.е. увеличение его концентрации, а, следовательно, и температуры кипения по длине трубы. Необходимая для таких расчетов величина теплоты испарения воды из раствора была вычислена на основании результатов предыдущей работы. Оттуда были взяты и данные температура-давление-концентрация.

Максимальная погрешность определения коэффициента теплоотдачи оценивается в 130%.

Обработка экспериментальных данных в виде зависимости коэффициента теплоотдачи от теплового потока при разных давлениях и концентрациях раствора показала, что в исследованном диапазоне параметров эта зависимость отвечает общепринятой для кипения чистых жидкостей, т.е. $\alpha \propto q^{0.7}$.

Было установлено, что с увеличением концентрации раствора /при постоянном давлении и тепловом потоке/ коэффициент теплоотдачи существенно уменьшается. Так при давлении 50 кгс/см² коэффициент теплоотдачи при кипении 70%-ного раствора K_2CO_3 равен 2,5 квт/м²град, т.е. почти на порядок меньше соответствующей величины для 20%-ного раствора. Аналогичная картина наблюдается при давлениях 100 и 150 кгс/см².

Здесь следует заметить, что при кипении растворов K_2CO_3 исследованного диапазона концентраций практически отсутствует зависимость α от давления.

Было проведено исследование условий отложений соли K_2CO_3 на поверхности парогенерирующей трубы. Известно, что в потоке кипящего раствора существует поле концентраций с наибольшим

значением C в пограничном слое. Здесь в первую очередь и будет достигаться насыщение раствора, сопровождающееся выпадением соли на стенке и повышением температуры поверхности нагрева. Разница между средней концентрацией раствора по сечению трубы и концентрацией его в пограничном слое при интенсивном кипении определяется прежде всего величиной теплового потока. Очевидно, чем меньше тепловой поток, тем меньше эта разница и, следовательно, тем более концентрированный раствор можно получить без выпадения соли на стенке трубы, т.е. без ухудшения ее температурного режима. Увеличение теплового потока ограничивает возможность повышения концентрации раствора, т.к. соль начинает отлагаться на стенке при более низкой средней концентрации.

В результате проведенных опытов нами была определена верхняя граница нормальных режимов кипения водных растворов K_2CO_3 при $p=51$ кгс/см² и $W_g=200$ кг/м²сек. Оказалось, что если концентрация насыщенного раствора при этом давлении равна 77 вес.%, то выпадение соли на стенке наблюдалось при значительно более низких средних концентрациях раствора. Так при $q=120$ квт/м² соль начинала выпадать при $C_{K_2CO_3}^{cp}=73,5$ вес.%, а при $q=150$ квт/м² - при $C_{K_2CO_3}^{cp}=72$ вес. %.

При давлениях 100 и 150 кгс/см² в исследованном диапазоне тепловых потоков и концентраций раствора отложений соли не наблюдалось.

Исследования чистоты пара, отделенного в сепараторе, показали, что во всем исследованном диапазоне давлений содержание K_2CO_3 в паре изменялось несильно: от 10 до 30 мг/л при концентрации раствора 30-60%. При давлениях 150 и 100 кгс/см² эти данные по порядку величины соответствуют коэффициентам распределе-

ния, полученным для аналогичных веществ в МЭИ и ЭНИИ^с, т.е. основной причиной уноса K_2CO_3 из раствора является растворимость его в паре. При давлениях 50 и особенно 10 кгс/см² растворимость карбоната калия в паре пренебрежимо мала. Однако за счет резкого увеличения удельного объема пара существенно /на порядок/ возрастает скорость его в сепараторе, а с ней появляется и механический унос, т.е. унос мелких капель раствора.

Тем не менее в любом случае содержание K_2CO_3 в паре порядка 10 - 30 мг/л превышает требования к чистоте пара на тепловых электростанциях, т.е. требует либо дополнительной очистки пара перед подачей в турбину /например, промывки его конденсатором/, либо создания второго парогенерирующего контура. Представляется целесообразным рассмотреть также возможность работы паровых турбин на водяном паре с таким количеством K_2CO_3 или поискать другие пути экономичного использования такого пара в тепловом цикле ГДС.

В целом результаты экспериментального исследования процесса упаривания раствора K_2CO_3 в парогенерирующей трубе представляются достаточно обнадеживающими и позволяют считать, что в технологическом отношении вопрос получения большого количества высококонцентрированного раствора K_2CO_3 и рационального использования генерируемого при этом пара может быть решен без особых затруднений.

Глава II. Ионизирующая присадка в камере сгорания

МГД-установки

Ионизирующая присадка должна вводиться перед МГД-генератором таким образом, чтобы к моменту входа в канал она успела испариться, продиссоциировать и максимально приблизиться к термически равновесной степени ионизации. Одновременно она должна хорошо перемешаться с продуктами сгорания и равномерно распределиться по сечению канала. Наиболее удобным местом для ввода присадки является камера сгорания, где обратные и вихревые токи обеспечивают интенсивное перемешивание с газами, а высокие температуры горения способствуют быстрому протеканию физико-химических процессов и ускорению ионизации. Степень завершенности процессов диссоциации и ионизации присадочного вещества зависит от его дисперсности и времени пребывания в камере сгорания. Последнее определяется, в первую очередь, скоростью сгорания топлива, и увеличение его нежелательно, т.к. это требует удлинения камеры и, следовательно, приведет к увеличению тепловых потерь. Эффективным методом активного содействия ускорению процесса ионизации присадки является повышение дисперсности вводимого вещества.

Поскольку пока не удалось обеспечить надежный ввод сухого порошкообразного карбоната калия, и основным методом ввода присадки является ввод водного раствора, то главное внимание в работе сосредоточено на возможностях распыливания этого раствора различными форсунками: прямоструйными, центробежными и пневматическими. Эти форсунки находят широкое применение в различных областях техники и достаточно хорошо освоены.

Теоретические работы в области распыливания жидкости форсунками пока дают лишь общее представление о механизме процесса, а расчеты, как правило, основываются на экспериментальных данных. Накоплен большой материал по распыливанию жидкости форсунками разных типов. Однако в большинстве работ использовалось распыливание различных жидкостей /вода, спирт, ртуть, топливо и масла, парафин и др./ в среду атмосферного воздуха, неподвижного или движущегося. В результате достаточно хорошо изучено влияние физических свойств жидкости на ее диспергирование, и почти ничего не известно о влиянии свойств окружающей среды, что ограничивает область применения расчетных формул случаев истечения жидкости в среду, по своим свойствам мало отличающуюся от воздуха при нормальных условиях.

Между тем в камере сгорания МГДУ имеем дело с повышенными давлениями и высокими температурами газов. Если предположить, что дробление струи на капли идет много быстрее процесса нагревания жидкости, то, по-видимому, основными параметрами среды, влияющими на процесс распыливания, будут плотность и вязкость газов. Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных показал, что в первом приближении эту зависимость можно представить в виде

$$\frac{d_m}{d_{m0}} = \left(\frac{\rho_{г0}}{\rho_r} \right)^{0,2} \left(\frac{\mu_{г0}}{\mu_r} \right)^{0,14}$$

где d_m , ρ_r и μ_r - медианный размер капель, плотность и вязкость газа в камере сгорания. Индекс "0" относится к нормальным условиям.

На основании имеющихся расчетных формул были сделаны расчеты медианного диаметра капель при распыливании водного раствора

K_2CO_3 приструйными, центробежными и пневматическими форсунками. Учитывая характерные для МГДУС большие расходы присадки, требуемую высокую надежность и большую длительность работы, а также реальные возможности по давлению и удельному расходу воздуха, пришлось сделать вывод, что нижний предел /по величине d_m / составляет примерно 50 мкм. Однако нужно иметь в виду, что капли с размером меньше d_m составляют 50% общего веса капель, а еще 45% капель имеют размер в диапазоне от d_m до d_{max} . Поскольку величина d_{max} может превышать d_m в 2 и более раз, то в спектре будут присутствовать и крупные капли с диаметром свыше 100 мкм.

Приведенная оценка размеров капель, получающихся при вводе ионизирующей присадки в виде водного раствора K_2CO_3 , является довольно грубой. Однако она необходима для дальнейшего анализа процессов в камере сгорания, т.к. дает, по крайней мере, порядок величины. Уточнить размеры капель путем их непосредственного измерения в потоке высокотемпературного газа пока не представляется возможным.

Еще более неопределенным является размер капель, получающихся при распыливании перегретых высококонцентрированных растворов K_2CO_3 . Известно, что при резком падении давления в момент истечения жидкости из сопла форсунки происходит вскипание, а это ведет к дополнительному дроблению капель и более тонкому распыливанию. Эксперимент показал, что при использовании центробежных форсунок для распыливания перегретой жидкости повышение ее температуры ведет к уменьшению расхода из-за вскипания и образования паровой фазы в вихревой камере. При распыливании растворов высокой концентрации вскипание может сопровождаться вы-

падением твердой фазы и забиванием выходного сопла. Значительно лучше работают форсунки в виде конических сопел. В этом случае расход жидкости практически не зависит от ее перегрева, а выпадение твердой фазы имеет место за выходным отверстием и не представляет опасности для форсунки. Опыты, проведенные с раствором K_2CO_3 и водой, показали, что такие форсунки работают надежно. При этом угол распыления факела сильно зависит от температуры жидкости: при больших перегревах / $t_{\text{водн}} = 211^\circ\text{C}$ / он превышает 110° , а капли были настолько мелкими, что легко подхватывались и уносились вверх паром, образуя при их вскипании. В диссертации приведены фотографии факелов распыливания воды при разных температурах и давлениях.

Все эти данные проливают свет на процесс диспергирования перегретой жидкости и позволяют оптимистично отнестись к проблеме распыливания сильно перегретых высококонцентрированных водных растворов K_2CO_3 в энергетических МД-установках.

Ионизирующаяся присадка, введенная в камеру сгорания в виде мелких частиц K_2CO_3 или капель его водного раствора, под воздействием горячих / $T = 2800 - 3000^\circ\text{K}$ / газов нагревается, плавится, испаряется, диссоциирует и ионизируется. Схематично последовательность стадий вплоть до испарения можно представить следующим образом. Частицы сухого порошка K_2CO_3 сначала нагреваются до температуры плавления / $\sim 901^\circ\text{C}$ / , затем плавятся и превращаются в жидкие капли, которые нагреваются до равновесной температуры испарения и испаряются. По мере испарения пар K_2CO_3 диффундирует в продукты сгорания, перемешивается с ними и диссоциирует с образованием атомарного калия, который затем ионизируется. Хотя диссоциация карбоната калия может начаться при суще-

ственно более низких температурах, чем равновесная температура испарения, мы для упрощения схемы / и расчета / испарения присадки пренебрегаем этими процессами в жидкой фазе и переносим его целиком в паровую фазу K_2CO_3 , достаточно далеко ушедшую от поверхности капли.

Поскольку коэффициент линейного расширения K_2CO_3 невелик и мало / - на 20% / меняется его плотность при плавлении, то можно считать, что первые три стадии процесса протекают при постоянном размере частицы, и лишь в четвертой стадии / испарение / ее размер меняется от d_0 до 0.

При вводе присадки в виде водного раствора карбоната калия капли сначала нагреваются до равновесной температуры испарения воды из раствора. При характерных для камер сгорания МД-установок больших тепловых потоках эта температура близка к температуре кипения раствора. По мере испарения воды за счет роста концентрации температура капли должна возрастать до тех пор, пока не начнется выпадение твердой фазы. Однако это изменение температуры невелико / при вводе 50%-ного раствора K_2CO_3 оно составит $\sim 20^\circ\text{C}$ / и несоизмеримо с температурным напором газ-капли. Поэтому в расчетах эту температуру можно принять постоянной.

Процесс превращения капли в твердую частицу очень сложный и мало изученный. На данном этапе будем считать, что в результате испарения воды получается твердая сферическая частица с плотностью, отвечающей монолитному веществу, т.е. 2400 кг/м^3 . Затем идет прогрев шарика до температуры плавления с последующим плавлением. После этого капля нагревается до равновесной температуры испарения и, наконец, испаряется. Последние четыре стадии аналогичны стадиям прогрева, плавления, и испарения введен-

ной в камеру сгорания твердой частицы K_2CO_3 . Однако при одинаковом начальном размере d_0 частицы и капли во втором случае имеет место предварительная стадия с изменением размера частицы /испарение воды/ от d_0 до d_1 , а поэтому испарение капли раствора происходит быстрее, чем твердой частицы. Такой поэтапный характер протекания процесса отвечает случаю очень большой теплопроводности материала капли /частицы/, т.е. $\lambda_k = \infty$

Согласно приведенной схеме были сделаны расчеты времени испарения частиц /капель/ возгоняющейся присадки в камере сгорания МГДУ. При этом считалось, что тепло подводится за счет радиации и конвекции. При расчете процессов прогревания плавления величина критерия Нуссельта принималась равной 2, а радиационная составляющая определялась по общепринятой для камер сгорания методике.

Гораздо сложнее обстоит дело с расчетом процессов испарения воды из капли раствора и собственно присадочного вещества. В этом случае возникает паровая фаза, осложняющая тепловую обстановку вблизи капли. Анализ имеющихся в литературе данных по испарению одиночных капель в потоке горячего газа позволил найти способ учета влияния образующегося пара на тепло- и массообмен и на его основании разработать методику определения равновесной температуры испарения капли. Вторым моментом, усложняющим расчет процессов испарения, является монотонное изменение диаметра. Теоретических, или хотя бы эмпирических, формул для расчета этого процесса при подводе тепла радиацией и конвекцией с учетом отвода пара от капли в литературе найти не удалось. Однако и эта трудность была преодолена. Интегрирование уравнения теплового баланса испаряющейся капли при изменении ее размера от d_0

до d_k дало следующее уравнение:

$$\Delta \tau = \frac{\rho_k z}{2 \epsilon_0 \epsilon q_{kc} (T_{nc}^4 - T_k^4)} \left[d_0 - d_k - \kappa \ln \left| \frac{1 + \frac{d_0}{\kappa}}{1 + \frac{d_k}{\kappa}} \right| \right]$$

где $\kappa = \frac{2 \lambda_{nc} (T_{nc} - T_k) \ln(1+B)}{\epsilon_0 \epsilon q_{kc} B (T_{nc}^4 - T_k^4)}$ и $B = \frac{C_{pn} (T_{nc} - T_k)}{z}$

Здесь $\Delta \tau$ - время, за которое в результате испарения диаметр капли уменьшается от d_0 до d_k ; ρ_k - плотность испаряющейся жидкости; z - теплота ее испарения; ϵ_0 , ϵ и q_{kc} - соответственно постоянная Больцмана, приведенная степень черноты капли и коэффициент, учитывающий специфику радиации в рассматриваемой камере сгорания /поля температур и концентраций, толщину излучающего слоя газа, его состав и запыленность, влияние стенок и т.п./; T_{nc} и T_k - температура продуктов сгорания и равновесная температура испарения капли; λ_{nc} - теплопроводность продуктов сгорания /принимается постоянной к отношению к средней температуре пограничного слоя/; C_{pn} - теплоемкость пара.

На основании разработанной методики были рассчитаны времена полного испарения капли /частицы/ присадки в камере сгорания при $T_{nc} = 3000$ и $2500^\circ K$. Эти данные приведены в табл. I.

Как следует из таблицы, время полного испарения очень сильно зависит от диаметра капли. При снижении температуры продуктов сгорания до $2500^\circ K$ время испарения заметно возросло, причем это увеличение τ тем больше, чем больше начальный размер капли, т.е. чем больше радиационная составляющая теплового потока.

Таблица I

Начальный диаметр капли /частицы/, мкм	Время полного испарения капли /частицы/, msec			
	30	50	100	200
Сухой K_2CO_3 : $T_{ис} = 3000^\circ K$	3,5	10	32	105
50%-ный р-р K_2CO_3 : $T_{ис} = 3000^\circ K$	2,5	7	22	70
50%-ный р-р K_2CO_3 : $T_{ис} = 2500^\circ K$	3,0	9	36	135

Напомним, что все приведенные расчеты делались при следующих допущениях:

1. капля неподвижна относительно продуктов сгорания;
2. при испарении воды из капли раствора K_2CO_3 получается монолитная частица с плотностью 2400 кг/м^3 ;
3. процесс идет с четким разделением стадий: нагревание-испарение воды-нагревание-плавление K_2CO_3 -нагревание-испарение K_2CO_3 , т.е. при $\lambda_k = \infty$ / $Bi = 0$ /.

В действительности эти допущения могут не подтвердиться. Поэтому была сделана попытка оценить получающуюся при этом погрешность. Влияние начальной скорости капли может проявиться, главным образом, на участке торможения. Однако, как показали расчеты время почти полного торможения капли /со 100 м/сек до 1 м/сек/ по крайней мере в 20 раз меньше времени полного испарения капли, и влиянием относительной начальной скорости капли можно пренебречь. Этот вывод согласуется с экспериментальными данными, полученными Ходдманом и Гаувином при исследовании испарения капель в факелах прямоструйных и пневматических форсунок.

Из опыта работы распылительных сушильных установок извест-

но, что высушенные частицы имеют форму близкую к сферической, но плотность их меняется в широких пределах в зависимости от молекулярной структуры раствора и режима сушки. Поскольку мы не располагаем данными о процессе испарения капли раствора K_2CO_3 в камере сгорания МТД-установок, об образовании твердой фазы и плотности получающейся частицы, была предпринята попытка смоделировать этот процесс путем организации кипения капель 20- и 50%-ного водного раствора K_2CO_3 в сфероидальном состоянии над сильно нагретой поверхностью. Поведение капли фиксировалось с помощью киносъемки. Было замечено, что процесс монотонного уменьшения капли имеет место лишь в начальной стадии испарения. Затем капля начинает пульсировать, то принимая форму шара, то превращаясь в приплюснутый сфероид. При этом наблюдаются "взрывы", сопровождающиеся выбросом мелких капелек. Получающийся твердый остаток обычно имеет вид деформированного шара. Он пористый, иногда полый. Его размеры в любом случае превышают размеры плотного ядра с $\rho_s = 2400 \text{ кг/м}^3$, принимаемого нами в расчетах, и обычно близки к начальному диаметру капли, а иногда и превышают его. Если принять в первом приближении $d_{тв} = d_0$, то средняя плотность частицы будет 750 кг/м^3 и относительная пористость - 70%.

Известно, что теплопроводность пористых материалов значительно ниже, чем сплошных. В нашем случае это может привести к тому, что стадии прогрева частицы, ее плавления, нагревания до температуры испарения и собственно процесс испарения будут протекать практически одновременно, т.е. за счет малой теплопроводности материала пористой частицы / $\lambda_k = 0$ / зоны нагревания и плавления будут находиться на внутренней стороне тонко-

го слоя, испаряющегося снаружи. Проведенные по этой схеме расчеты времени испарения капель /частиц/ присадки показали, что суммарное время практически не изменилось: для капель 50%-ного раствора K_2CO_3 с $d_p = 100$ мкм оно оказалось равным 21 мсек, тогда как при поэтапном расчете равнялось 22 мсек. Это позволяет сделать вывод о возможности использования предложенной методики расчета времени полного испарения отдельных капель присадки.

Эта же методика была применена для расчета испарения капель в факеле распыливания в камере сгорания МГД-установки. В этом случае, поскольку весовая доля вводимой присадки невелика /с балластной водой не превышает 3,5 вес.%, а объемная, до испарения, на 3 порядка меньше, взаимным влиянием капель можно пренебречь. По известным параметрам распыливания и конструкции форсунки можно рассчитать спектр получающихся капель, а затем найти время полного испарения капель того или иного размера. Эти расчеты позволяют определить количество присадки, испарившейся за любой выбранный период времени.

Согласно принятой схеме диссоциация и ионизация присадки происходят за пределами пограничного слоя, т.е. протекают одновременно с процессом испарения, но с запаздыванием, обусловленным прохождением пара K_2CO_3 через пограничный слой. Массоперенос пара через этот слой осуществляется диффузией и стафановским потоком. Приведенная оценка времени запаздывания показала, что эта величина имеет порядок 10^{-5} сек и ее можно пренебречь. Пренебрежимо малые величины были получены и при оценках времени диссоциации и ионизации.

Таким образом, скорость ионизации присадки практически

определяется скоростью ее испарения и $\tau_{иониз} = \tau_{исп}$. Это позволило провести сравнение расчета испарения присадки с экспериментом. Опыт проводился на специальной прямооточной цилиндрической камере сгорания МГД-установки У-02. Присадка вводилась в камеру с помощью центробежной форсунки через 100 мм за фронтом пламени, а через 200, 500 и 900 мм по ходу газов измерялась электропроводность σ методом "добротности, LC-контура". По теории величина σ должна быть пропорциональна корню квадратному из количества испарившейся присадки, а эта величина рассчитывается описанным выше методом. Проведенные сравнения показали вполне удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных величин: расхождение было - 30% при точности измерения $\sigma \pm 25\%$. Аналогичное согласие с расчетом дали и измерения концентрации свободных атомов калия, проведенные на У-02 за камерой сгорания в трубе, заменяющей МГД-канал. В этом случае расхождение составляло +40% при точности измерения концентрации $\pm 50\%$.

Проведенные в указанной камере сгорания У-02 измерения электропроводности показали, что уже через 9 мсек, когда ионизируется лишь около 25% введенной присадки / $\sigma = 0,5 \sigma_{теор}$ /, имеет место выровненный по сечению камеры профиль электропроводности со снижением σ у охлаждаемых стенок, т.е. в пограничном слое.

Глава III. Ионизирующаяся присадка в газовом тракте МГД-установки

Введенная в камеру сгорания ионизирующаяся присадка постепенно приходит в термодинамическое равновесие с горячими газами и движется вместе с ними через весь тракт МГД-установки. По мере

прохождения через МГД-канал и теплообменники продукты сгорания охлаждаются от температуры порядка 3000°K в камере сгорания до $350-500^{\circ}\text{K}$ перед входом в дымовую трубу. При этом присадка претерпевает ряд физико-химических превращений.

В зоне высоких температур /выше 1500°K / вся присадка находится в газообразной фазе, т.е. в состоянии, легче всего поддающемся термодинамическим расчетам. Такие расчеты для продуктов сгорания газообразного топлива /метана/ с добавкой K_2CO_3 были проведены в Лаборатории химической термодинамики ИВТ АН СССР. Оказалось, при температуре 3000°K около 80% присадки находится в виде атомарного калия, значительно меньшая доля - в виде KOH. Кроме того, в газах имеется небольшое количество окиси калия KO и ионизированного калия K^+ . По мере снижения температуры резко уменьшается количество K^+ , а также KO и K, и возрастает количество KOH. При температуре 2500°K доли калия, переходящие на K и KOH, выравниваются, а при более низких температурах соединение KOH становится преобладающим.

При температуре около 1500°K гидроокись калия начинает реагировать с CO_2 с образованием карбоната K_2CO_3 . Карбонат калия при этой температуре имеет малую упругость пара, а поэтому быстро наступает пересыщение, и при температуре $1470-1430^{\circ}\text{K}$ происходит объемная конденсация паров K_2CO_3 . Получается туман, а при охлаждении газов ниже температуры плавления K_2CO_3 / $T_{\text{пл}} = 1174^{\circ}\text{K}$ / - конденсационный аэрозоль.

В процессе объемной конденсации обычно получаются капли /частицы/ субмикронных размеров, которые постепенно увеличиваются либо за счет конденсации на них пара, либо за счет коагуляции. Однако в рассматриваемом случае при очень крутой зависи-

мости давления пара K_2CO_3 от температуры конденсация должна заканчиваться очень быстро, в узкой области температур. Не приходится ожидать заметного укрупнения частиц и в результате коагуляции, т.к. их объемная концентрация в потоке очень мала /порядка $10^{-5}-10^{-6}$ / . Поэтому даже в конце газового тракта МГДУ основная масса частиц присадки должна сохранить субмикронные размеры. Этот вывод был подтвержден экспериментально путем измерения размеров частиц, отобранных из низкотемпературной зоны контура У-02. Согласно измерениям на приборе светорассеяния ФПС-2М средний диаметр частиц близок к 0,2 мкм. Близкие результаты / $d_p = 0,4$ мкм/ были получены при измерении диаметра этих же частиц седиментационным методом с применением ультрамикроскопа.

Экспериментальное определение химического состава частиц конденсационного аэрозоля показало, что карбонат является практически единственным соединением калия в продуктах сгорания природного газа в диапазоне температур от 1100 до 500°K . Далее, в низкотемпературной части газового тракта было обнаружено большое количество бикарбоната калия. Специальными исследованиями, проведенными на У-02 и на лабораторном стенде, была установлена температурная зона, в которой происходит переход K_2CO_3 в KHCO_3 , и определено равновесное содержание того и другого калиевого соединения в их смеси при различных температурах продуктов сгорания.

Опыты показали, что при давлениях $0,55-1,0$ кгс/см² и содержании CO_2 и H_2O в газах соответственно 8-10 и 17-25 об.% верхняя граница образования бикарбоната лежит вблизи 160°C . С понижением температуры доля калия, находящегося в виде KHCO_3 ,

возрастает и при $t = 120^{\circ}\text{C}$ равна 0,35. При температуре ниже $110-120^{\circ}\text{C}$ наблюдалось увлажнение уловленной присадки и продолжался переход K_2CO_3 в KHCO_3 . При температуре 70°C происходила почти полная /~80%/ карбонизация K_2CO_3 до KHCO_3 . Полученные данные позволяли завершить картину физико-химических превращений присадки в газовом тракте МГД-установки.

Анализ этой картины дает возможность представить механизм образования отложений в той или иной температурной зоне тракта. Очевидно, в зоне температуры газов выше 1500°K отложения присадки будут образовываться в результате конденсации паров КОН на холодной поверхности, при низких температурах /ниже 1174°K / причиной отложений является оседание субмикронных частиц. Однако как повлияет на этот процесс переменное поле температур в пограничном слое и каков будет характер отложений, априори сказать нельзя.

Для решения этой задачи был создан опытный стенд, и на нем проведено соответствующее исследование. Принцип действия стенда был следующим. В камеру сгорания трубчатого типа / \varnothing 70 мм/ подавались горячий воздух, природный газ и присадка в виде спиртового раствора уксуснокислого калия. Получающиеся продукты сгорания с температурой $1800-2000^{\circ}\text{K}$ проходили в кольцевом пространстве, образованном внешней изолированной и внутренней охлаждаемой трубами, и постепенно охлаждались. Использование воздуха для охлаждения внутренней трубы позволило существенно изменять температуру ее поверхности, на которой отлагалась присадка. После опыта центральная труба извлекалась из стенда, и отложения анализировались.

Опытами был охвачен следующий диапазон изменения параметров:

температура потока /по ходу газов /	$1900-450^{\circ}\text{K}$
температура охлаждаемой поверхности	$1500-420^{\circ}\text{K}$
расход продуктов сгорания	$8,5-12,5 \text{ м}^3/\text{час}$
соответствующие числа Рейнольдса	400-1350
концентрация калия в газах	0,2-0,7 вес.%

Результаты опытов сведены в табл.2.

Таблица 2

Вид и химический состав отложений присадки в различных температурных зонах

№ пп	$T_{\text{пс}}, ^{\circ}\text{K}$	$T_{\text{ст}}, ^{\circ}\text{K}$	Вид отложений	Состав отложений
1	1900-1700	> 1120	Отложений присадки нет. Стенки труб покрыты слоем хрупкой окалины.	-
2	1700-1500	1120-1020	Коркообразные темнозеленые плотные отложения, затем более светлые.	КОН, K_2CO_3 , K_2O
3	1500-1200	1020-900	Рыхлые, кремового или горчичного цвета с длинными кристаллами.	K_2CO_3
4	1200-600	900-520	Белоснежные рыхлые из субмикронных частиц	K_2CO_3

Сопоставление полученных данных с общей картиной физико-химических превращений присадки позволяет сделать вывод о механизме отложений в разных зонах.

Отсутствие отложений в первой зоне, когда температура поверхности была выше температуры конденсации пара КОН подтверждает предположение о решающей роли конденсации в процессе образования отложений в высокотемпературной зоне тракта: хотя в пограничном слое температура газов была ниже температуры перехода КОН

в K_2CO_3 и объёмной конденсации последнего, отложений не было, т.е. роль этого процесса в образовании отложений пренебрежимо мала.

Не чувствуется роли снижения температуры в пограничном слое и при образовании отложений на участке 2, где $T_{ст} < T_{свпа}$: плотные коркообразные отложения являются следствием конденсации пара КОН в жидком состоянии с последующим отвердеванием за счёт поглощения CO_2 и образования более тугоплавкого карбоната калия.

"Инеобразные" отложения в третьей зоне образуются, по-видимому, в процессе конденсации /возможно, даже десублимации/ паров K_2CO_3 из пересыщенного потока на центрах кристаллизации, расположенных на более холодной поверхности.

Отложения четвёртой зоны образуются из твёрдых частиц конденсационного аэрозоля, т.к. $T_{ст} < T_{пл K_2CO_3}$. В конце участка охлаждения при температурах стенки ниже $420^\circ C$ отложения, как и следовало ожидать, содержат некоторое количество $KHCO_3$.

Таким образом, характер отложений определяется в основном температурными условиями в потоке и на стенке; физико-химические процессы, которые должны были бы протекать в пограничном слое, по крайней мере в условиях нашего эксперимента, не оказывают заметного влияния на картину отложений, и в расчётах ими можно пренебречь. Тогда расчёт скорости образования отложений в зоне высоких температур сводится к определению массообмена при конденсации пара КОН из потока парогазовой смеси, а в зоне низких температур - к скорости осаждения частиц на поверхность.

Процесс массообмена при конденсации паров из смеси с некогдайсирующимся газом изучен достаточно хорошо для системы вода-

ной пар-воздух. Известно, что при небольших /до 20%/ объёмных содержаниях пара в воздухе сохраняется аналогия между тепло- и массообменом. Наличие такой аналогии наблюдалось нами и для систем CCl_4 -азот, калий-азот /или аргон/ и цезий-аргон при течении их в наклонной трубе. Это позволяет думать, что подобная аналогия сохранится в случае конденсации пара КОН. Малая концентрация его в продуктах сгорания, по-видимому, не потребует учёта поперечного потока, и основным отличием процесса конденсации КОН из системы КОН-продукты сгорания в МГД-установках от рассмотренных систем является большая разность температур газ-стенка.

С целью проверки сохранения аналогии между тепло-и массообменом в интересующем нас случае было проведено исследование этого процесса в условиях продольного и поперечного обтекания труб высокотемпературным газовым потоком с содержанием паров КОН от 1 до 3 г/м³. Опыты проводились на описанном ранее экспериментальном стенде /продольное обтекание при ламинарном режиме/ и на контуре МГД-установки У-02 /поперечное обтекание/. Их результаты подтвердили наличие такой аналогии: отличие экспериментальных коэффициентов массообмена от их значений, рассчитанных на основании аналогии, не превышало $\pm 25\%$ в первом случае и $\pm 30\%$ - во втором. Учитывая ограниченную точность физических параметров в области высоких температур, а также погрешность в определении самой температуры, такое совпадение эксперимента с расчётом следует считать вполне приемлемым.

В длинных каналах МГД-генераторов с относительно холодными /ниже $1000^\circ K$ / изоляционными и электродными стенками создается пограничный слой, толщина низкотемпературной части которого мо-

жет достигать нескольких сантиметров. Время прохождения паров КОН через такой слой из ядра потока достаточно велико, чтобы, по крайней мере, часть гидроокиси прореагировала с CO_2 , перешла в K_2CO_3 и образовала конденсационный аэрозоль. Можно ожидать, что решающую роль в оседании полученных частиц на стенке будет играть не диффузия, а силы термофореза. Это было подтверждено экспериментально. При продольном обтекании поверхности ламинарным потоком конденсационного аэрозоля скорость оседания частиц K_2CO_3 в случае охлаждения поверхности была почти на порядок выше, чем в изотермических условиях.

Данные о физико-химических превращениях присадки, о конденсации паров КОН и осаждении твердых частиц K_2CO_3 указывали на большую сложность процессов, сопровождающих работу теплообменных аппаратов на продуктах сгорания с присадкой и требовали постановки опытов в условиях, характерных для МГД-установок. Такие опыты были проведены на модели парогенератора /МПГ/, имеющейся на МГД-установке У-02. Сюда из МГД-канала поступали продукты сгорания с температурой порядка 2000°K и охлаждались до $\sim 400^\circ\text{K}$.

МПГ имела П-образную компоновку, т.е. состояла из двух вертикальных шахт, соединенных горизонтальным газоходом. В подъемной шахте располагались радиационная камера, холодная воронка и полурадационные поверхности. Опускная шахта включала два трубных поперечно омываемых пучка и бункер. Над ней располагалось устройство для подачи металлической дробы. Вся поверхность стен в обеих шахтах покрыта плотно расположенными экранными трубами, охлаждаемыми водой.

Модель парогенератора была пущена в эксплуатацию в конце

1967 года и с тех пор проработала несколько тысяч часов. За это время были определены ее гидравлические и тепловые характеристики при работе без присадки и с присадкой. Опыты проводились в широком диапазоне изменений температуры поступающих продуктов сгорания, их расходов и содержания в них присадки.

Оказалось, что при конденсации паров КОН на радиационных и полурадационных поверхностях не вся гидроокись успевает прореагировать с CO_2 и перейти в тугоплавкий карбонат, и вместо чистого K_2CO_3 с температурой плавления выше температуры конденсации паров КОН отложения состоят из смеси K_2CO_3 -КОН с существенно более низкой температурой плавления. В результате, по достижении определенной толщины, отложения оплавливались с поверхности, и новые порции сконденсировавшейся присадки стекали вниз, в холодную воронку, а из нее в воду. Таким способом выводилось до 40% введенной присадки.

Опыт показал, что при попадании в воду расплав K_2CO_3 -КОН мгновенно растворяется, тогда как застывший расплав представляет собой механически прочную массу, очень медленно растворяющуюся в воде. Поэтому для удаления стекающей присадки был создан специальный контур, в котором циркулировал водный раствор с концентрацией до 50% K_2CO_3 .

Процесс оплавления отложений привел к стабилизации их толщины, а, следовательно, и к стабилизации гидравлических и тепловых характеристик радиационной шахты.

Отложения имели следующую структуру. К металлической поверхности труб, имеющей температуру около 400°K и слегка корродированной, прилегал рыхлый пористый, хотя и очень тонкий

/- 0,5 мм/ слой, слабо связанный с поверхностью. Термическое сопротивление его велико, и при характерных для рассматриваемой зоны тепловых потоках / 0,2 Мвт/м²/ температурный перепад в этом слое может составлять сотни градусов. На рыхлом слое располагается твердый монолитный слой, толщина которого зависит от теплового потока. В центральной части экранов она составляла несколько миллиметров, а в углах достигала 2-3 см. Температура внешней поверхности этого слоя равна температуре плавления, и по ней стекала расплавленная присадка, создавая при остановке третий оплавленный слой.

В опускающую шахту продукты сгорания поступали с температурой не выше 1100°К, т.е. все конвективные поверхности омывались потоком конденсационного аэрозоля с твердыми частицами диаметром около 0,2 мкм. При характерных для опытов скоростях потока 10-14 м/сек инерционные эффекты осаждения частиц на трубах невелики, и трубы покрывались довольно равномерным слоем присадки, в конечном счете перекрывающим межтрубные коридоры. В свободных коридорах скорость возрастала в несколько раз, но процесс отложений не прекращался. Гидравлическое сопротивление резко возрастало, и приходилось прибегать к очистке конвективных поверхностей. Попытки сделать это с помощью периодически включаемой дробеочистки не дали желаемого результата. Очень эффективной оказалась обмывка поверхностей водой /через устройство для подачи дробы/: 10ти-минутное орошение позволяло довести поверхность труб до такого состояния, что процесс отложений как бы начинался заново. Необходимая периодичность такой очистки - около 5 часов.

Измерение температуры продуктов сгорания в разных зонах

МПГ позволило оценить изменение теплопередачи по мере подачи присадки. К моменту достижения стабилизации отложений средний коэффициент теплопередачи первых по потоку полурадационных поверхностей снижался почти вдвое, тогда как во второй полурадационной шторке - лишь на 15%. По-видимому, в последнем случае увеличение термического сопротивления за счет отложений присадки компенсировалось увеличением лучистой составляющей вследствие повышения температуры газов. Теплопередача в конвективной шахте монотонно снижалась, и перед промывкой достигала 60-70% от исходной величины. Промывка водой приводила к резкому повышению теплопередачи, а затем опять шло ее снижение.

Анализ отложений присадки показал, что помимо калиевых соединений в них содержится до 1% циркония, хрома, алюминия, магния, меди и натрия. В меньших количествах содержится кремний, кальций, железо. Одни вещества попадают из обмуровки горячих поверхностей и из насадки высокотемпературного воздухоподогревателя, другие - из металлических элементов канала и теплообменников. В подавляющем большинстве соединения этих элементов /окислы, карбонаты, алюмосиликаты/ почти нерастворимы в воде. Количество нерастворимых соединений уменьшается по ходу газов: в отложениях на экранах радиационной камеры их доля доходила до нескольких процентов, а на выходе из МПГ не превышала 1%.

Опыт работы МПГ на У-02 позволил выявить наиболее неприятные с точки зрения эксплуатации зоны и наметить пути борьбы с отложениями. Результаты химического анализа дали представление о состоянии основного количества выводимой присадки, что необходимо для разработки системы ее регенерации.

Глава IV. Улавливание присадки из уходящих продуктов сгорания и ее регенерация

Одним из важнейших вопросов, которые встанут перед создателями энергетических МГД-установок, является улавливание и вывод ионизирующейся присадки и возвращения ее в цикл. Необходимость этого определяется требованиями как экономики, так и санитарии. Проведенные оценки показали, что более жесткими являются экономические требования, согласно которым потери присадки не должны превышать 1% ее расхода.

Достижение столь полного улавливания присадки представляет немалые трудности, особенно если учесть субмикронные размеры аэрозольных частиц. Анализ имеющихся данных об аппаратах очистки газа и эффективности улавливания ими частиц пыли разных размеров позволил выявить аппараты, наиболее перспективные для улавливания присадки на МГЭС. Это тканевые фильтры, турбулентный промыватель Вентури и электрофильтр. Все три типа аппаратов прошли испытания на МГД-установке У-02. Созданные на их основе системы вывода присадки располагались за МПГ в зоне температур 70-300°C и давлений 0,4-0,6 кгс/см². Система рукавных фильтров и система с турбулентным промывателем были рассчитаны на полный расход продуктов сгорания и, включенные параллельно, работали поочередно. Для исследования эффективности улавливания присадки мокрым электрофильтром была создана пилотная установка на 10-15% полного расхода газов. Она включена параллельно с другими системами и могла работать одновременно с любой из них.

Испытания систем вывода присадки, проведенные совместно с

институтом НИИОГАЗ, показали реальность улавливания 99% присадки каждой из систем.

В качестве материала для рукавных фильтров использовались байка ЧИ, нитрон саржевого переплетения с небольшим односторонним начесом и стеклоткань марки ТССНФ-0, обработанная 1,5%-ным водным раствором кремнийорганической жидкости ГКЖ-94. Наилучший результат был получен на фильтрах из стеклоткани: при температуре газов около 200°C остаточная запыленность не превышала 6-8 мг/м³, что соответствовало эффективности улавливания свыше 99,7%. При этом гидравлическое сопротивление фильтров колебалось в пределах 170-870 кгс/м². Снижение температуры газов приводило к местному увлажнению осевшей присадки, что сопровождалось увеличением проскока пыли, возрастанием гидравлического сопротивления фильтра и ухудшением его регенерации.

Испытывались фильтры из стеклоткани ТССНФ-0 в каркасном и бескаркасном исполнении. Механическое разрушение бескаркасных элементов происходило гораздо чаще, чем разрушение рукавов, натянутых на каркас. Это объясняется следующим. Во время обратной продувки при регенерации бескаркасные рукава сжимаются в "звезду". Возникающие в этих условиях многократные изгибающие усилия разрушающе действуют на стеклоткань.

Рукава, натянутые на каркас, работают на растяжение и истирание. Эти нагрузки менее губительны для стеклоткани, чем изгибающие, а поэтому срок службы каркасных фильтрующих элементов значительно больше, чем бескаркасных.

Изучение воздействия щелочной среды на стеклоткань, проведенное в НИИОГАЗ в лабораторных условиях, показало, что прочность на разрыв у запыленной ткани на 26% меньше чем у незапы-

ленной. Еще больше разница в изгибоустойчивости: запыленные образцы ткани разрушались в среднем после 600 циклов изгиба, тогда как чистая ткань выдерживала 1800 циклов.

На данном этапе рукавные фильтры дороги, громоздки и ненадежны. Перспективность их использования в МГД-установках находится в прямой зависимости от разработки новых тканей, достаточно прочных и хорошо регенерируемых во время работы. Пока таких тканей нет.

Система улавливания присадки с помощью турбулентного промывателя Вентури была создана на У-02 в 1968 году. Ее отличают простота обслуживания, большая надежность в работе. За четыре года эксплуатации оборудование, выполненное из нержавеющей стали Х18Н10Т, не корродировало совсем, а коррозия углеродистой стали оказалась ничтожной, хотя контакт металла с водным раствором $K_2CO_3-KHCO_3$ был практически непрерывным в течение всего этого периода, т.е. нескольких десятков тысяч часов.

Система состоит из пенного аппарата, служащего для охлаждения и предварительной очистки газа, трубы-распылителя /Вентури/, в котором происходит укрупнение частиц и осаждение их на каплях орошающей жидкости, и каплеуловителя-циклона. Исследовались трубы-распылители с круглой горловиной / $d=180, 130$ и 110 мм / и с регулируемой горловиной прямоугольного сечения.

Для орошения аппаратов использовался водный раствор присадки с концентрацией от 0 до 30%.

Испытания показали, что пенный аппарат, обеспечивая охлаждение и увлажнение газов, плохо улавливает субмикронную пыль K_2CO_3 /менее 30%/, а эффективность улавливания присадки турбулентным промывателем находится в прямой зависимости от расхода энер-

гии /главным образом, от гидравлического сопротивления трубы-распылителя/. Эта зависимость оказалась одинаковой для всех исследованных труб Вентури:

эффективность улавливания, %	90	96	98	99
расход энергии в пересчете на гидравлическое сопротивление, кгс/м ²	750	1400	2000	2700

Таким образом, улавливание 99% присадки с помощью турбулентного промывателя вполне осуществимо, но энергетические затраты велики и должны отрицательно сказаться на к.п.д. МГДЭС. Поэтому пока можно говорить о применении этого метода улавливания лишь на пиковых МГДЭС.

От указанного недостатка свободен мокрый электрофильтр. Известна высокая эффективность улавливания мелкодисперсной пыли в электрическом поле, а хорошая растворимость присадки в воде вселяла надежду на успешное удаление ее с осадительных электродов путем орошения их водой. Опыты, проведенные на пилотном мокром электроfiltре на У-02, подтвердили эти предположения: при длине электрического поля 0,8 м и напряжении 43 кв в опытах с коронирующими электродами штыкового сечения эффективность улавливания достигала 87,5%, а в опытах с игольчатыми электродами достигала 95%. Это было при скорости газов 1,23 м/сек. Уменьшение скорости газов в электроfiltре до 0,7 и 0,56 м/сек позволило повысить эффективность соответственно до 96,5 и 98%. С увеличением длины электрического поля эффективность улавливания должна возрасти, и пересчет полученных данных на 4-х-полюсный промышленный электрофильтр дает $\eta > 99\%$. Это позволяет сделать вывод о перспективности мокрого электрофильтра для базовых МГДЭС.

Одновременно с исследованием эффективности улавливания

"мокрыми" методами изучался процесс карбонизации K_2CO_3 до $KHCO_3$ в водных растворах присадки различной концентрации при контакте с продуктами сгорания, содержащими CO_2 . Опытами был охвачен диапазон концентраций /по катиону-калию/ от 1 до 30 г на 100 г воды при температуре раствора 35-55°C. Установлено, что при малых концентрациях раствора практически весь калий находится в виде $KHCO_3$. С увеличением концентрации раствора доля $KHCO_3$ падает и при 30 г калия на 100 г воды составляет 0,3.

Согласование полученных данных с формулой Шервуда-Цигфорда, полученной для растворов K_2CO_3 - $KHCO_3$ меньших концентраций, и наличие данных о растворимости в этой системе позволили оценить предельные концентрации присадки, достижимые без выпадения твердой фазы, в системах мокрого вывода МГДУ, работающих с разной степенью обогащения воздуха кислородом, т.е. при разном содержании в газе CO_2 . Оказалось, что если предельная концентрация раствора в случае использования атмосферного воздуха равна 35 вес.% /в пересчете на чистый K_2CO_3 /, то при обогащении воздуха кислородом до 50% эта концентрация повышается до 40%.

Анализ раствора, полученного на У-02 в системе с турбулентным промывателем, показал, что основное количество примесей находится в нерастворимом виде и легко удаляется осаждением. Оставшиеся примеси /десятые доли %/ не должны играть существенной роли в регенерации присадки, которая будет в основном сводиться к декарбонизации K_2CO_3 , поскольку ввод $KHCO_3$ в цикл не выгоден из-за излишнего балласта и дополнительного расхода тепла на разложение. Декарбонизацию присадки предполагается осуществлять термическим методом, за счет кипячения /или вскипания/ раствора при-

садки, как это делается в химической промышленности в установках по улавливанию CO_2 из газов.

Заключение

Проведенные исследования процессов, связанных с использованием конвизирующей присадки в МГДУ-установках открытого цикла, работающих на природном газе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Для энергетических МГДУ-установок рассматриваемого типа перспективным присадочным веществом является карбонат калия.
 2. Гигроскопичность и плохая сыпучесть этого вещества затрудняют ввод его в виде мелкодисперсного порошка. Ввод присадки в виде водного раствора прост, надежен, но ведет к дополнительному снижению температуры, а следовательно, и электропроводности плазмы.
 3. Уменьшение этого дефекта может быть достигнуто использованием высококонцентрированных /75-80%/ водных растворов K_2CO_3 . Экспериментально доказано существование таких растворов при высоких параметрах /Р и Т/ и показана возможность непрерывного их получения в парогенерирующем контуре с сепаратором.
- Определены коэффициенты теплоотдачи при кипении этих растворов при давлениях до 150 кгс/см² и проведена оценка чистоты получаемого пара.
4. На основании имеющихся расчетных и экспериментальных данных об электропроводности продуктов сгорания с присадкой калия получена удобная для расчетов эмпирическая формула.
- Приведена оптимизация расхода присадки в зависимости от параметров плазмы и способа ввода K_2CO_3 .

5. Предложена методика расчета скорости испарения присадки в камере сгорания, учитывая лучистый тепловой поток и отток образующегося пара. Проведенные по этой методике расчеты испарения присадки дали результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными по электропроводности газов в камере сгорания У-02.

6. Экспериментально изучено поведение присадки в разных температурных зонах газового тракта МГД. Определен размер частиц конденсационного аэрозоля.

7. Проведено экспериментальное исследование массообмена при конденсации на холодной поверхности паров КОН из потока продуктов сгорания с присадкой. Показана возможность использования для расчетов аналогии между тепло- и массообменом.

8. Исследован характер отложений присадки на теплообменных поверхностях установки У-02.

9. Предложен и исследован способ вывода присадки в расплавленном виде из высокотемпературной части теплообменника У-02. Показано, что таким образом можно выводить до 40% введенной присадки.

10. Разработаны и экспериментально проверены меры борьбы с забиванием присадкой межтрубных коридоров. В высокотемпературной зоне это достигается применением разреженных полурадационных поверхностей, в низкотемпературной - периодической обмывкой водой.

11. Исследовано влияние отложений присадки на теплообменные характеристики полурадационных и конвективных поверхностей модели парогенератора У-02.

12. Испытаны три системы улавливания присадки и показана

перспективность мокрых методов: турбулентного промывателя для пиковых МГДЭС и мокрого электрофильтра для базовых МГДЭС.

13. Исследован процесс карбонизации K_2CO_3 в водном растворе в системах вывода присадки. Определена степень карбонизации и оценена величина предельной концентрации присадки в растворе при использовании в качестве окислителя воздуха с разной степенью обогащения кислородом.

14. Получены сведения о химическом составе выведенной присадки и количестве инородных примесей. Даются предложения по технологии регенерации присадки на МГД-установках.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. М.А.Стырикович, И.Л.Мостинский, Е.Г.Смирнова. Об использовании водного раствора поташа для ввода ионизирующейся присадки в канал МГД-генератора открытого цикла. Теплофизика высоких температур, 5, № 5, 1967.

2. И.Л.Мостинский, Е.Г.Смирнова. О снижении температуры в камере сгорания энергетических МГД-установок открытого цикла за счет вводимой присадки. Теплофизика высоких температур, 6, № 2, 1968.

3. Я.М.Визель, И.Л.Мостинский. Массообмен при конденсации пара из движущейся парогазовой смеси. Известия АН СССР, "Энергетика и транспорт", № 4, 1968.

4. И.Л.Мостинский. К оценке оптимальной концентрации ионизирующейся присадки в энергетических МГД-генераторах. Теплофизика высоких температур, 6, № 4, 1968.

5. М.А.Стырикович, И.Л.Мостинский, Я.М.Визель. Массообмен при конденсации паров калия из потока парогазовой смеси. Теплофизика высоких температур, 6, № 4, 1968.

6. М.А.Стырикович, И.Л.Мостинский, Е.Г.Смирнова. Ввод ионизирующейся присадки в энергетических МГД-генераторах открытого цикла. Сб. "Electricity from MHD, 1968", IAEA, Vienna, 1968.

7. М.А.Стырикович, А.Е.Шейндлин, И.Л.Мостинский. Ионизирующаяся присадка в МГД-генераторах открытого цикла, работающих на газообразном топливе. Сб. "Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии". Под ред. В.А.Кириллина и А.Е.Шейндлина. Энергия, 1968.

8. Я.М.Визель, И.Л.Мостинский. Массообмен при конденсации паров цезия из движущейся смеси с аргоном. Теплофизика высоких температур, 7, № 2, 1969.

9. М.А.Стирикович, И.Л.Мостинский, М.А.Ларичева. Исследование отложений углекислых соединений калия из потока продуктов сгорания несернистого топлива. Теплофизика высоких температур, 7, № 6, 1969.

10. А.Д.Вальдберг, И.Л.Мостинский, Р.С.Нехорошев. К использованию турбулентного промывателя для вывода ионизирующей пригрузки в энергетических МГД-генераторах открытого цикла. Теплофизика высоких температур, 8, № 1, 1970.

11. А.С.Голубкова, Н.И.Захарова, М.А.Ларичева, И.Л.Мостинский, Р.С.Нехорошев. Переход K_2CO_3 в $KHCO_3$ в низкотемпературной зоне газового тракта МГД-генератора. Теплофизика высоких температур, 8, № 2, 1970.

12. И.Л.Мостинский, Е.Г.Смирнова. Исследование теплоотдачи при кипении водных растворов карбоната калия. Теплофизика высоких температур, 8, № 5, 1970.

13. В.А.Кириллин, А.Е.Шейндлин, Б.Я.Шумяцкий, В.В.Кириллов, Д.К.Буренков, С.И.Пишиков, Г.А.Любимов, И.Л.Мостинский, П.Г.Полетаев, В.И.Гажовский. Некоторые результаты исследований на модельной МГД-установке У-02. "Fifth International Conference on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation" Munich, 19-23 apr. 1971, v. , 353-370.

14. В.А.Кириллин, А.Е.Шейндлин, Б.Я.Шумяцкий, В.В.Кириллов, Д.К.Буренков, С.И.Пишиков, П.Г.Полетаев, И.Л.Мостинский, В.Н.Сухов, Л.В.Краузе. Исследования МГД-установки У-02 при её работе в длительных режимах. Теплофизика высоких температур, 9, № 5, 1971.

Материалы настоящей работы докладывались:

на IV и V Международных симпозиумах по МГД-преобразованию энергии / Варшава, 1968 г.; Мюнхен, 1971 г./

на Семинаре по теплотехническим основам методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, Киев, 1969 г.

на Симпозиуме по тепловым процессам в МГД-установках. Каунас, 1970г

на заседании Секции тепловых процессов в высокотемпературных аппаратах и конструкциях Научного Совета АН СССР по комплексной проблеме "Высокотемпературная теплофизика", Москва, 1971 г.

на I, III и IV конференциях ИВТ АН СССР.

T-17273. Заказ № 44. Тираж 200 экз.

КМТ ОКБ ИВТ АН СССР